

METODA WYZNACZANIA OSIADANIA GLEBY PODDANEJ
OBCIĄŻENIU WYKORZYSTUJĄCA POMIARY WILGOTNOŚCI
OBJĘTOŚCIOWEJ*

Grzegorz Janik

Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
e-mail:janik@miks.ar.wroc.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę szacowania osiadania gleby poddanej obciążeniu wykorzystującą technikę TDR. Postawiono hipotezę, że osiadanie to, do momentu całkowitego wyparcia powietrza z wolnych przestrzeni, jest jedyną przyczyną zmiany wilgotności objętościowej. Słuszność tak postawionej hipotezy, której uzasadnienie jest konieczne do zastosowania metody, wykazano na podstawie rozważań teoretycznych oraz przeprowadzonego eksperymentu polowego. Dodatkowo poprawność metody potwierdzono poprzez wykazanie liniowego związku pomiędzy naprężeniami i obliczonymi osiadaniami.

Słowa kluczowe: technika TDR, osiadanie gleby

WSTĘP

Podstawowym zadaniem czynnej warstwy gleby jest zapewnienie roślinom odpowiednich warunków powietrzno-wodnych. Gleba realizuje to zadanie dzięki zdolnościom do magazynowania wody podczas opadów, jak również poprzez jej pobieranie z głębszych warstw (Pęczkowski i in. 2001). Intensywność tych procesów zależy m.in. od zagęszczenia gleby. Zbyt duże, powoduje zwiększony podsiąk, w wyniku czego następuje niekorzystne parowanie – zwłaszcza wtedy gdy gleba jest nieporośnięta. Nadmierne zagęszczenie spowodowane jest np. przejazdami maszyn rolniczych wykonujących zabiegi agrotechniczne. Wyznaczanie zasięgu i skali zmian struktury gleby poddanej obciążeniu, pomimo ciągle powstających nowych metod

*Eksperyment przeprowadzono przy udziale studentów z Koła Naukowego Meliorantów im. prof. Stanisława Baca

pomiarowych, wymaga przeprowadzenia pracochłonnych badań wykorzystujących skomplikowaną aparaturę. Badania takie przeprowadza się głównie dla potrzeb producentów opon do maszyn rolniczych w celu zminimalizowania negatywnych skutków prowadzonych prac polowych (Bykowski i in. 2001, Konstankiewicz i in. 1999, Pytka i Konstankiewicz 1998, Pytka i in 2000).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania techniki TDR (pierwotnie opracowanej do pomiaru wilgotności objętościowej) do szacowania osiadania gleby poddanej obciążeniu.

METODY

W wyniku przyłożonego pionowego obciążenia następuje osiadanie gleby. Obciążenie zewnętrzne powoduje w pierwszej kolejności zmniejszenie objętości porów. Jeżeli gleba znajduje się w stanie niepełnego nasycenia, najpierw następuje wyparcie powietrza z wolnych przestrzeni, ponieważ jest ono, w przeciwieństwie do wody, niezwiązane z fazą stałą. Jeżeli zaś gleba jest całkowicie wysycona zachodzi zjawisko konsolidacji, które polega na równoczesnym zmniejszaniu się zawartości wody i objętości porów (Wiłun 2003). W niniejszej pracy rozpatrywana jest sytuacja gdy gleba nie jest w pełni wysycona wodą. W tym przypadku idea zastosowania techniki TDR do szacowania osiadania opiera się na hipotezie, że osiadanie to, do momentu całkowitego wyparcia powietrza z wolnych przestrzeni, jest jedyną przyczyną zmiany wilgotności objętościowej. Poniżej hipoteza ta zostanie uzasadniona.

Na rysunku 1 przedstawiono przestrzeń gleby o objętości początkowej V_{cp} , w której zawarta jest faza stała, woda i powietrze. Jeżeli taka przestrzeń zostanie poddana obciążeniu to jej objętość końcowa V_{ck} ulegnie zmniejszeniu. Zmiana objętości ΔV_{cp} jest równa:

$$\Delta V_c = V_{cp} - V_{ck}, \quad (1)$$

gdzie: ΔV_c – zmiana objętości gleby (cm^3),

V_{cp} – początkowa objętość gleby (cm^3),

V_{ck} – końcowa objętość gleby (cm^3).

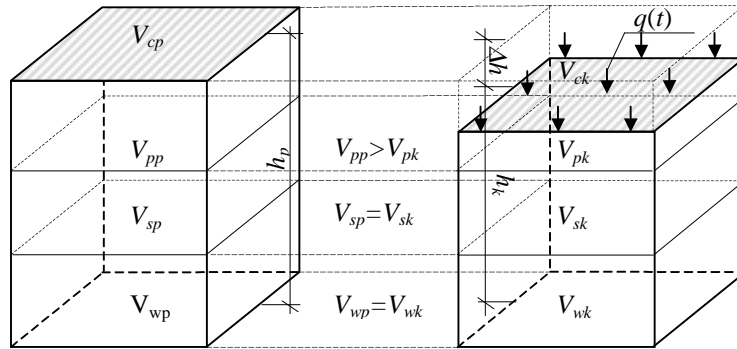
Ponieważ najpierw wypieranie jest jedynie powietrze to zgodnie z rysunkiem 1, można zapisać. Jeżeli

$$V_{cp} = V_{pp} + V_{sp} + V_{wp} \quad \text{i} \quad V_{ck} = V_{pk} + V_{sk} + V_{wk}, \quad (2)$$

$$\text{a także } V_{sp} = V_{sk}, V_{wp} = V_{wk} \quad \text{oraz} \quad V_{cp} > V_{ck}, \quad (3)$$

$$\text{to } \frac{V_{wp}}{V_{cp}} < \frac{V_{wk}}{V_{ck}}, \quad \text{czyli } \theta_p < \theta_k, \quad (4)$$

gdzie: $V_{pp}, (V_{pk})$ – początkowa, (końcowa) objętość porów (cm^3),
 $V_{sp}, (V_{sk})$ – początkowa, (końcowa) objętość szkieletu (cm^3),
 $V_{wp}, (V_{wk})$ – początkowa, (końcowa) objętość wody (cm^3),
 $\theta_p, (\theta_k)$ – początkowa, (końcowa) wilgotność objętościowa (%).



Rys. 1. Zmiana objętości przestrzeni glebowej wywołano obciążeniem, V_c – całkowita objętość rozpatrywanej przestrzeni gleby, V_p – objętość porów, V_s – objętość szkieletu, V_w – objętość wody, h – wysokość rozpatrywanej przestrzeni gleby, Δh – osiadanie, $q(t)$ – obciążenie, indeks p – chwila początkowa, indeks k – chwila końcowa

Fig. 1. Change in soil space caused by loading, V_c – total volume of soil space under analysis, V_p – volume of pores, V_s – skeleton volume, V_w – water volume, h – height of soil space under analysis, Δh – self-consolidation, $q(t)$ – load, index p – initial moment, index k – final moment

Wynika z tego, że w chwili gdy pojawia się osiadanie gleby to zmienia się jej wilgotność objętościowa pomimo, że objętość wody pozostaje stała. Zakładając że zmiana ΔV_c następuje w czasie Δt i odbywa się w warunkach braku rozszerzalności bocznej można, znając dynamikę wilgotności, obliczyć osiadanie wywołane obciążeniem:

$$\Delta h = h_p \left(1 - \frac{\theta_p}{\theta_k} \right) \cdot \Delta t^{-1}, \quad (5)$$

gdzie: Δh – osiadanie (cm),
 h_p – wysokość początkowa (cm),
 θ_p, θ_k – początkowa, (końcowa) wilgotność objętościowa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),
 Δt – krok czasowy (min).

Pionowe naprężenia normalne dla rozpatrywanych w pracy punktów leżących w osi symetrii obciążonego obszaru obliczone są wg wzoru podanego przez Boussinesqa, który w postaci ogólnej zapisuje się następująco (Wiłun 2003):

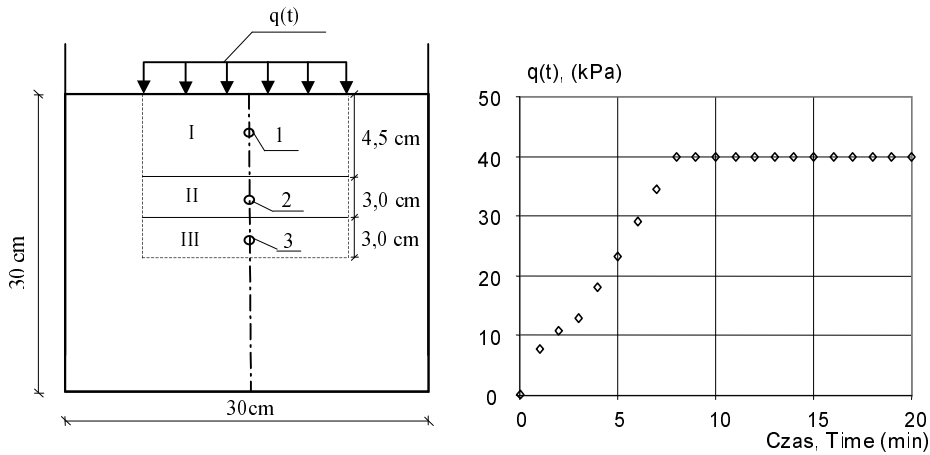
$$\sigma = \eta \cdot q, \quad (6)$$

gdzie: σ – naprężenia normalne (kPa),
 η – współczynnik do obliczania naprężeń pod obciążeniem od obszaru kołowego, odczytywany z nomogramów (–),
 q – obciążenie (kPa).

Pomiar wilgotności objętościowej gleby wykonano za pomocą aparatu TDR wykorzystującego reflektometrię domenowo-czasową, skonstruowanego w IA PAN w Lublinie (Malicki i in. 1992, Skierucha 2000).

OPIS EKSPERYMENTU

Eksperyment przeprowadzono w miejscowości Sucha Rzecznka w województwie warmińsko-mazurskim. Do badań wykorzystano materiał glebowy, którego rozkład granulometryczny części mineralnych odpowiadał piaskowi średniemu. Na rysunku 2 (z lewej strony) przedstawiono schemat modelu fizycznego. Pojemnik w kształcie walca o średnicy 30 cm wypełniono materiałem glebowym do wysokości 30 cm. Następnie w osi symetrii umieszczono 3 czujniki TDR. Umożliwiło to rejestrację wilgotności objętościowej w odstępach 1-minutowych. W chwili początkowej (t_p) do wierzchniej warstwy gleby, przyłożono zmienne w czasie, pionowe, równomiernie rozłożone obciążenie $q(t)$, przekazywane przez kołową powierzchnię o średnicy 17,5 cm. Wielkości obciążenia zmieniano od 10 do 40 kPa przez okres 8 minut. Czasową zmienność obciążenia oraz miejsce umieszczenia czujników przedstawiono na rysunku 2. W dalszej części pracy rozpatrywana będzie jedynie przestrzeń do głębokości 10,5 cm, którą podzielono umownie na 3 warstwy, tak aby czujniki wilgotności znajdowały się w ich centralnych punktach.

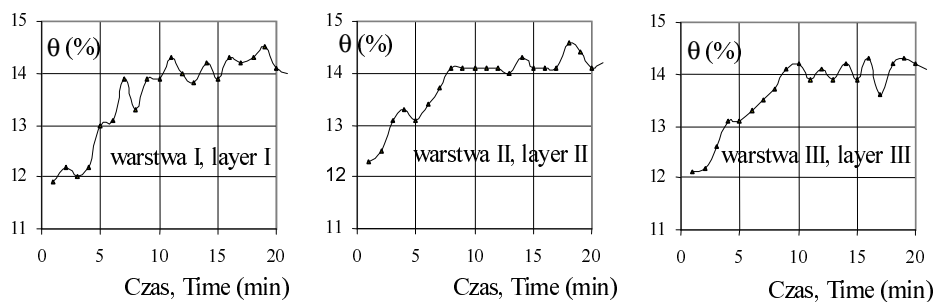


Rys. 2. Schemat eksperymentu i czasowa zmienność obciążenia $q(t)$, (I, II, III) – oznaczenie warstw, (1, 2, 3) – oznaczenie punktów pomiarowych

Fig. 2. Schematic of the experiment and load variation in time, $q(t)$, (I, II, III) – designation of layers, (1, 2, 3) – designation of measurement points

WYNIKI

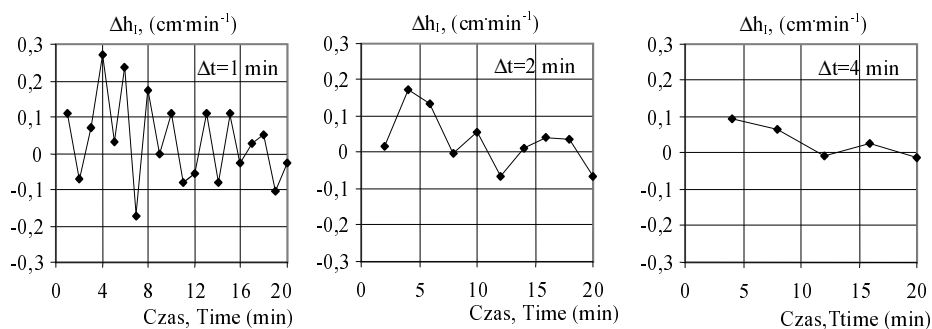
Rysunek 3 przedstawia zmiany wilgotności objętościowej w warstwach I, II, III. W czasie gdy następował wzrost obciążenia $q(t)$, tj. w ciągu pierwszych 8 minut, wartości wilgotności zmieniały się od 12 do 14%. W następnym okresie nie zaobserwowano wzrostu wilgotności. Korzystając z zależności (5) obliczono osiadania (Δh) w każdej warstwie. Obliczenia prowadzono z różnym krokiem czasowym Δt .



Rys. 3. Zmiany wilgotności objętościowej wywołane obciążeniem, θ – wilgotność (%)

Fig. 3. Changes in volumetric moisture caused by loading, θ – moisture (%)

Na rysunku 4 (z lewej strony) przedstawiono wartości obliczonego osiadania w warstwie I dla krótkiego kroku czasowego ($\Delta t = 1$ minuta). Obliczone wartości zmieniają się od $-0,2 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ do $0,3 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

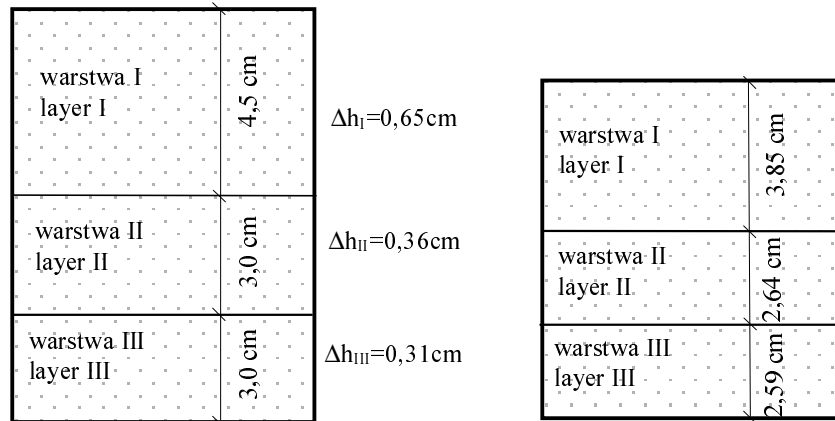


Rys. 4. Stabilność obliczeń osiadania w warstwie I dla zwiększającego się kroku czasowego, Δh_I – osiadanie warstwy I

Fig. 4. Stability of calculations of self-consolidation in soil layer I for increasing time step, Δh_I – self-consolidation in layer I

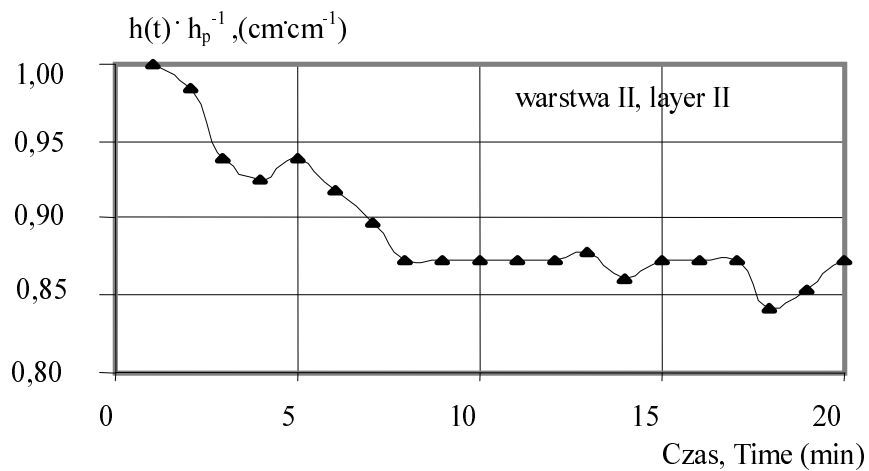
Otrzymane ujemne wartości Δh nie mają fizycznego sensu i wynikają z braku stabilności metody dla krótkich kroków czasowych (Janik 2004). Dla kroku $\Delta t = 2$ min (rys. 4 w środku) obliczone wartości osiadania nadal są zróżnicowane wartości, ale zakres zmienności jest mniejszy i wynosi od $-0,1$ do $0,2 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Gdy $\Delta t = 4$ min. (rys. 4 z prawej) to obliczone osiadania w ciągu pierwszych 8 minut przyjmują wartości równe w przybliżeniu $0,1 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Natomiast w następnym okresie gdy obciążenie jest stałe to obliczone wartości Δh są w przybliżeniu równe $0,0 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Przyjęto, że gdy $\Delta t > 4$ min zaproponowana metoda jest stabilna. Zależność (5) wykorzystano również do obliczenia osiadania od chwili początkowej do momentu, gdy obciążenie było stałe. Do obliczeń zastosowano krok czasowy $\Delta t = 8$ minut. Rysunek 5 przedstawia zmianę wysokości „umownych” warstw rozpatrywanej przestrzeni gleby obliczonych dla pierwszych 8 minut. Największe obliczone osiadanie zaobserwowano w warstwie I. Wyniosło ono $0,65 \text{ cm}$, co stanowiło $14,4\%$ wysokości początkowej. W warstwie II wyniosło $0,36 \text{ cm}$ (12%) i najmniejsze w warstwie III – $0,31 \text{ cm}$ co stanowiło $10,3\%$ wysokości początkowej.

Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność zaproponowanej metody. Wielkości osiadania maleją wraz z wzrostem głębokości, ponieważ maleją naprężenia w glebie. Na rysunku 6 przedstawiono aktualną, względną wysokość warstwy II odniesioną do stanu początkowego.



Rys. 5. Osiadanie wywołane obciążeniem h_{pi} – wysokość i -tej warstwy, $\Delta h_I, h_{II}, h_{III}$, – osiadanie warstwy I, II, III

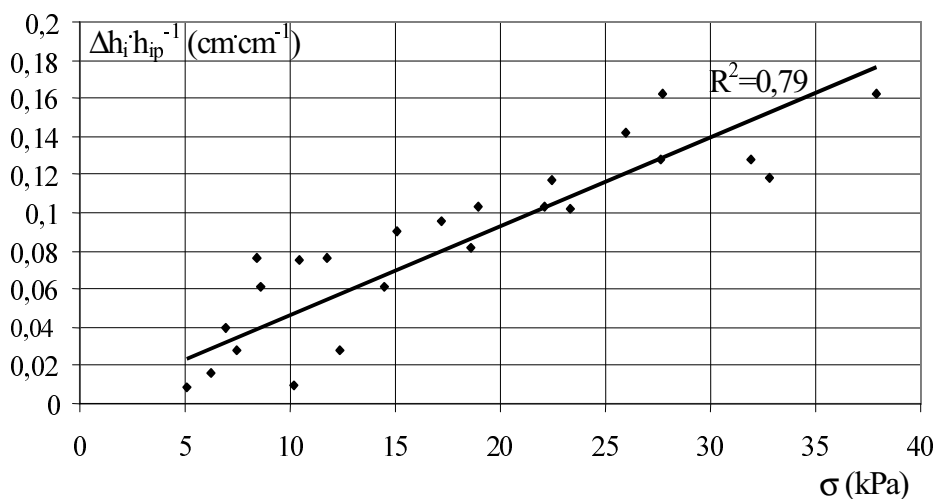
Fig. 5. Self-consolidation of soil caused by loading, h_{pi} – height of i -th layer, $\Delta h_I, h_{II}, h_{III}$, – self-consolidation in layers I, II, III



Rys. 6. Względna wysokość warstw obliczona na podstawie dynamiki wilgotności objętościowej, $h(t)$ – aktualna wysokość warstwy, h_p – początkowa wysokość warstwy

Fig. 6. Relative height of soil layers calculated on the basis of volumetric moisture dynamics, $h(t)$ – current height of layer, h_p – initial height of layer

Obliczenia wykonano wykorzystując zależność (5), przyjmując dla każdej chwili maksymalnie długi krok czasowy Δt . Przeprowadzono również bezpośredni pomiar osiadania gleby w miejscu przyłożenia powierzchni kołowej, przez którą przekazywano obciążenie. Po 8 minutach od chwili początkowej zmierzone osiadanie wyniosło 1,58 cm a suma obliczonego osiadania w warstwach I, II, i III wynosi 1,32 cm. Porównanie wartości obliczonej i zmierzonej ma charakter orientacyjny ponieważ w obliczeniach nie uwzględniono osiadania gleby, które mogło wystąpić poniżej 10,5 cm.



Rys. 7. Zależność naprężeń σ obliczonych ze wzoru (6) i osiadania obliczonego na podstawie dynamiki wilgotności objętościowej według równania (5), Δh_i – osiadanie i -tej warstwy, h_{ip} – początkowa wysokość i -tej warstwy

Fig. 7. Relation of stress σ , calculated from formula (6), and values of self-consolidation calculated on the basis of volumetric moisture dynamics according to eq (5), Δh_i – self-consolidation of i -th layer, h_{ip} – initial height of i -th layer

Zbadano również związek między naprężeniami obliczonymi z zależności (6) i odpowiednimi wartościami osiadania obliczonymi z zależności (5). Do budowy związku wykorzystano wartości obliczone w trzech warstwach, co zostało przedstawione na rysunku 6. Zależność ta ma charakter liniowy co również dowodzi poprawności zaproponowanej metody, ponieważ zgodnie z teorią odkształceń podłoża, wtedy gdy osiadanie występuje wskutek ściśliwości gleby, to powinno być liniowo zależne do naprężeń.

WNIOSKI

1. Stwierdzono przydatność techniki TDR do pomiaru wilgotności gleby poddanej obciążeniu
2. Stwierdzono, że osiadanie gleby wywołane obciążeniem powoduje wzrost wilgotności objętościowej gleby. Wynika to z faktu wypierania powietrza z gleby, a nie z przyrostu objętości wody.
3. Poprawność zaproponowanej metody szacowania osiadania poszczególnych warstw gleby wykorzystując technikę TDR potwierdzono poprzez wykazanie liniowego związku pomiędzy naprężeniami i obliczonymi osiadaniami.

PIŚMIENNICTWO

- Bykowski J., Szafrąński Cz., Fiedler M., 2001. Wpływ spulchniania na zmienność przestrzenną gęstości i uwilgotnienia gleb. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 477, 29-34.
- Janik G., 2004. Badania nad zastosowaniem reflektometrii czasowej (TDR) do oceny opadu efektywnego. Acta Agrophysica, 4(2), 335-338.
- Konstankiewicz K., Król A., Pytka J., 1999. Wykorzystanie optyki włóknistej do rejestracji przemieszczeń odkształcanego ośrodka glebowego. VIII Międzynarodowe Sympozjum nt. Zastosowanie Techniki Filmowych oraz Wideo-Komputerowych w Badaniach Naukowych w Rolnictwie, Kraków, 22-24.09.1999.
- Malicki M.A., Plagge R., Renger M., And Walczak R.T., 1992. Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. Irrigation Sci., 13, 65-72.
- Pęczkowski G., Pływaczyk A., Orzepowski W., 2001. Zmiany powietrzno-wodnych właściwości gleb w wyniku stosowania odpływu regulowanego. Woda, Środowisko, Obszary wiejskie. Wyd. IMUZ, T.1, 2, 127-136, Falenty.
- Pytka J., Konstankiewicz K., 1998. Metody wyznaczania naprężeń i przemieszczeń w glebie pod obciążeniem. Acta Agrophysica, 14.
- Pytka J., Konstankiewicz K., Król A., 2000. Zastosowanie techniki wideo do wyznaczania odkształceń i głębokości koleiny w ośrodku glebowym podczas obciążenia. Inżynieria Rolnicza, 7, 119-124.
- Skierucha W., 2000. Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique. Int. Agrophysics, 14, 4, 417-426.
- Wiłun Z., 2003. Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

METHOD FOR DETERMINATION OF SELF-CONSOLIDATION OF SOIL
SUBJECTED TO LOADING, BASED ON VOLUMETRIC MOISTURE
MEASUREMENTS*

Grzegorz Janik

Institute of Environment Protection and Management,
Wrocław University of Environmental and Life Sciences
e-mail: janik@miks.ar.wroc.pl

Abstract. The paper presents a method for the estimation of self-consolidation of soil subjected to loading, based on the TDR technique. The hypothesis was adopted that the self-consolidation, up to the moment of total displacement of air from free soil spaces, was the only cause of changes in the volumetric moisture content of the soil. The truth of such a hypothesis, the demonstration of which is required for the implementation of the method, was shown on the basis of theoretical consideration and of a field experiment. Additionally, the correctness of the method was confirmed through the demonstration of linear relationships between levels of stress and calculated rates of self-consolidation.

Key words: TDR technique, self-consolidation of soil

*The experiment was conducted with participation of students from Professor Stanisław Bac Students' Science Organization