

WPLYW TEMPERATURY NA PRZENIKALNOŚĆ DIELEKTRYCZNĄ GLEBY W ASPEKTCIE REFLEKTOMETRYCZNEGO (TDR) POMIARU JEJ WILGOTNOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ

W. Skierucha

Zakład Hydrotermofizyki Środowiska Glebowego i Materiałów Rolniczych
Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie
20-290 Lublin, ul. Doświadczalna 4
e-mail: skieruchi@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie: Rozważano wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby oraz na powiązany z nim błąd pomiaru wilgotności objętościowej gleby oznaczony metodą reflektometryczną. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na próbkach gleby piaszczystej, pylastej i ilastej oraz w warunkach polowych na nasyconej wodą glebie torfowej. Stwierdzono, że wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby, a więc również na reflektometryczny pomiar wilgotności gleby, jest zależny zarówno od wilgotności jak i uziarnienia (gatunku) gleby. To, czy wpływ temperatury powinien być uwzględniony i korygowany, zależy od wymaganej dokładności pomiarów. W ekstremalnych warunkach, tzn. dla nasyconej gleby piaszczystej, ten błąd jest na tyle duży, że powinien być uwzględniony. W oparciu o trójfazowy model gleby zaproponowano korektę wpływu temperatury na odczyt miernika TDR wilgotności objętościowej gleby.

Słowa kluczowe: reflektometria czasowa, TDR, przenikalność dielektryczna, wilgotność objętościowa gleby.

WSTĘP

Zwiększenie dokładności pomiaru wilgotności objętościowej metodą TDR wymaga uwzględnienia istotnych czynników wpływających na ten pomiar, w tym również temperatury badanego obiektu, czyli gleby. W początkowym okresie stosowania metody TDR pomijano wpływ temperatury gleby na odczyt miernika jej wilgotności objętościowej, θ . Jednakże już w 1985 r. zauważono, że pomiar θ

miernikiem TDR jest obarczony błędem wynikającym ze zmiennej temperatury gleby [2]. Zaproponowana w [5] empiryczna formuła korekcyjna zakładała jedynie temperaturową zmianę przenikalności dielektrycznej fazy ciekłej gleby. W [4] i [9] wykazano, że oprócz zmian termicznych fazy ciekłej gleby również inne czynniki, takie jak skład granulometryczny gleby czy woda związana z cząsteczkami fazy stałej, muszą wpływać na termiczny efekt pomiaru wilgotności gleby miernikiem TDR. Pierwszą próbę pełnego fizycznego opisu rozważanego efektu przedstawiono w [8] tłumacząc go zmianą proporcji między wodą molekularną i kapilarną w glebie w zależności od jej temperatury.

Temperatura, T , wpływa na przenikalność dielektryczną wody, $\varepsilon_w(T)$, lub współczynnik załamania fal elektromagnetycznych, $n_w(T) = \sqrt{\varepsilon_w(T)}$, dla częstotliwości pola elektromagnetycznego rzędu 10^9 Hz, następująco:

$$n_w(T) = n_w d(T) \quad (1)$$

gdzie n_w jest współczynnikiem załamania dla czystej wody w temperaturze 20°C , $d(T)$ jest zaś zależnym od temperatury, T , współczynnikiem empirycznym [1]:

$$[d(T)]^2 = 1 - 0,46 \cdot 10^{-2}(T - 20) + 0,11 \cdot 10^{-4}(T - 20)^2 - 0,18 \cdot 10^{-7}(T - 20)^3 \quad (2)$$

Korzystając z trójfazowego modelu gleby oraz przyjmując, że współczynnik załamania dla stałej fazy gleby oraz dla powietrza nie zależą znacząco od temperatury, współczynnik załamania fal EM dla gleby, n_T , można wyrazić jako funkcję jej temperatury następująco:

$$n_T = \theta n_w + f_a n_a + f_s n_s + \theta n_w (d(T) - 1) = n_{20} + \Delta n(T) \quad (3)$$

gdzie: n_w jest współczynnikiem załamania dla czystej wody o temperaturze 20°C , n_{20} jest współczynnikiem załamania dla gleby w temperaturze 20°C , $\Delta n(T)$ jest natomiast jego temperaturowo zależną odchyłką; f_a, f_s są to odpowiednio frakcje objętościowe fazy gazowej i stałej gleby.

Wilgotność gleby, $\theta = \theta_{20}$, we wzorze (3) ma wartość oznaczoną metodą gravimetryczną w warunkach laboratoryjnych lub oznaczoną metodą TDR w temperaturze 20°C , w warunkach kalibracji przyrządów TDR. Wartości współczynnika załamania, n_T , dla gleby znalezione w temperaturze T , można skorygować do wartości w 20°C , n_{20} , zgodnie z wyrażeniem (3), które można przedstawić w postaci:

$$n_{20} = n_T - \theta_{20} n_w (d(T) - 1) \quad (4)$$

Ponieważ dielektryczny pomiar wilgotności gleby jest oparty o formułę kalibracyjną w postaci $\theta = f(n)$, to wyniki pomiarów wilgotności gleby metodą TDR są zależne od jej temperatury:

$$\theta_T = \theta(n_T) = \theta(n_{20} + \Delta n(T)) \quad (5)$$

Dla liniowej postaci formuły kalibracyjnej spełniona jest zależność:

$$\theta_T = \theta(n_{20} + \Delta n(T)) = \theta_{20} + \frac{d\theta}{dn} \Delta n = \theta_{20} + \frac{d\theta}{dn} \theta_{20} \cdot n_w (d(T) - 1) \quad (6)$$

Po przekształceniu otrzymujemy zależność na wilgotność objętościową, θ_{20} , gleby oznaczoną metodą TDR i skorygowaną do wartości w temperaturze 20°C.

$$\theta_{20} = \frac{\theta_T}{1 + n_w (d(T) - 1) \cdot \frac{d\theta}{dn}} \quad (7)$$

Celem niniejszej pracy jest określenie podatności przenikalności dielektrycznej gleby na zmiany temperatury oraz wynikający z tego błąd pomiaru wilgotności gleby metodą reflektometryczną.

MATERIAŁ I METODY

Badano wpływ temperatury na współczynnik załamania, n , fal EM dla nasyconej wodą gleby torfowej oraz dla trzech gleb mineralnych o składzie granulometrycznym przedstawionym w Tabeli 1: piasku, pyłu i łu. Wartości współczynnika załamania badanych gleb mineralnych wyznaczano za pomocą laboratoryjnego miernika TDR [3], natomiast w przypadku gleby torfowej zastosowano przyrząd polowy, którego odczyt θ przeliczany był na wartości n na podstawie stosowanej formuły kalibracyjnej $\theta = f(n)$ [3]. Pomiary polowe przeprowadzono wiosną, na nie uprawianej glebie torfowej nasyconej wodą. Sondy TDR zainstalowano poniżej poziomu wody gruntowej (22 – 36 cm), na głębokości 60 cm. W okresie objętym obserwacją temperatura gleby na tej głębokości wzrosła prawie dwukrotnie, od 6,3°C do 11,7°C, przy utrzymującym się jej nasyceniu (zwierciadło wody gruntowej nie opadło poniżej 60 cm). Można zatem przyjąć, że zaob-

serwowane w tym czasie zmiany prędkości propagacji, a więc i współczynnika załamania, n , impulsu EM w glebie były spowodowane wyłącznie zmianami jej temperatury.

Do pomiarów laboratoryjnych stosowano czujnik z prętów o średnicy 0,8 mm, długości 53 mm i rozstawieniu 5 mm. Próbki były umieszczane w pojemnikach z PCW o średnicy 10 cm i o wysokości 5 cm. Temperatura próbek była mierzona termoparami. W każdej z próbek, w połowie jej wysokości, zainstalowano poziomo (przez ściankę pojemnika) sondę TDR. Na tej samej wysokości zainstalowana była termopara. Pojemnik był uszczelniany, aby zapobiec wysychaniu próbki w czasie pomiaru (ok. 3 godziny). Tak „uzbrojoną” próbkę umieszczano w kuchence mikrofalowej w celu jej równomiernego ogrzania, a następnie mierzono prędkość propagacji impulsu EM w tej próbce.

Tabela 1. Wybrane parametry fizyczne badanych gleb

Table 1. Selected physical parameters of the soils under test

L.p.	Lokalizacja	Typ gleby (FAO)	Głębokość [cm]	ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	ρ_s [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	CEC	C [%]
1	Wytyczno (piasek)	Gleyic Podzol	30-40	1,53±1,64	2,61	1,4	0,40
2	Tarnawatka (pył)	Eutric Regosol	20-30	1,30±1,62	2,70	11,8	0,10
3	Kępa (il)	Eutric Fluvisol	15-25	1,08±1,40	2,66	24,0	1,20
4	Rhinluch Niemcy	Eutric Histosol	20-30	0,12	1,40	-	51,40

WYNIKI I DYSKUSJA

W celu weryfikacji aparatury pomiarowej oraz formuł korekcyjnych (4) i (7), badaniami objęto również czystą wodę, ponieważ zależność $n(T)$ dla wody jest dobrze zbadana (CRC, 1979).

Do pomiarów n_T w czystej wodzie wykorzystano formułę kalibracji instalowaną w miernikach TDR Easy Test ([7] i [3]) w postaci:

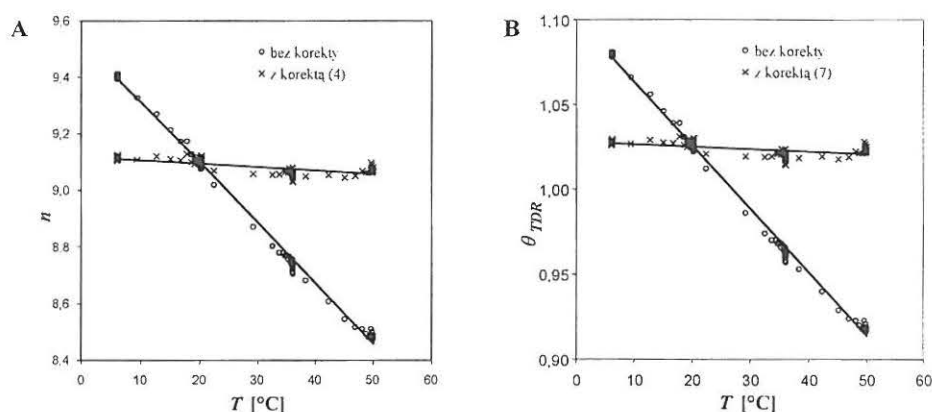
$$\theta = 0,175 \cdot n - 0,57 \quad (8)$$

Przyjmując $\theta = \theta_T$ oraz $n = n_T$ otrzymujemy:

$$n_T = 3,25 + 5,7 \cdot \theta_T \quad (9)$$

gdzie θ_T i n_T to odpowiednio: zależny od temperatury wynik pomiaru wilgotności metodą TDR oraz zależny od temperatury współczynnik załamania.

Warunkami, które metoda pomiaru wilgotności powinna spełniać w zastosowaniu do wody, są: $dn/dT \approx \Delta n/\Delta T = 0$ oraz $n(20^\circ \text{C}) = 8,95 \pm E_n$ gdzie E_n wyraża błąd bezwzględny pomiaru n . Wyniki zastosowania formuł korekcyjnych ilustrują Rys. 1 oraz Tabela 2. Widać, że korekty zgodnie z (4) oraz (7) przybliżają spełnienie wyżej diskutowanych warunków.



Rys. 1. Wpływ temperatury na wynik reflektometrycznego pomiaru współczynnika załamania, n , oraz oznaczonej metodą reflektometryczną wilgotności, θ , dla wody.

Fig. 1. The influence of temperature on the result of the water refractive index, n , and the corresponding value of moisture, θ , determined by the reflectometric method.

Poniżej przedstawione są jednostkowe zmiany $\Delta n/\Delta T$ oraz zmiany Δn w pełnym zakresie zmiany temperatury wody, $6 \div 50^\circ \text{C}$.

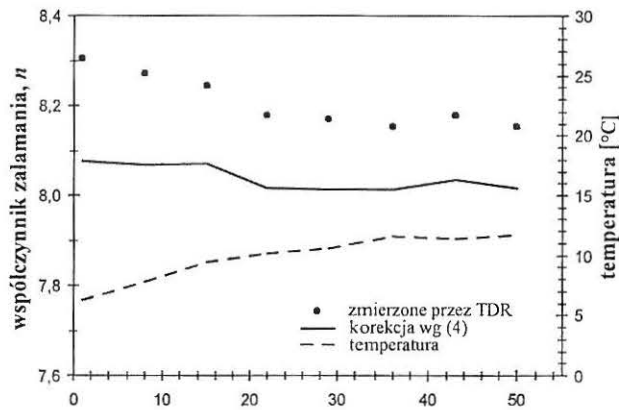
Tabela 2. Błąd niekorygowanego i korygowanego temperaturowo pomiaru współczynnika załamania, n , dla wody oraz jej wilgotności, θ_{TDR}

Table 2. The measurement error for not corrected and temperature corrected values of the water refractive index, n , and the its moisture, θ_{TDR} .

Pomiar	$\Delta n/\Delta T$	Δn dla		$\Delta \theta$ dla	
		$6 \leq T \leq 50^\circ \text{C}$	$\Delta \theta/\Delta T$	$6 \leq T \leq 50^\circ \text{C}$	
Bez korekty	-0,0213	-0,9798	-0,0037	-0,9798	
po korekcie wg autora na n zgodnie z (3)	-0,0012	0,0414	-0,0001	0,0414	

Rys. 1 przedstawia, że dla wody korekty wg (4) i (7) wpływu temperatury na współczynnik załamania oraz wilgotność objętościową gleby oznaczone metodą TDR dawały zadowalające rezultaty.

Rys. 2 przedstawia zmianę w czasie współczynnika załamania, n , dla torfu, którego wilgotność w warunkach polowych utrzymywała się na poziomie nasycenia równym $\theta=0,87$, podczas gdy temperatura, T , wahała się od 6 do 12 °C. Wiadac, że wahania temperatury powodowały zmiany współczynnika załamania z wartości $n(6\text{ °C})=8,30$ do $n(12\text{ °C})=8,14$. Korekta wg (4) wyraźnie zmniejszyła wpływ temperatury na współczynnik załamania z $n(6\text{ °C})=8,06$ do $n(12\text{ °C})=8,02$.



Rys. 2. Wpływ temperatury na współczynnik załamania, n , dla torfu oraz wyniki odpowiednich korekt.

Fig. 2. The influence of temperature on the refractive index, n , for the peat soil and the results of the appropriate corrections.

Tabela 3 zawiera współczynniki regresji dla zależności $n(T)$, dla gleb mineralnych, która jest zilustrowana na Rys. 3. Odzwierciedlają one podatność współczynnika załamania na temperaturę, dn/dT . Podatność ta zawiera się, dla dyskusowanego tu przypadku, w granicach:

$$-0,0105 < \frac{dn}{dT} < 0,0008 \text{ deg}^{-1} \quad (10)$$

zależnie od wilgotności i gatunku gleby.

Tabela 3. Współczynniki regresji dla zależności $n(T) = a_0 + a_1 T$, dla gleb mineralnych (Rys. 3)
 Table 3. The regression coefficients for the relation $n(T) = a_0 + a_1 T$, presented in Fig. 3.

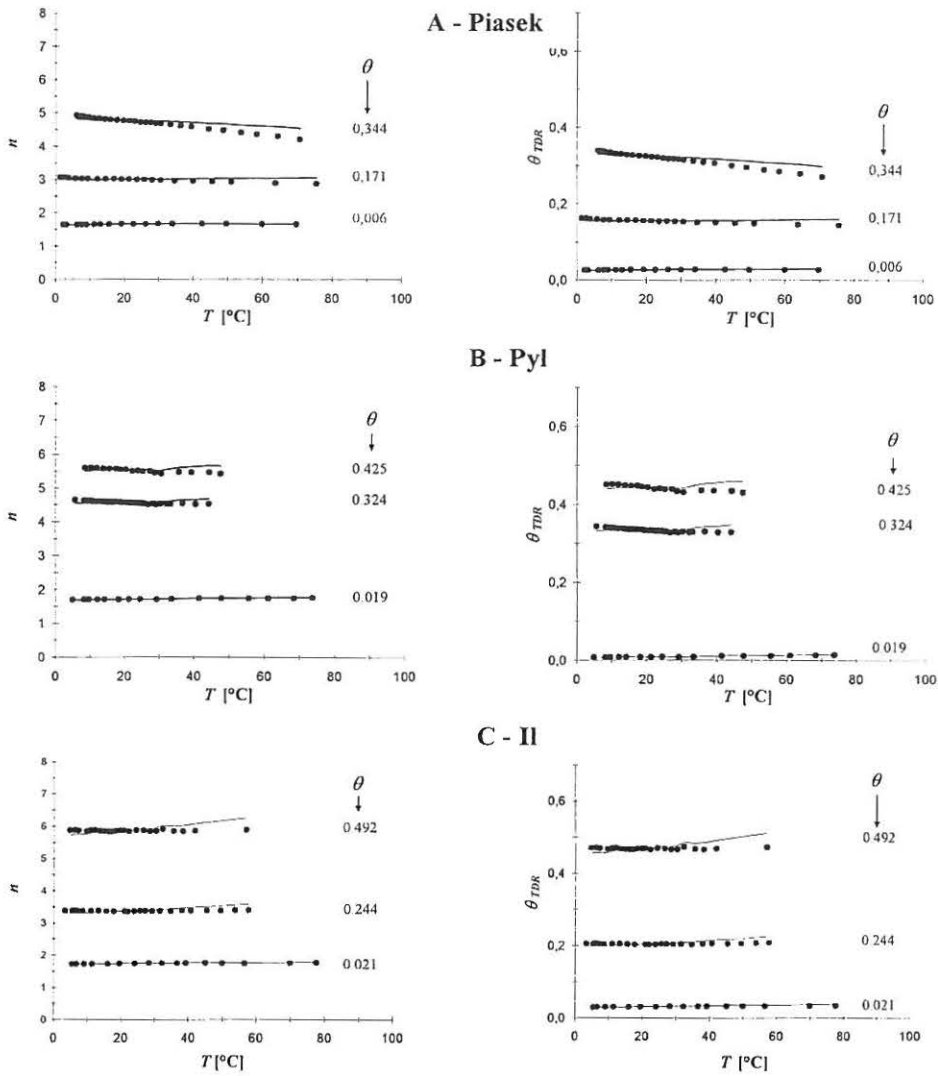
	θ	a_1		a_0	
		bez korekty $\times 10^{-5}$	Korekta wg (4) $\times 10^5$	bez korekty	Korekta wg (4)
piasek	0,006	30	40	1,65	1,65
	0,171	-250	90	3,06	2,99
	0,344	-1050	-370	4,98	4,84
pył	0,019	80	120	1,70	1,69
	0,324	-370	280	4,52	4,65
	0,425	-490	360	5,47	5,64
il	0,021	50	90	1,72	1,71
	0,244	30	520	3,26	3,36
	0,492	4	990	5,66	5,86

Rys. 3 przedstawia wyniki badań dla trzech wspomnianych gleb mineralnych, przy trzech różnych wilgotnościach dla każdej z nich. Widać, że temperatura wpływa wyraźnie na współczynnik załamania, n , przy czym wpływ ten zwiększa się z wilgotnością gleby.

Podatność współczynnika załamania, n , dla gleby na temperaturę powoduje błąd reflektometrycznego pomiaru wilgotności gleby, θ_{TDR} . Uwzględniając charakterystykę kalibracji miernika TDR postaci: $n = 1,491 + 7,675 \theta$ [9], zależność: $d\theta/dT = (d\theta/dn)(dn/dT)$ oraz zależność (10), można wyznaczyć zakres błędu odczytu wilgotności gleby oznaczony miernikiem TDR $d\theta/dT$:

$$-0,0014 < \frac{d\theta}{dT} < 0,0001 \text{ deg}^{-1} \quad (11)$$

Zatem w ekstremalnych przypadkach, np. dla nasyconej gleby piaszczystej, przy wzroście temperatury gleby $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ odczyt wilgotności gleby z miernika TDR, θ , może być zaniżony w stosunku do wartości oznaczonej metodą termogravimetryczną o $\Delta\theta = 0,0014 \cdot 50 \cdot 100\% = 7\%$.



Rys. 3. Wpływ temperatury na współczynnik załamania, n , i oznaczoną metodą TDR wilgotność objętościową gleby, θ_{TDR} , dla trzech gleb mineralnych: **A** - piasku, **B** - pylu i **C** - iltu oraz efekty jego kompensacji z zastosowaniem korekty (4). Po prawej stronie rysunków pokazano odnośne wilgotności, θ , wyznaczone termogravimetrycznie. • - wartości zmierzone przyrządem TDR, linia ciągła - korekta n i θ według formuły (4) i (7)

Fig. 3. The influence of temperature on the refractive index, n , and moisture, θ_{TDR} , for three mineral soils: **A** – sand, **B** – silt and **C** – clay, and the results of compensations using eq. (4). On the right side of the figures there are values of appropriate soil moistures, θ , determined by thermogravimetric method. • - TDR measured values, line – the correction according to eq. (4).

PODSUMOWANIE

Wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby, a więc również na reflektometryczny pomiar wilgotności gleby, jest zależny zarówno od wilgotności, jak i uziarnienia (gatunku) gleby. To, czy wpływ temperatury powinien być uwzględniony albo może być pominięty, zależy od wymaganej dokładności pomiarów. W ekstremalnych warunkach, tzn. dla nasyconej gleby piaszczystej, ten błąd jest na tyle duży, że powinien być uwzględniony. Dostępne są przyrządy pomiarowe, które dokonują jednoczesnych pomiarów temperatury i wilgotności gleby metodą TDR, mierząc te wielkości fizyczne dla tej samej objętości gleby [3]. Wtedy zastosowanie proponowanej korekty odczytu wilgotności gleby z miernika TDR jest więc nie tylko bardzo łatwe do realizacji, ale również celowe.

Współczynnik załamania, n , dla gleby ilastej nie wykazywał podatności na zmiany temperatury, jak miało to miejsce dla pozostałych gleb. Nieczytelny wpływ temperatury na współczynnik załamania, n , dla gleby ilastej można wytłumaczyć uwalnianiem, ze wzrostem temperatury, wody molekularnej (związanej przez cząsteczki ilaste), której przenikalność dielektryczna jest około 20 razy mniejsza od dielektrycznej przenikalności kapilarnej wody swobodnej i ma wartość porównywalną z przenikalnością dielektryczną lodu, tzn. około 3,2. Zatem mogą tu występować przeciwbieżne, wzajemnie się kompensujące skutki wpływu temperatury na wartość współczynnika załamania fal EM dla gleby: (i) współczynnik załamania dla wilgotnej gleby maleje ze wzrostem temperatury, bo maleje współczynnik załamania dla obecnej w glebie swobodnej wody kapilarnej, (ii) współczynnik załamania dla wilgotnej gleby rośnie ze wzrostem temperatury, bo przybywa w niej swobodnej wody kapilarnej, przy jednoczesnym ubytku związanej wody molekularnej.

LITERATURA

1. **CRC handbook of chemistry and physics** (ed. R.C. Weast). CRC Press Inc. Boca Raton. Florida. USA. 1979
2. **Davis J. L. i W. J. Chudobiak**: In situ meter for measuring relative permittivity of soils, Geol. Surv. Can., Paper 75-1, Part A, 1985.
3. **Easy Test**. Soil water status monitoring devices. (ulotka). 1994.
4. **Halbertsma J., E. Van den Elsen, H. Bohl, W. Skierucha**: Temperature effects in soil water content determined with time domain reflectometry. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, No. 436: 65-74, Warszawa, 1996.

5. **Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clerck, and S. Dautrebanede:** A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J. Hydrol.* 88:319-328. 1986.
6. **Malicki M.A.:** Wpływ fizycznych właściwości gleby na elektryczne parametry układu elektrody|gleba w aspekcie pomiaru jej wilgotności i zasolenia. Rozprawa habilitacyjna, *Acta Agrophysica*, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie, Lublin. 1993.
7. **Malicki, M. A. i W. M. Skierucha.** A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science.* 10:153-163. 1989.
8. **Or D. and J.M. Wraith:** Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Res. Res.* 35: 371-383. 1999
9. **Pepin S., N.J. Livingston, and W.R. Hook:** Temperature-dependence errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 38-43, 1995
10. **Skierucha W.:** Zależność propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie od jej wybranych właściwości. Rozprawa doktorska. Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie. Lublin 1996.

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SOIL DIELECTRIC PERMITTIVITY AND THE TDR DETERMINED SOIL MOISTURE

Department of Hydrothermophysics of Soil and Agricultural Materials
Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences in Lublin, Poland

Summary. The article discusses the influence of temperature on the soil dielectric constant and on the error of soil moisture determined by reflectometric (TDR) method. The measurements were performed in laboratory conditions on the samples of sand, silt and clay soils, as well as in field conditions on saturated pit soil. It was found that the temperature influences the soil dielectric constant and consequently the soil moisture values determined by reflectometric method. This influence depends on soil moisture and type. The correction of soil moisture readout from the TDR meter may significantly decrease the error of soil moisture determination. In extremal conditions, i.e. for saturated sand soil this error reaching 7% must be corrected.

The temperature correction formulae of TDR determined soil moisture and the effect of its application were presented.

Keywords: time domain reflectometry, TDR, dielectric permittivity, soil moisture