



**SKŁADOWE BILANSU WODNEGO W PIONOWYM PROFILU  
DLA SZEŚĆDZIESIĘCIOLETNIEGO DRZEWOSTANU  
SOSNOWEGO W NADLEŚNICTWIE TUCZNO**

*Marek Urbaniak, Janusz Olejnik, Antoni T. Miler,  
Anna Krysztofiak-Kaniewska, Klaudia Ziemblińska*  
*Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu*

**COMPONENT OF WATER BALANCE IN VERTICAL PROFILE  
FOR SIXTY-YEAR-OLD PINE STAND AT THE TUCZNO  
FOREST INSPECTORATE**

*Streszczenie*

W niniejszej pracy przedstawiono zakres badań hydrologicznych oraz ich wyniki uzyskane w roku 2013 na stacji monitoringowej w Nadleśnictwie Tuczo. Powierzchnia poddana analizom położona jest w północno-zachodniej części Polski na terenie województwa zachodniopomorskiego. Bezpośrednio zmierzono trzy z czterech składowych bilansu wodnego w profilu pionowym: opad atmosferyczny (P), ewapotranspirację (E) oraz zmianę retencji (wilgotność gleby) ( $\Delta R$ ). Odpływ (H) natomiast obliczono ze wzoru:  $H = P - E - \Delta R$ . Do pomiarów ww. parametrów wykorzystano aparaturę pomiarową składającą się z: – deszczomierzy korytkowych TPG-124-H24 – A-STER i WXT520 – Vaisala (opad atmosferyczny); – system kowariancji wirów (anemometr CSAT3 Campbell Sci. i analizator gazowy LI-7500 – Licor) – pomiar ewapotranspiracji; – reflektometri Campbell Sci. – CS616 (metoda TDR – wilgotność gleby). Obliczone na podstawie zmian wilgotności gleby zmiany retencji dla przedziałów 30 minutowych wykazują synchroniczne fluktuacje do odpowiednich sum opadów atmosferycznych. Amplitudy zmienności wilgotności gleb są odwrotnie proporcjonalne do

głębokości p.p.t. (poniżej poziomu terenu). Obliczona średnia wartość odpływu jednostkowego oscyluje w normowym zakresie dla tego regionu.

**Słowa kluczowe:** bilans wodny, zmienność wilgotności gleb, stacja monitoringowa Tuczno

### *Summary*

*In this paper the scope of hydrological investigations and the results obtained in year 2013 on monitoring station at the Tuczno forest inspectorate was presented. The analyzed area is located in the north-west part of Poland in Pomerania province. Three of four components of water balance were directly measured in vertical profile : precipitation (P), evapotranspiration (E) and changes of water retention (soil moisture) ( $\Delta R$ ). The outflow (H) was computed by use of following equation:  $H = P - E - \Delta R$ . In order to measure above mentioned parameters we have used set of instruments consisted of: tipping bucket rain-gauges A-STER and WXT510 meteorological station (precipitation); – eddy covariance system (anemometer CSAT 3 and Li-7500 IR gas analyzer) – evapotranspiration; – and few reflectometers CS616 (TDR method – soil moisture). Changes of water retention in 30 minute periods, calculated on the basis of soil moisture fluctuations indicate that they show synchronous fluctuations in the respective sums of precipitation. The amplitudes of soil moisture fluctuations are inversely proportional to depth the u.s.a. Computed average value of specific outflow oscillate between normative values for this region.*

**Key words:** water balance, variability of soil moisture, monitoring-gauging station Tuczno

## WPROWADZENIE

Powszechnie znany z podręczników bilans wodny (Pencka-Oppokowa) (np. Miler 2013) zlewniowy/profilowy jest formalnie bardzo prostym wyrażeniem. Niemniej niezależne pomierzenie wszystkich jego składników bywa trudnym, a niekiedy niewykonalnym zadaniem. Przykładowo, szczególnie trudne są pomiary zmian retencji w glebach/gruntach w strefie aeracji. Bilanse wodne można obliczać jedynie w układach zamkniętych, zatem standardowo obliczenia wykonuje się dla zlewni rzecznych. Takie obliczenia są jednakże mało przydatne dla określania stosunków wodnych w konkretnym ekosystemie np. siedlisku leśnym. W takim przypadku oszacowanie wielkości składników bilansu wodnego należy przeprowadzić dla fragmentu zlewni, którego często trudno wydzielić. Podejście to ogranicza możliwości techniczne niezależnych pomiarów odpływu

(H) co sprawia, że w takiej sytuacji jego wielkość daje się jedynie obliczyć. Wymaga to jednak niezależnych pomiarów pozostałych składników bilansu wodnego: opadu (P), ewapotranspiracji (E) i zmian retencji (wilgotności gleby) ( $\Delta R$ ). Obecnie dostępne są techniki umożliwiające oszacowanie wymienionych powyżej składników bilansu w niemal dowolnej skali czasowej i przestrzennej. W niniejszej pracy bliżej zaprezentowano metody pomiaru ewapotranspiracji (E) i zmian retencji ( $\Delta R$ ). Metoda pomiaru opadu (P) za pomocą deszczomierza korytkowego jest powszechnie znana i stosowana od lat (Chang 2005).

Wielkość ewapotranspiracji oszacowano na podstawie pomiarów metodą kowariancji wirów, która w ostatnich latach stała się standardowym narzędziem do pomiarów strumieni masy i energii wymienianych pomiędzy różnymi powierzchniami a atmosferą (np. Baldocchi 2003, Aurela 2005, Kowalska 2013).

Metody dielektryczne, w szczególności TDR (Time Domain Reflectometry), znajduje ze względu na łatwość automatyzacji pomiarów, coraz większe zastosowanie przy pomiarach wilgotności gleb i gruntów (Biniak 2004, Evett 2003, Jones i in. 2002, Leciejewski 2009, Krzysztofiak-Kaniewska, Miler 2013, Skierucha i in. 2012).

Celem tej pracy jest przedstawienie krótkookresowych zmienności składowych bilansu wodnego w pionowym profilu bilansowym dla badanej powierzchni.

## **METODYKA BADAŃ**

W centrum obiektu badawczego wybudowana została wieża pomiarowa o wysokości 34 m ( $53^{\circ}11'33,65''N$ ;  $16^{\circ}5'50,15''E$ ). Na jej szczycie zainstalowany został czterometrowy maszt, na którym umieszczono system kowariancji wirów (EC), dokonujący pomiarów wielkość parowania. Wartość strumieni stanowią uśrednione wielkości wysokoczęstotliwościowych pomiarów dla każdej półgodziny. Braki w serii pomiarowej powstałe z uwagi na ograniczenia metody kowariancji wirów (EC), wypełniono przy pomocy równania Penmana-Monteitha (P-M), przy czym należy tu zaznaczyć, że parametry takie jak przewodność i opór aerodynamiczny, występujące w tym równaniu, zostały obliczone na podstawie pomiarów EC z okresu najbliższego miejsca, gdzie brakuje danych, poprzez odwrócenie równania P-M.

Dodatkowo mierzone były takie wielkości jak: temperatura i wilgotność powietrza (Vaisala WXT520), bilans promieniowania (Hukseflux NR01) czy strumień ciepła glebowego (Hukseflux HFP01).

Dane pomiarowe rejestrowane przechowywane były na rejestratorach Campbell Sci. CR5000 i CR1000, a następnie za pomocą łącza internetowego przekazywane do serwera znajdującego się w Katedrze Meteorologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu (Olejnik i in. 2011). Rozmieszczenie urządzeń

pomiarowych na obiekcie badawczym, w zakresie badań hydrologicznych, schematycznie zaprezentowano na rysunku 1.



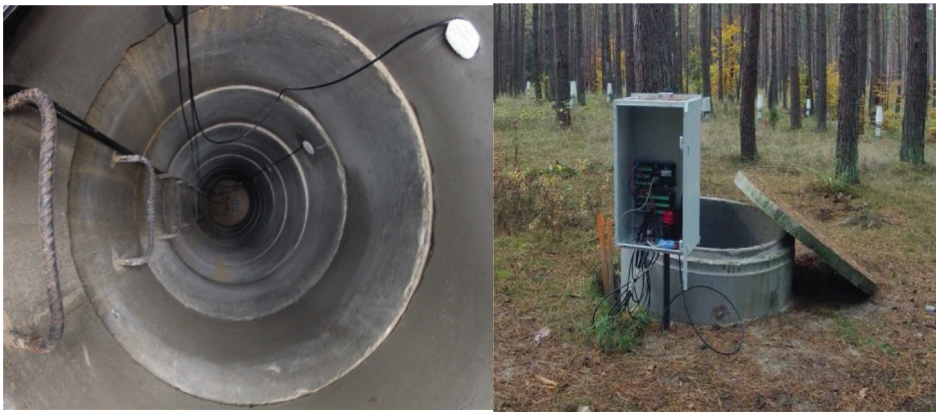
**Rysunek 1.** Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych w zakresie badań hydrologicznych  
**Figure 1.** Location of measuring instruments related of hydrological investigations

Opad atmosferyczny sumowany był w przedziałach 30 minutowych dla wszystkich 15 deszczomierzy. Dwa z nich (jeden korytkowy A-STER oraz drugi wchodzący w skład stacji meteorologicznej Vaisala) zainstalowane były na wierzchołku przedmiotowej wieży. Pozostałe 13 (korytkowych A-STER) rozmieszczono na planie krzyża w dnie lasu (N-S, E-W), umożliwiając pomiar na standardowej wysokości 1 m.

Podstawowym zadaniem pomiarów realizowanych w Tucznie jest rejestracja wymiany dwutlenku węgla pomiędzy ekosystemem leśnym a atmosferą przy zastosowaniu aparatury, której działanie oparte jest na metodzie kowariancji

wirów. Aparatura ta umożliwia także m.in. pomiar strumienia pary wodnej (ewapotranspiracji) w przedziałach 30 minutowych (Olejnik i in. 2011, Olejnik i in. 2013).

Pomiary wilgotności w glebie/gruncie wykonywane są z zastosowaniem reflektometrii czasowo-domenowej TDR przy użyciu sond Campbell Sci. CS616. Pomiary wykonywane są w dwóch studniach betonowych oraz na dwóch odkrywkach glebowych. Pomiary w studni przy wieży pomiarowej (studnia nr 1) wykonuje się przy użyciu 7 reflektometrów CS616 (czujników) zamontowanych w glebie poprzez wycięte otwory w ścianach kręgów (rys. 2). Pomiar wykonywany był co minutę, rejestrowano natomiast średnie dziesięciominutowe. Analogicznie oprzyrządowana była studnia nr 2 (5 czujników) oraz dwie wspomniane odkrywki (po 5 czujników) (rys. 3).

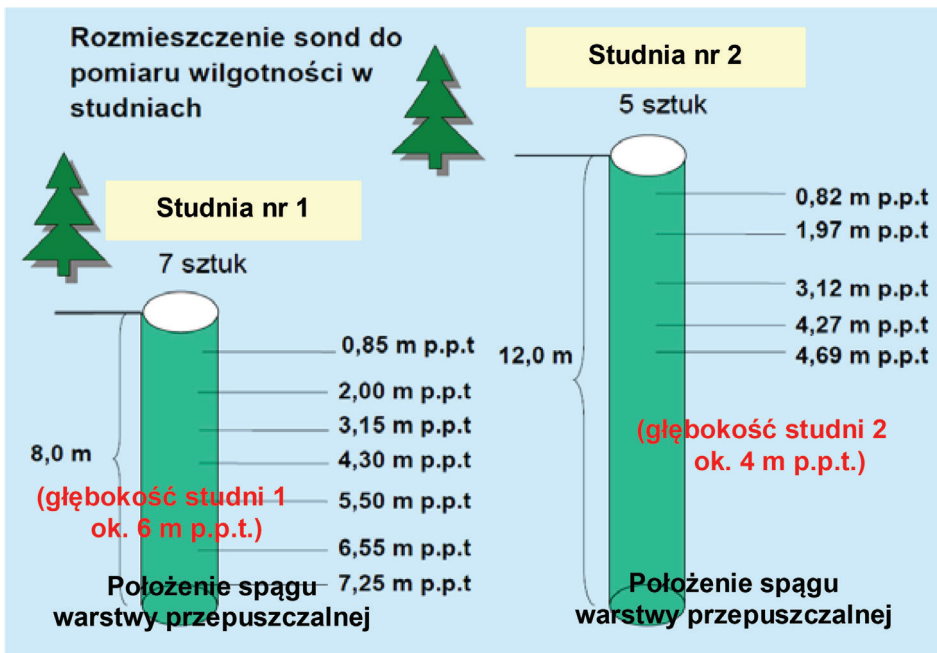


**Rysunek 2.** Rozmieszczenie reflektometrów CS616 w studni kopanej nr 1 oraz widok skrzynki rozdzielczej

**Figure 2.** Location of reflectometers CS616 in dug well No. 1 and a view on control case

Nieprzerwany ciąg pomiarów wilgotności gleby/gruntu umożliwia łatwe obliczanie (na podstawie różnic wilgotności) zmian retencji wodnej w strefie aeracji, na danym poziomie, a w konsekwencji w całym pionowym profilu.

Odływ całkowity stanowi sumę: odpływu gruntowego, odpływu podpowierzchniowego i odpływu powierzchniowego. Przy stosunkowo małych spadkach terenu wokół wieży pomiarowej odpływ powierzchniowy (spływ powierzchniowy) można przyjąć praktycznie za zerowy. Przepływ poziomy w stosunku do przepływu pionowego w strefie aeracji jest zwykle dziesięciokrotnie mniejszy.

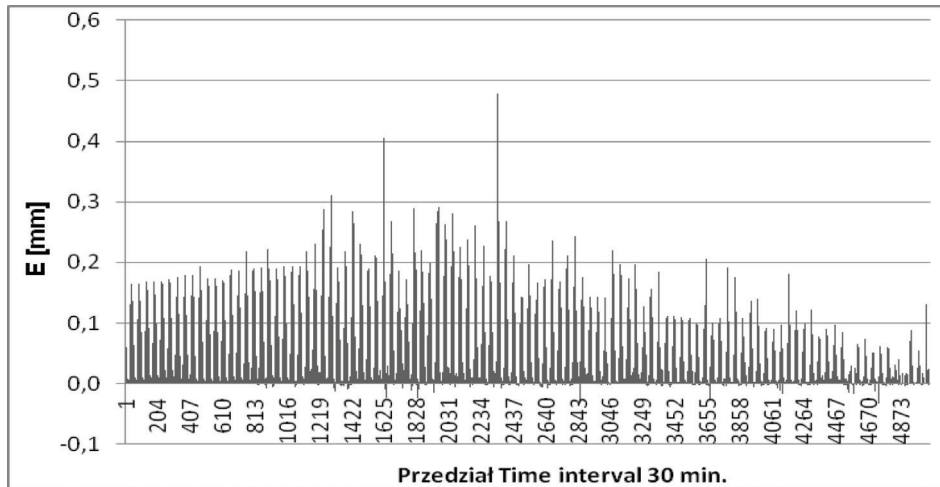
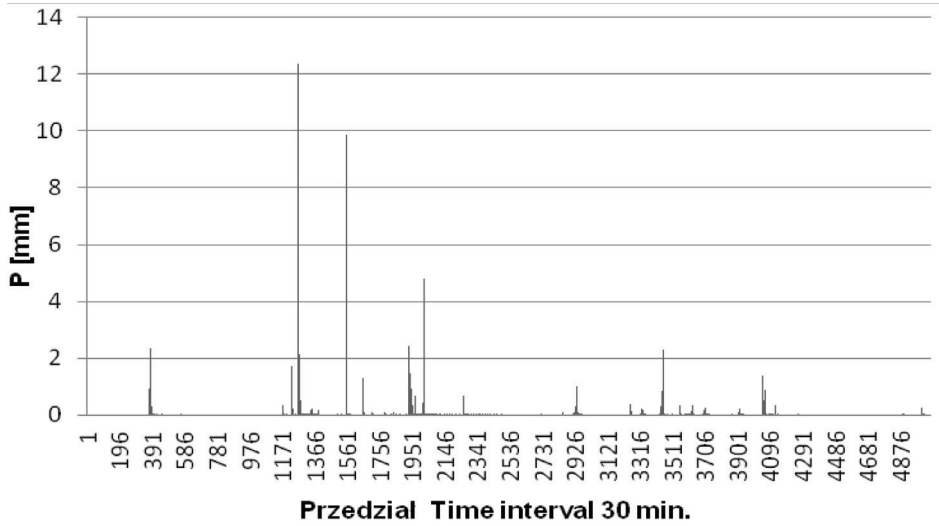


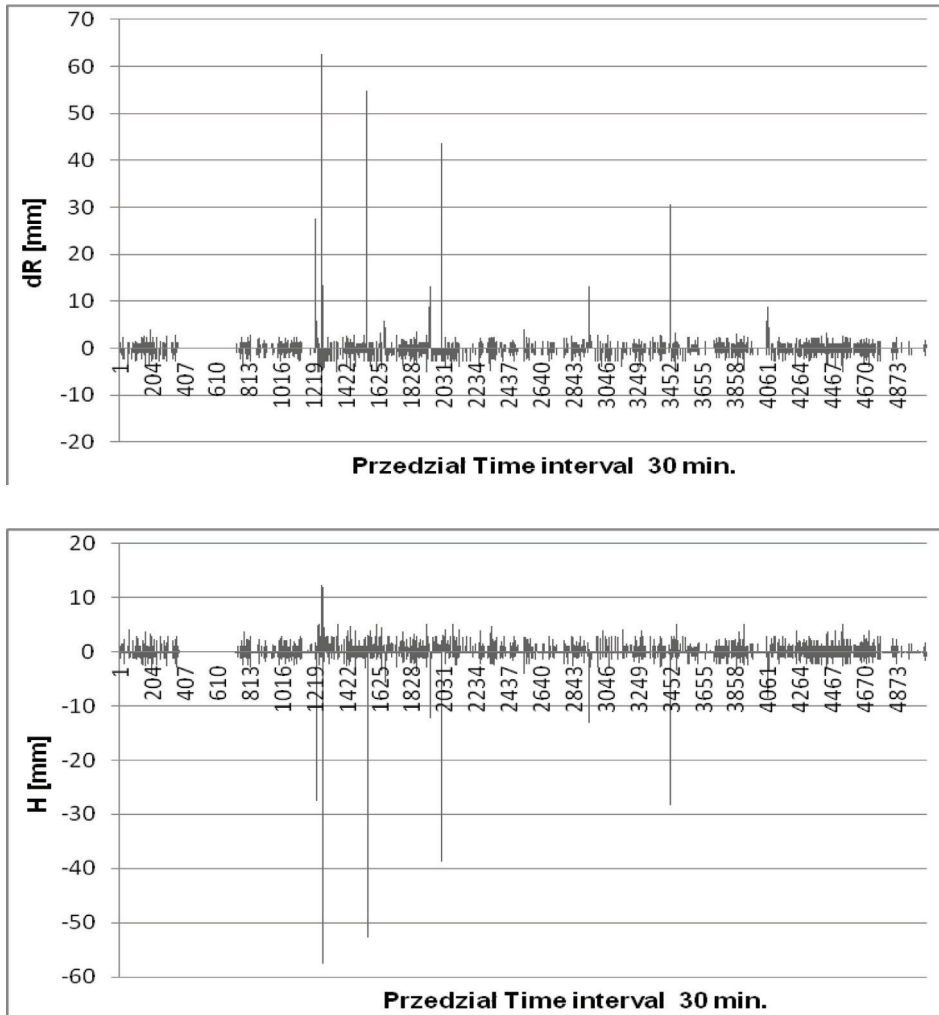
Rysunek 3. Rozmieszczenie sond do pomiaru wilgotności w studniach nr 1 i 2  
Figure 3. Location of moisture measurement probes in wells No. 1 and 2



Rysunek 4. Studnia wiercona oraz sonda typu Mini-Diver  
Figure 4. Bored well and Mini-Diver type probe

Z powyższych względów odpływ całkowity na badanym obiekcie można zatem w przybliżeniu identyfikować z odpływem gruntowym (odpływem w strefie saturacji). W celu obliczenia tego odpływu, z wykorzystaniem równania Dupuita, zainstalowano w transekcie spływowym 3 studnie wiercone (A, B, C) sięgające do spągu warstwy przepuszczalnej. W każdym z odwiertów umieszczono po dwie sondy Mini-Diver Schlumberger Water Services (na dnie czujnik do pomiaru ciśnienia słupa wody i przy otworze wlotowym czujnik korekcyjny do pomiaru ciśnienia atmosferycznego) (rys. 4).





**Rysunek 5.** Przebiegi czasowe składowych bilansu wodnego: P – opad atmosferyczny, E – ewapotranspiracja, dR – zmiana retencji, H – wskaźnik odpływu  
**Figure 5.** Time series of water balance components: P – precipitation, E – evapotranspiration, dR – change of water retention, H – outflow index

## OPIS OBIEKTU BADAŃ

Przedmiotowa powierzchnia badawcza Katedry Meteorologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, znajduje się w północno-zachodniej części



Polski w Nadleśnictwie Tuczo na terenie Leśnictwie Martew. Teren położony jest w otulinie Drawieńskiego Parku Narodowego. Dawniej obszar ten był użytkowany rolniczo, a obecnie po zalesieniu występuje tu sześćdziesięcioletni drzewostan sosnowy rosnący na siedlisku boru mieszanego. Udział sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w składzie gatunkowym tego drzewostanu wynosi aż 99%. Pozostały 1% to domieszka brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.). Podszyt stanowią przede wszystkim buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.) oraz grab zwyczajny (*Carpinus betulus* L.) (Chojnicki i in. 2009). Typ gleby rozpoznano jako gleba rdzawa typowa, a miejscami gleba rdzawa gruntowo-glejowa, położona na piasku gliniastym.

## WYNIKI

Podobnie jak w roku 2012 również w 2013 nie odnotowano występowania lustra wody gruntowej nad spągiem warstwy przepuszczalnej w studniach A, B i C. Można zatem stwierdzić, że odpływu gruntowego w strefie saturacji w badanym okresie, analizowanym w niniejszej pracy, tj. od g. 16.30 03.07.2013 r. do g. 01.30 17.10.2013 r. nie odnotowano.

W profilowym bilansie wodnym wskaźnik sumarycznego odpływu  $H$  obliczano z powszechnie stosowanego wzoru Pencka-Oppokowa (Chang 2005, Miler 2013):  $H = P - E - \Delta R$ , gdzie:  $P$  – opad mierzony (pomiarzy z deszczomierzy),  $E$  – ewapotranspiracja (pomiarzy z EC),  $\Delta R$  – zmiana retencji obliczana na podstawie zmian uwilgotnienia (mierzonych metodą TDR). Bilanse wykonywano dla przedziałów 30 minutowych, ze względu na identyczną częstotliwość pomiarów opadu i parowania (co 30 minut). W sumie wykonano 5058 bilansów cząstkowych.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg opadów atmosferycznych ( $P$ ), ewapotranspiracji ( $E$ ), zmian retencji ( $\Delta R$ ) oraz wskaźnika odpływu ( $H$ ) w profilu pionowym studni nr 1. W literaturze przedmiotu nie znaleziono informacji o ciągłych (co 10 minut) pomiarach wilgotności w głębokich profilach glebowych, w szczególności w ekosystemach leśnych, co uniemożliwia analizę porównawczą. Niemniej zgodność i proporcjonalność pików opadu i zmian retencji może być przesłanką potwierdzającą prawidłowość mierzonych wartości wilgotności gruntu. Obliczony, w okresie 03.07÷17.10.2013 r. odpływ jednostkowy wynosi  $6,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ . Wartość ta zbliżona jest do odpływu jednostkowego występującego w szczegółowo badanej zlewni leśnej Pojezierza Krajeńskiego, powiatu Złotowskiego ( $6,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ), oddalanej o około 80 km od przedmiotowego obiektu doświadczalnego (Miler 2013).

**Tabela 1.** Charakterystyki składowych bilansu wodnego  
**Table 1.** Characteristics of water balance components

Składowa Component [mm]	Średnia Mean $\mu$	Suma Total	Min	Max	$\Sigma$	$\sigma/ \mu $
Opad atmosferyczny Precipitation	0,0230	116,25	0,00	12,35	0,2728	11,9
Ewapotranspiracja Evapotranspiration	0,0458	231,81	-0,03	0,48	0,0589	1,3
Zmiana retencji Change of retention	-0,0348	-163,95	-11,00	62,70	2,0232	58,1
Odływ Outflow	0,0127	59,85	-57,61	12,37	1,9331	152,0

W tabeli 1 zestawiono podstawowe statystyki dla składowych profilowego bilansu wodnego dla 30 minutowych przedziałów czasowych. O ile wartości średnie składowych są podobnego rzędu:  $0,01 \div 0,05$  mm, to ich współczynniki zmienności ( $\sigma/|\mu|$ ) różnią się znacząco ok.  $1 \div 150$ .

Zmienność jest oczywiście tym większa im przedział czasowy jest krótszy. Przykładowo dla zmiany retencji współczynnik zmienności ( $\sigma/|\mu|$ ) dla przedziałów: 10 min., 30 min., 24 godz. i 1 tygodnia wynosi odpowiednio: 174, 58, 9 i 2. Powyższe wartości obliczono na podstawie wyników pomiarów wilgotności gleby/gruntu w profilu pionowym studni nr 1 dla analizowanego okresu 03.07÷17.10.2013r.

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Obliczony odpływ jednostkowy (ok.  $7 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ), z uwagi na krótki okres (03.07÷17.10.2013r.) analizowanych pomiarów jest wstępnym oszacowaniem tego parametru.
2. Zmiany retencji obliczone na podstawie pomiarów wilgotności gleb/gruntów dla przedziałów 10 min. wykazują blisko 100-krotnie większą zmienność niż szacowane standardowo tygodniowe zmiany wilgotności.

## LITERATURA

Aurela M. (2005): *Carbon dioxide exchange in subarctic ecosystems measured by a micrometeorological technique*. Finnish Meteorological Institute Contributions No. 51.

- Baldocchi D. D. (2003): *Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future*. Global Change Biology 9: 479-492.
- Biniak M. (2004). *Zmienność zasobów wodnych gleby pod powierzchnią nieporośniętą i trawiasną w okresie zimy 2002/2003*. Acta Agrophysica. 3(1), 13-19.
- Campbell Scientific <http://www.campbellsci.com> [dostęp 06.02.2013]
- Chang Mingteh (2005). *Forest hydrology: an introduction to water and forest*. Taylor and Francis Group.
- Chojnicki B. H., Urbaniak M., Danielewska A., Strzeliński P., Olejnik J. (2009). *Pomiary wymiany dwutlenku węgla oraz biomasy w ekosystemach leśnych – stacja naukowa w Tucznie*. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej R.11, Zeszyt 2 (21), 247-256.
- Evet S.R. (2003). *Soil Water Measurement by Time Domain Reflectometry*. [In] Encyclopedia of Water Science, Dekker M.
- Jones S.B., Wraith J.M., Or D. (2002). *Time domain reflectometry measurement principles and applications*. Hydrological Processes.16, 141–153.
- Kowalska N., Chojnicki B., Rinne J., Haapanala S., Siedlecki P., Urbaniak M. (2013). *Measurements of methane emission from a temperate wetland by the eddy covariance method*. International Agrophysics 27, 283-290
- Leciejewski P. (2009). *Wykorzystanie metody TDR do ciągłego pomiaru zmian warunków wilgotnościowych i termicznych w profilu glebowym*. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej. R. 11, Zesz. 2 (21), 235-246.
- Miler A. T., Krysztofiak-Kaniewska A. (2013). *Koncepcja pomiarów zmian retencji i odpływu na stacji monitoringowej Tuczo. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr 3/II, 59-69.
- Miler A.T. (2013). *Kompleksowa metodyka oceny stosunków wodnych w lasach*. Wyd. Uniwersytetu
- Olejnik J., Urbaniak M., Juszcak R., Chojnicki B., Strzeliński P., Moczko J., Roszkiewicz J., Danielewska A., Baran M. (2011). *Oszacowanie strumieni netto dwutlenku węgla wymienianymi Przyrodniczego w Poznaniu*. Monografia. *między ekosystemem leśnym a atmosferą*. Raport z projektu badawczego zleconego przez DGLP za okres styczeń 2008 – grudzień 2011 (Maszynopis).
- Olejnik J., Urbaniak M., Juszcak R., Chojnicki B., Strzeliński P., Moczko J., Roszkiewicz J., Danielewska A. (2013). *Nowatorskie i zaawansowane systemy pomiarowe*. <http://www.oic.lublin.pl/cudzechwalicie/2-3.html> [dostęp 31.12.2013].
- Schlumberger Water Services <http://www.swstechnology.com> [dostęp 06.02.2013]
- Skierucha W., Sławiński C., Wilczek A., Żyromski A., Biniak-Pieróg M. (2012). *Telemetryczny system pomiaru wilgotności gleby, działający w technice TDR*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie. Wyd. ITP. T. 12. Z. 2, 257-267.

Dr inż. Marek Urbaniak, Prof. dr hab. Janusz Olejnik, mgr inż. Klaudia Ziemblińska,  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii  
60-649 Poznań, ul. Piątkowska 94

urbaniak@up.poznan.pl, olejnkj@up.poznan.pl, klaudiazziem@wp.pl

Prof. dr hab. inż. Antoni T. Miler, Dr inż. Anna Krysztofiak-Kaniewska,  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Inżynierii Leśnej  
60-623 Poznań, ul. Mazowiecka 41  
amiler@up.poznan.pl, annakrysztofiak@wp.pl