

Wpływ suszy na pobór wody przez sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) o różnej pozycji w drzewostanie

The influence of drought on the water uptake by Scots pines (*Pinus sylvestris* L.)
at different positions in the tree stand

Andrzej Boczoń*, Michał Wróbel

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii Lasu, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

*Tel. +48 22 7150535, fax +48 22 7150507, e-mail: a.boczon@ibles.waw.pl

Abstract. Periodically occurring drought is typical for the climate of Poland. In habitats supplied exclusively with rain water, tree stands are frequently exposed to the negative effects of water deficit in the soil. The aim of this study was to examine the water uptake and consumption of two individual Scots pine trees under drought conditions. The trees were located at different positions within the stand and at the time of study were over 150 years old. Soil moisture, availability of soil water and the quantity of water uptake by the individual trees were examined by measuring the water velocity inside the trunks (Thermal Dissipation Probe method).

Two periods of intense drought occurred in the summer 2006 only a few days apart. Before the drought, pine No. 1 (dominant) took up 66.7 dm³ water per day and pine No. 2 (co-dominant) took up 52.3 dm³ per day. The observed responses of the examined pines to the first period of drought were similar: the low soil water content resulted in a suppression of water uptake in both trees. After the end of the drought period however, the recovery responses of the two trees were different. Pine No. 1 resumed water uptake at values similar to those before the drought. Pine No. 2 on the other hand did not resume water uptake. We conclude that in case of this second tree the vegetative season possibly ended already at the end of June.

Keywords: Scots pine, soil moisture, pF curve, water uptake, sap flow, TDP, drought

1. Wstęp

Klimat Polski charakteryzuje się okresowym występowaniem susz atmosferycznych zakłócających bilans wodny danego terenu, co prowadzi do powstawania susz glebowych i wpływa na produkcję roślinną, także leśną. Przykładowo w okresie 1951–1990 odnotowano w Polsce 41 susz atmosferycznych, z których najdłuższe trwały 13 miesięcy (Farat et al. 1995), zaś w Białowieży w latach 1950–2003 stwierdzono średnio w ciągu roku 4 okresy bezdeszczowe (Boczoń 2006).

Występowanie susz glebowych nie jest obojętne dla wzrostu drzew i ich stanu zdrowotnego. W Europie zwiększająca się częstość letnich susz może powodować spadek zdrowotności drzew, a występowanie długotrwałych deficytów wody glebowej może wywoływać hydrauliczne i fizjologiczne efekty w kolejnych latach (Innes 1993). W Polsce blisko 75% powierzchni lasów przypada na siedliska suche lub świeże, na których jedynym źródłem wody są opady atmosferyczne. Podstawowym gatunkiem

budującym drzewostany na takich siedliskach jest sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.). Pomimo że gatunek ten występuje w szerokim spektrum warunków siedliskowych i jest uważany za odporny na warunki środowiska, to jednak drzewostany te są narażone na negatywne efekty wystąpienia susz glebowych.

Celem przeprowadzonych badań było określenie ilości pobieranej wody i przebiegu poboru wody przez pojedyncze drzewa sosny zwyczajnej w wieku powyżej 150 lat, o różnej pozycji w drzewostanie, w warunkach wystąpienia suszy glebowej.

2. Metodyka badań

Obiekt badawczy założono na terenie Lasu Sękocińskiego w siedlisku boru świeżego, z glebą rdzawą i głęboko położonym lustrem wody gruntowej. Doświadczenie obejmowało rozpoznanie elementów przepływu wody w układzie gleba–drzewa–atmosfera. Pomiarami objęto: wilgotność gleby, przepływ wody w pniach drzew, warunki meteorologiczne. Badania prowadzono w latach 2006–2007.

Wpłynęło: 30.06.2015 r., zrecenzowano: 13.07.2015 r., zaakceptowano: 22.07.2015 r.

Wilgotność gleby mierzona była za pomocą aparatury pomiarowej firmy Easy Test, opartej na oryginalnych rozwiązaniach opracowanych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Wilgotność objętościowa gleby określana jest na podstawie techniki reflektometrycznej (Time Domain Reflectometry – TDR). Zasada pomiaru wilgotności gleby w metodzie TDR polega na określeniu stałej dielektrycznej gleby, która poddana jest działaniu pola elektrycznego o częstotliwości 10^9 Hz. W takich warunkach gleba zachowuje się jak izolator, którego stała dielektryczna warunkowana jest wilgotnością, gdyż woda jest przewodnikiem impulsu elektrycznego. Wyznaczana ona jest ze wzoru:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2$$

gdzie:

ε – stała dielektryczna,

v – prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w glebie,

c – prędkość światła w próżni.

Wilgotność objętościowa gleby określana jest według formuły (Malicki et al. 1996):

$$\theta_{TDR} = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0,819 - 0,168 \cdot \rho - 0,159 \cdot \rho^2}{7,17 + 1,18 \cdot \rho}$$

gdzie:

θ_{TDR} – wilgotność objętościowa gleby,

ρ – gęstość gleby.

Zastosowana metoda, oparta na reflektometrycznym pomiarze wilgotności gleby, wykazuje wysoką zgodność z pomiarem bezpośrednim wilgotności gleby metodą grawimetryczną (Malicki et al. 1998).

Pomiary na powierzchni badawczej wykonywane były w sposób automatyczny na głębokościach 10–20 cm, 40–50 cm, 70–80 cm w 1-godzinnych odstępach czasu.

Pomiar poboru wody realizowano z wykorzystaniem metody Thermal Dissipation Probe, opracowanej przez Graniera (1985). Czujnik pomiarowy składa się z pary sond, mających postać igieł. Umieszcza się je w pniu w kierunku środka drzewa, pionowo jedna nad drugą w odległości 40 mm. Górna sonda zawiera czujniki ciepła i grzałkę, zaś dolna – czujniki ciepła. Czujniki ciepła rejestrują rozchodzenie się w drewnie ciepła wydzielonego przez grzałkę. Prędkość przepływu wody (V) określana jest z zależności:

$$V = 0,0119 \cdot K^{1,231} \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

gdzie parametr K określa się ze wzoru:

$$K = \frac{(dT_M - dT)}{dT}$$

w którym:

dT – różnica w temperaturze między górną a dolną igłą czujnika,

dT_M – wartość dT , gdy nie występuje przepływ wody w pniu.

W doświadczeniu zastosowano czujniki wyprodukowane przez firmę Dynamax, które współpracowały z urządzeniem zbierającym dane DataHog 2 firmy SKYE. Czujniki zostały

umieszczone w drzewach na wysokości pierśnicy. Pomiary były przeprowadzane w sposób automatyczny z 30 minutowym interwałem.

Obliczenie poboru wody przez drzewo ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) wymaga określenia pola powierzchni poprzecznej pnia, przez którą woda jest przewodzona. W przypadku sosny woda przepływa całą szerokością bielu, a więc należy zmierzyć pole powierzchni poprzecznej bielu. Ilość przepływającej wody jest iloczynem zmierzonej prędkości przepływu (cm s^{-1}) i pola powierzchni poprzecznej bielu (cm^2).

Pomiarami zostały objęte dwie sosny zwyczajne, których charakterystyka została zebrana w tabeli 1. Sosnę nr 1 należy zaliczyć do drzew górujących w drzewostanie, a silnie rozbudowana korona klasyfikuje to drzewo jako rozpieracz. Sosna nr 2, pomimo nieznacznie mniejszej wysokości od sosny nr 1, charakteryzuje się koroną o znacznie mniejszej powierzchni i pomimo że można ją uznać za drzewo współpanujące, to bezpośrednie sąsiedztwo sosny nr 1 spowodowało, że osiągnięta przez to drzewo grubość i przyrosty są znacznie mniejsze od sosny nr 1 (tab. 1).

Susza glebowa została określona na podstawie wilgotności gleby i wyznaczonych laboratoryjnie krzywych zdolności retencyjnych gleb – pF dla poszczególnych głębokości pomiarowych. Do wyznaczenia krzywej pF wykorzystano zestaw laboratoryjny firmy Eijkelkamp. W zakresie ciśnień od 0 do 0,1 bara wykorzystano aparat piaskowy, zaś od 0,2 do 15 barów – komory ciśnieniowe (Soil Moisture Ltd. Santa Barbara USA). Susza glebowa występowała po spełnieniu warunku, że wilgotność gleby jest niższa niż przy pF=3,7, czyli poniżej wartości granicznej wody trudno dostępnej dla roślin.

Do określenia warunków meteorologicznych powodujących wystąpienie suszy glebowej posłużono się metodą zastosowaną przez Farata i innych (1995), tj. określono rozchód wilgoci jako wynik bilansu klimatycznego, obliczonego jako różnica opadu i ewapotranspiracji, gdzie miesięczną ewapotranspirację obliczono, stosując wzór Iwanowa (Bac 1968):

$$EP = 0,00144 (25 + T)^2 (100 - f)$$

gdzie:

EP – miesięczna ewapotranspiracja potencjalna (mm),

T – średnia miesięczna temperatura powietrza ($^{\circ}\text{C}$),

f – średnia miesięczna wilgotność względna powietrza (%).

Do obliczeń wykorzystano dane meteorologiczne ze stacji Warszawa–Okęcie.

3. Wyniki badań

Wyznaczone krzywe zdolności retencyjnych gleb wykazały, że na poszczególnych głębokościach gleby wartości graniczne wilgotności, poniżej której możliwość pobierania wody przez rośliny jest ograniczona, wynosiły: na głębokości 10–20 cm – $0,048 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 40–50 cm – $0,036 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 70–80 cm – $0,030 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 2). Warunek wystąpienia suszy glebowej, przy którym wilgotność gleby jest niższa niż podane powyżej, został spełniony w lecie 2006 r. (ryc. 1).

Tabela 1. Charakterystyka osobników sosny zwyczajnej objętych pomiarem przepływu wody

Table 1. Biometric characteristics of studied Scots pine trees

Cecha Parameters	Sosna nr 1 Pine no1	Sosna nr 2 Pine no 2
Wiek Age	około 160 lat about 160 years	około 160 lat about 160 years
Wysokość Height	27,3 m	25,6 m
Pierśnica DBH	69,1 cm	44,6 cm
Grubość kory Bark thickness	3,2 cm	2,1 cm
Szerokość bielu Width of sapwood at DBH	11,3 cm	5,2 cm
Powierzchnia przekroju na wysokości pierśnicy bez kory Cross sectional area at DBH	3087,6 cm ²	1294,6 cm ²
Powierzchnia bielu na wysokości pierśnicy Sapwood area at DBH	1175,3 cm ²	587,7 cm ²

W okresach 2–10 lipca i 23 lipca – 2 sierpnia na wszystkich głębokościach pomiarowych wilgotność gleby była poniżej wartości granicznej dla wody trudno dostępnej.

Wystąpienie suszy glebowej było skutkiem małych opadów atmosferycznych od początku roku do lipca 2006 r., w okresie tym odnotowano zaledwie 180,3 mm opadów. Niskie opady spowodowały, że w okresie zimy jedynie w styczniu i lutym wystąpiła niewielka przewaga przychodu wilgoci nad rozchodem – w sumie 40 mm. W kolejnych miesiącach występował coraz większy deficyt wilgoci, który w lipcu osiągnął 210 mm. W miesiącach marzec–lipiec rozchód wilgoci był o 446 mm wyższy od przychodu (ryc. 2). W 2006

roku bilans klimatyczny wykazał deficyt wilgoci wynoszący 319 mm. Kierując się kryteriami przyjętymi w publikacji Farata i innych (1995), można stwierdzić, że w 2006 r. wystąpiła bardzo intensywna susza atmosferyczna.

W okresie od 1 czerwca do 15 sierpnia 2006 r. gwałtowne zmniejszenie poboru wody spowodowane suszą glebową w przypadku sosny nr 1 wystąpiło 2 lipca, a przerwanie tego procesu wystąpiło w dniu 4 lipca i trwało do 3 sierpnia z wyłączeniem dni od 12 lipca do 15 lipca, kiedy na kilka dni pobór wody został wznowiony (ryc. 3). Zarówno w okresach przed suszą glebową, jak i po jej wystąpieniu dobowy pobór wody osiągał zbliżone wartości (do 66,7 dm³ przed suszą i do 59,8 dm³ po okresie suszy). Miesięczny pobór wody po okresie suszy wynosił ponad 950 dm³ w sierpniu i wrześniu (ryc. 4). Zmniejszenie miesięcznego poboru w październiku było związane z końcem okresu wegetacyjnego.

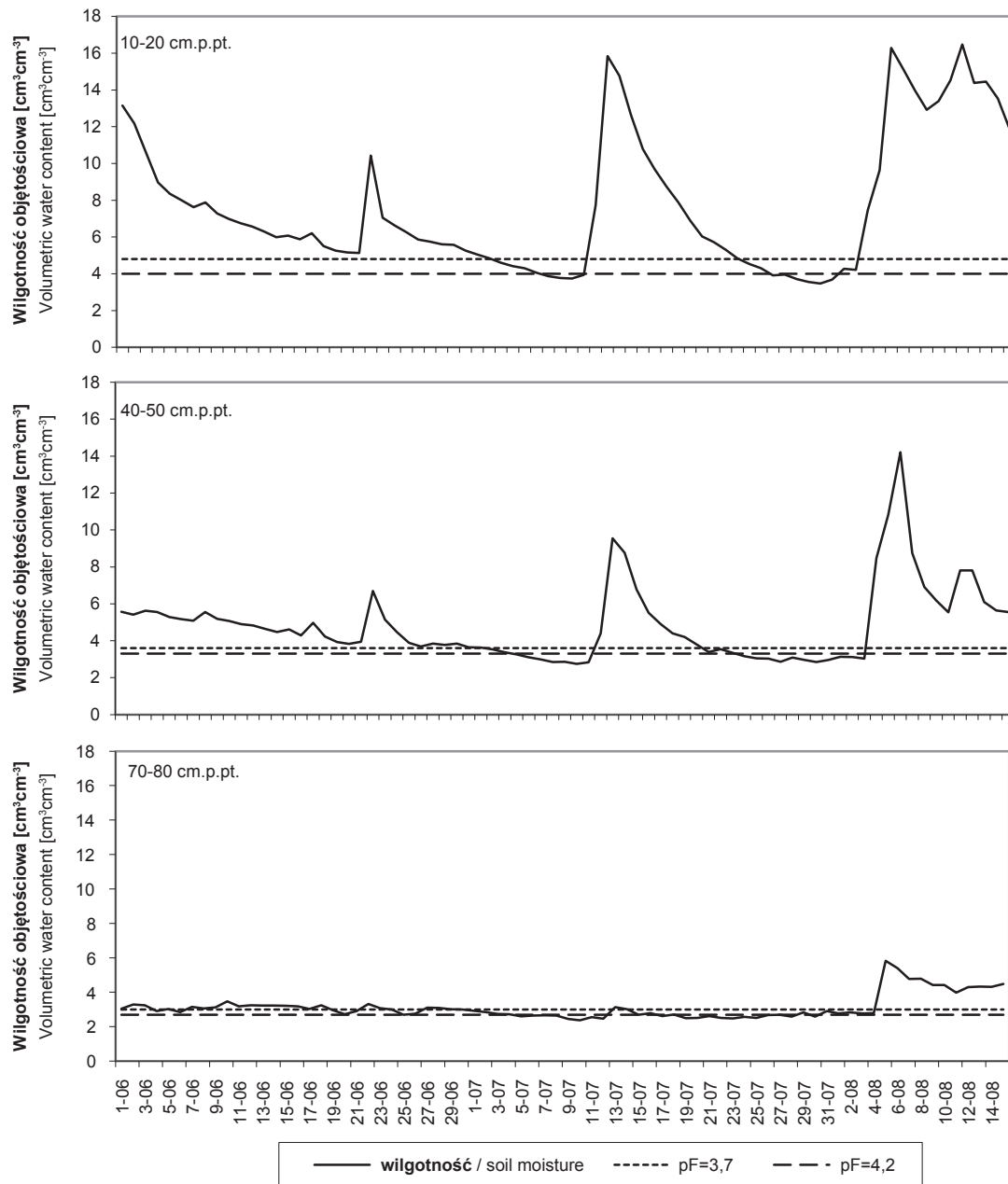
Sosna nr 2 przed wystąpieniem suszy pobierała w ciągu doby do 52,3 dm³ wody. Wystąpienie deficytu wody w glebie skutkowało zatrzymaniem pobierania wody już 24 czerwca 2006 r. (ryc. 3). Pomimo że w dniach 12–13 lipca i 4, 6, 11 sierpnia odnotowano jeszcze niewielki pobór wody przez to drzewo, jednak przerwanie poboru wody można traktować jako trwałe. W miesiącach z suszą sumaryczny pobór wody osiągnął zaledwie 2 dm³ w lipcu i 21 dm³ w sierpniu. W kolejnych miesiącach drzewo to nie pobierało już wody (ryc. 4).

Tabela 2. Wilgotność gleby (cm³ · cm⁻³) w charakterystycznych punktach krzywych pF na trzech głębokościach gleby na powierzchni badawczejTable 2. Soil moisture (cm³ cm⁻³) at points of pF-curve on three soil levels on the study plot

Punkt krzywej pF pF-curve point	Głębokość / Depth [cm]		
	10–20	40–50	70–80
0,001	0,462	0,448	0,419
0,4	0,458	0,445	0,416
1,0	0,445	0,421	0,385
1,5	0,377	0,381	0,346
2,0	0,277	0,240	0,222
2,7	0,072	0,053	0,041
3,0	0,056	0,042	0,034
3,7	0,048	0,036	0,030
4,2	0,040	0,033	0,027

4. Dyskusja

W przypadku nielimitowanej ilości wody dostępnej w glebie, jak to ma miejsce w siedliskach wilgotnych, zmienność poboru wody przez drzewa zależy głównie od czynników meteorologicznych (Boczoń 2004). Zakłócenia w procesie



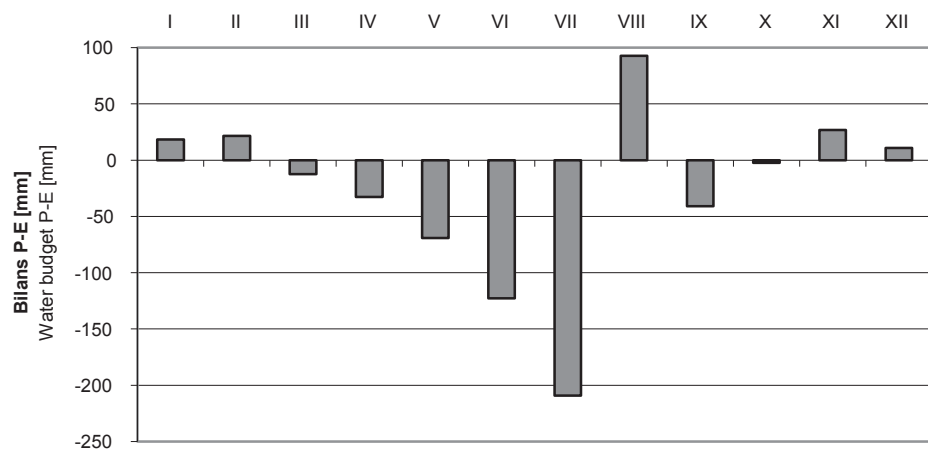
Rycina 1. Wilgotność gleby na głębokościach 10–20 cm, 40–50 cm, 70–80 cm na powierzchni badawczej wraz z granicznymi wartościami dla wody trudno dostępnej ($pF=3,7$) i niedostępnej dla roślin ($pF=4,2$)

Figure 1. Soil moisture at depths of 10–20 cm, 40–50 cm and 70–80 cm on the study plot with limit values at the early wilting point ($pF=3,7$) and the permanent wilting point ($pF=4,2$)

poboru wody wywoływane być mogą przez inne czynniki, np. przez foliofagi, które zmniejszając ilość liści, redukują powierzchnię parującą drzew, lub przez patogeny atakujące korzenie drzew, doprowadzające do zmniejszenia liczby korzeni zdolnych do poboru wody. W siedliskach bagiennych pomimo dużej ilości wody jest ona czynnikiem ograniczającym możliwości jej poboru. Nadmiar wody powoduje wystąpienie braku tlenu dostępnego dla korzeni, co doprowadza do ich nieprawidłowego funkcjonowania, w konsekwencji zmniejsza pobór wody i ogranicza wzrost drzew. W przypadku siedlisk suchych i świeżych mamy do czynienia z wystę-

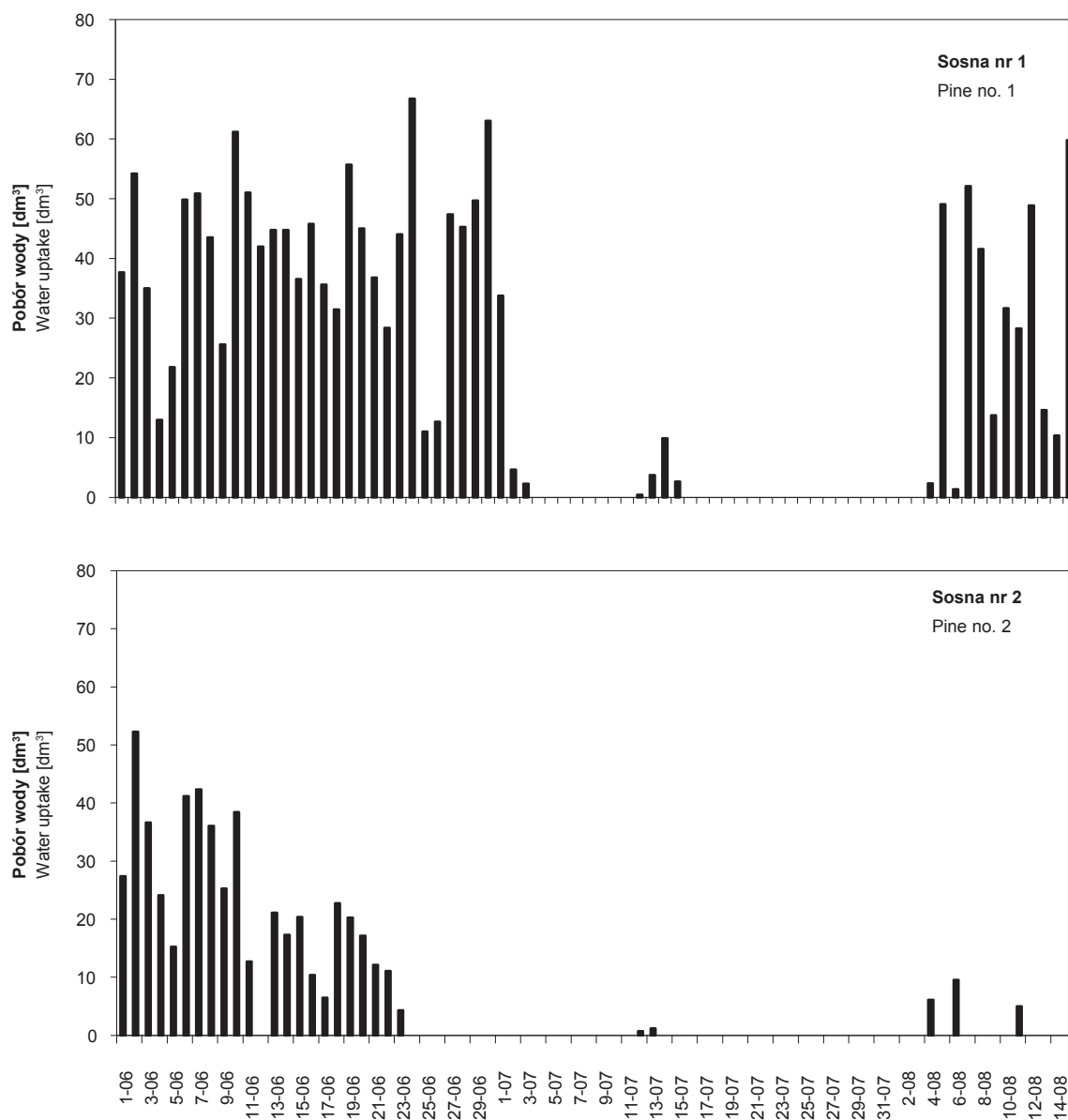
pującym okresowym brakiem wody w glebie, który limituje lub całkowicie hamuje pobór wody przez drzewa.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów poboru wody w Lesie Sękocińskim można zaobserwować różną reakcję sosen na występowanie suszy glebowej. W lecie 2006 r. warunki meteorologiczne doprowadziły do wystąpienia dwóch okresów suszy glebowej w odstępnie kilku dni. Reakcja badanych sosen w pierwszym okresie była podobna, susza glebowa w obu przypadkach doprowadziła do zahamowania pobierania wody. Po zakończeniu trwania suszy reakcja drzew była jednak odmienna. Sosna nr 1 wznowiła



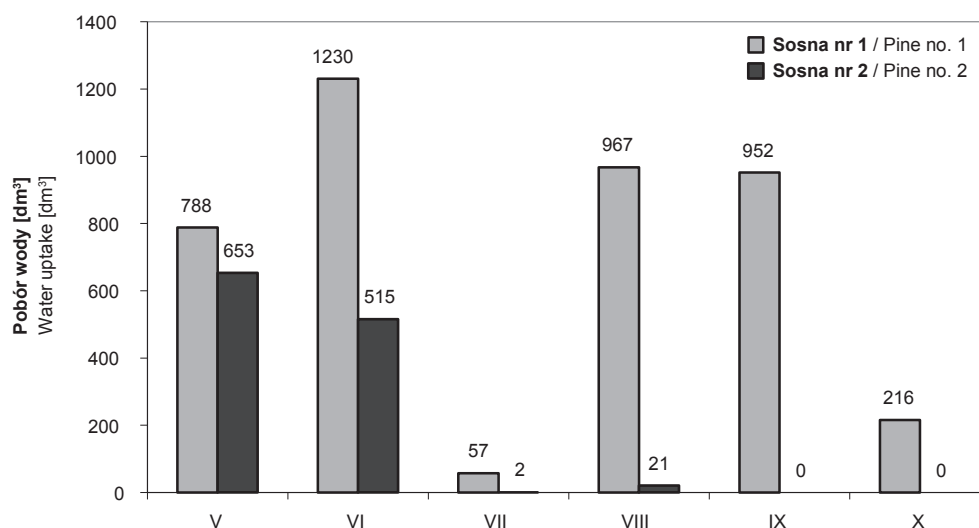
Rycina 2. Bilans klimatyczny w poszczególnych miesiącach 2006 r. dla stacji Warszawa–Okęcie

Figure 2. Monthly water budget (P-ETP) in 2006 on Warszawa–Okęcie weather station



Rycina 3. Dobowy pobór wody przez sosnę nr 1 i sosnę nr 2 w okresie 1 czerwca – 15 sierpnia 2006 r.

Figure 3. Daily water uptake by Pine trees from 1 June to 15 April 2006



Rycina 4. Miesięczne sumy poboru wody przez badane sosny od maja do października 2006 r.

Figure 4. Monthly water uptake by Pine trees from May to October 2006

pobieranie wody, a dobowe wartości poboru były podobne do tych sprzed suszy glebowej. Sosna nr 2 nie wznowiła pobierania wody. W przypadku tego drzewa można powiedzieć, że sezon wegetacyjny zakończył się już pod koniec czerwca. Odmierna reakcja drzew na suszę glebową była uwarunkowana kilkoma czynnikami. Sosna nr 1, jako drzewo panujące w drzewostanie i mocno rozbudowane, miała znacznie lepszą pozycję do pobierania wody. Drzewa takie pobierają większe ilości wody niż drzewa niższych warstw drzewostanu. Drzewa panujące i górujące w drzewostanie posiadają najlepsze warunki wzrostu i dlatego w warunkach dobrej dostępności wody są w stanie osiągnąć największe rozmiary i wytworzyć największą powierzchnię liści. Ich maksymalny pobór wody kilkakrotnie przewyższa ilość wody pobieranej przez drzewa zasadniczej warstwy okapu, a ilość wody pobieranej przez drzewa przygłuszone praktycznie nie ma znaczenia dla sumarycznego zużycia wody przez drzewostan. Istnieje wyraźna wzajemna zależność między rozmiarami drzewa, powierzchnią liści i ilością pobieranej (transpirowanej) wody. Na podobne zależności zwracają uwagę także inni autorzy. Strelcova (1998) przeprowadziła pomiary w dojrzałym drzewostanie jodłowo-świerkowo-bukowym, w którym w warunkach Nielimitowanej dostępności wody w glebie buki zwyczajne górnej warstwy okapu maksymalnie transpirowały 370 litrów wody w ciągu doby, zaś w tym samym czasie buki występujące w dolnej warstwie okapu zaledwie 83 litry. Natomiast w całym sezonie wegetacyjnym jedno drzewo górnej warstwy okapu wyparowywało ponad 14 500 litrów wody, zaś drzewo z dolnej warstwy okapu zaledwie niecałe 3300 litrów. Podobne badania przeprowadzono w 220-letnim drzewostanie jodły wonnej *Abies amabilis* (Martin et al. 2001). W badaniach tych wyraźnie widać, że stanowisko socjalne drzew wpływa zarówno na rozmiary drzew, a co za tym idzie na ilość wytwarzanej przez drzewa masy drewna, jak i na ilość wody pobieranej przez drzewa. Drzewa panujące pobierały maksymalnie w ciągu doby 281 dm³, współpanujące 101 dm³, a przygłuszone 9 dm³. Lepsze warunki wzrostu drzew górnej warstwy okapu spowodowane są korzystniejszymi dla

fotosyntezy i transpiracji warunkami mikrometeorologicznymi, w szczególności większym dostępem do światła, za czym idzie wyższa temperatura i niższa wilgotność powietrza. U dużych drzew mających gęstą koronę intensywność transpiracji maleje o około 20%, kiedy cień drzew otaczających pada na ich korony (Čermak 1995).

Wystąpienie suszy w okresie pierwszych miesięcy sezonu wegetacyjnego wywiera szczególnie silny wpływ na wzrost drzew. Ograniczenie dostępności wody powoduje słabszy wzrost igieł oraz mniejszy przyrost grubości sosen (Irvine et al. 1998). Wpływa to na przyrost grubości pnia roku kolejnego, gdyż skrócenie igieł wpływa na efektywność fotosyntezy i transpiracji, a mniejszy przyrost roczny skutkuje zmniejszoną efektywnością przewodzenia wody. Intensywna susza glebowa powoduje redukcję transpiracji drzewostanów sosnowych zarówno w roku wystąpienia (Cienciala et al. 1998), jak i w roku kolejnym, bez względu na korzystne warunki pogodowe i wodne (Clausnitzer et al. 2011).

5. Wnioski

Gleby piaszczyste, na których głównie występują drzewostany sosnowe, zatrzymują niewielką ilość wody. Szybko następujące zmiany uwilgotnienia gleby skutkują wyraźną reakcją sosen na zmniejszanie się zawartości wody dostępnej w glebie. Susza glebowa występująca w sezonie wegetacyjnym powoduje przerwanie procesu pobierania wody przez sosny.

Reakcja drzewa na deficyt wody w glebie zależy od pozycji w drzewostanie. Drzewa górujące lepiej znoszą suszę niż drzewa współpanujące, które w przypadku powtarzających się niekorzystnych warunków nie są w stanie wznowić procesu pobierania wody po okresach susz i wcześniej kończą wegetację.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano ze środków MNiSW przyznanych na działalność statutową IBL – nr tematu 242009.

Literatura

- Bac S. jun. 1968. Studia nad parowaniem z wolnej powierzchni wodnej, parowaniem terenowym i ewapotranspiracją potencjalną. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu. Melioracja 13, 80, 7–68.
- Boczoń A. 2004. Zużycie wody przez dęby w siedlisku lasu wilgotnego. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN* 23: 1–123.
- Boczoń A. 2006. Charakterystyka warunków termiczno-pluwialnych w Puszczy Białowieskiej w latach 1950–2003. *Leśne Prace Badawcze* 1: 57–72.
- Čermak J. 1995. Transpiration of trees – variability, relation to structures, water balance and defence mechanisms. “Interazioni albero ambiente: metodi e strumenti di misura” a cura di T. Anfodillo i S. Rento, *Atti del XXXII Corso di Cultura in Ecologia*, 83–107.
- Cienciala E., Kucera J., Ryan M.G., Lindroth A. 1998. Water flux in boreal forest using two hydrologically contrasting years; species specific regulation of canopy conductance and transpiration. *Annales Des Sciences Forestieres* 55, 47–61. DOI: 10.1051/forest:19980104.
- Clausnitzer F., Kötner B., Schwäzel K., Bernhofer Ch. 2011. Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability – Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1023–1034. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.04.007.
- Granier A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de s’ève brute dans letronc des arbres. *Annales des Scienties Forestieres* 42: 81–88.
- Innes J.L. 1993. Forest health: its assessment and status. Commonwealth Agricultural Bureau, Wallingford, 677 s. ISBN 0-85198-793-1.
- Irvine J., Perks M.P., Magnani F., Grace J. 1998. The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance. *Tree Physiology* 18(6): 393–402. DOI: 10.1093/treephys/18.6.393.
- Farat R., Kepińska-Kasprzak M., Magier P. 1995. Susze na obszarze Polski w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze IMGW Gospodarka Wodna i Ochrona Wód*. Nr 16. Warszawa. IMGW ss. 141.
- Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H. 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science* 47: 357–366. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x.
- Malicki M.A., Walczak R.T., Kokot J., Skierucha W.M., Kotliński J., Sobczuk H.A. 1998. Monitoring wilgotności, zasolenia i temperatury gleby. X Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki”, Lublin, 22-23 września 1998: 33–54.
- Martin T.A., Brown K.J., Kučera J., Meinzer F.C., Sprugel D.G., Hinckley T.M. 2001. Control of transpiration in a 220-year-old *Abies amabilis* forest. *Forest Ecology and Management* 152 (1/3): 211–224. DOI:10.1016/S0378-1127(00)00604-6.
- Strelcova K. 1998. Sezonna dynamika transpiracneho prudu buka lesneho (*Fagus sylvatica* L.) w stredohorskej oblasti Pol’any. *Lesny Casopis* 4: 245–260.

Wkład autorów

A.B. – koncepcja artykułu, przegląd literatury, analiza danych, przygotowanie maszynopisu i korekta tekstu; M.W. – praca terenowa, poprawki.

The influence of drought on the water uptake by Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) at different positions in the tree stand

Andrzej Boczoń*, Michał Wróbel

Forest Research Institute, Department of Forest Ecology, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn, Poland

*Tel. +48 22 7150535, fax +48 22 7150507, e-mail: a.boczon@ibles.waw.pl

Abstract. Periodically occurring drought is typical for the climate of Poland. In habitats supplied exclusively with rain water, tree stands are frequently exposed to the negative effects of water deficit in the soil. The aim of this study was to examine the water uptake and consumption of two individual Scots pine trees under drought conditions. The trees were located at different positions within the stand and at the time of study were over 150 years old. Soil moisture, availability of soil water and the quantity of water uptake by the individual trees were examined by measuring the water velocity inside the trunks (Thermal Dissipation Probe method).

Two periods of intense drought occurred in the summer 2006 only a few days apart. Before the drought, pine No. 1 (dominant) took up 66.7 dm³ water per day and pine No. 2 (co-dominant) took up 52.3 dm³ per day. The observed responses of the examined pines to the first period of drought were similar: the low soil water content resulted in a suppression of water uptake in both trees. After the end of the drought period however, the recovery responses of the two trees were different. Pine No. 1 resumed water uptake at values similar to those before the drought. Pine No. 2 on the other hand did not resume water uptake. We conclude that in case of this second tree the vegetative season possibly ended already at the end of June.

Keywords: Scots pine, soil moisture, pF curve, water uptake, sap flow, TDP, drought

1. Introduction

Poland's climate is characterised by periodic weather-related droughts, which disrupt the water balance of a given area, resulting in soil droughts that affect vegetation growth, including that of the forest. For example, 41 weather-related droughts were reported in Poland for the period 1951–1990, of which the longest lasted 13 months (Kowalczyk et al., 1995), whereas in Białowieża, an average of four periods of no rain were reported annually from 1950 to 2003 (Boczoń 2006).

The occurrence of soil droughts affects the growth of trees and their health status. In Europe, an increasing frequency of summer droughts may lead to a decline in the health of trees, and the incidence of long-term soil water deficits can cause hydraulic and physiological effects in subsequent years (Innes 1993). In Poland, nearly 75% of all forests is found in either dry or fresh habitats, in which the only source of water is precipitation. The main species of the tree stands in these habitats is Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Although this species occurs

in a wide range of habitat conditions and is considered to be resistant to various environmental conditions, these stands are in fact susceptible to the adverse effects of drought in the soil.

The aim of this study was to determine the amount of water uptake and consumption of individual Scots pine trees aged over 150 years at different positions in the tree stand under conditions of drought-affected soils.

2. Methodology

The study site was established in the Sękocin Forest in a fresh coniferous forest habitat, with rusty soils and a deep ground water table. The study included the identification of the elements of water flow between the soil–plant–atmosphere continuum. Measurements were made of soil moisture, water flow in the tree trunks and weather conditions. The study was conducted in 2006–2007.

Soil moisture was measured using the apparatus manufactured by Easy Test, based on original solutions deve-

Submitted: 30.06.2015, reviewed: 13.07.2015, accepted after revision: 22.07.2015.

veloped at the Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences in Lublin. Volumetric soil moisture was determined based on the reflectometry technique (time domain reflectometry, TDR). The principle of measuring soil moisture using the TDR method consists of determining the dielectric constant of the soil that is subjected to an electrical field with a frequency of 10^9 Hz. Under such conditions, the soil acts as an insulator, whose dielectric constant is conditioned by moisture, as water is a conductor of electrical impulses. It is calculated using the following formula:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{v} \right)^2$$

where

ε is the dielectrical constant,

v is the velocity of the propagation of electromagnetic waves in the soil,

c is the speed of light in vacuum.

Volumetric soil moisture is determined using the following formula (Malicki et al. 1996):

$$\theta_{\text{TDR}} = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 0.819 - 0.168 \cdot \rho - 0.159 \cdot \rho^2}{7.17 + 1.18 \cdot \rho}$$

where

θ_{TDR} is the volumetric soil moisture,

ρ is the soil density.

The method used, based on the reflectometric measurement of soil moisture, is highly compatible with the direct measurement of soil moisture by the gravimetric method (Malicki et al., 1998).

The measurements at the study site were made automatically at the depths of 10–20, 40–50 and 70–80 cm at 1 hour intervals.

Water uptake was measured using the thermal dissipation probe method developed by Granier (1985). The sensor consists of a pair of needle-like probes. They are placed in the trunk towards the centre of the tree, one above the other vertically at a distance of 40 mm. The upper probe includes heat sensors and a heater, whilst the lower has heat sensors. The sensors record the radiation of the heat in the wood that is generated by the heater. The rate of water flow (V) is determined from the relationship

$$V = 0.0119 \cdot K^{1.231} \text{ (cm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

where K is calculated with the formula:

$$K = \frac{(dT_M - dT)}{dT}$$

in which

dT – the difference in temperature between the upper and lower probe of the sensor,

dT_M – value of dT , when no water is flowing in the trunk.

Sensors manufactured by Dynamax were used in the study, as they work together with the DataHog 2 data collection device from SKYE. The sensors were placed in trees at the DBH. Measurements were made automatically with a 30-minute interval.

Calculating the tree's water uptake (cm^3s^{-1}) requires the measurement of the trunk's cross-sectional area through which water is conducted. Pine trees transport water through the entire width of the sapwood, so the cross-sectional area of the sapwood must be measured. The amount of water flow is the product of the measured flow rate (cm s^{-1}) and the cross-sectional area of the sapwood (cm^2).

Measurements of two Scots pine trees were taken, whose characteristics are presented in Table 1. Pine tree no. 1 towers above the others in the stand and has a highly developed crown, which classifies it as a dominant one of the largest in the stand. Pine no. 2, although it is only slightly shorter than pine no. 1, has a much smaller crown. Although it could be considered a codominant, its direct proximity to the pine no. 1 caused that the thickness and height of pine no. 2 are much smaller (Table 1).

The determination of drought was based on soil moisture and soil water retention (pF curve) measured in the laboratory – for each depth measurement. To determine the pF curve, laboratory equipment from the Ejikelkamp company was used. In a pressure range of 0–0.1 bar, sand apparatus was used, and from 0.2 to 15 bars, pressure chambers (Soil Moisture Ltd. of Santa Barbara, USA) were used. Soil drought occurred when the soil moisture was lower than pF = 3.7, which is below the limit value of the early wilting point for plants.

To determine the meteorological conditions that cause the occurrence of soil drought, the method used by Kowalczyk and others (1995) was applied, that is, the outflow of moisture was determined as the result of water balance, calculated as the difference between precipitation and evapotranspiration, where monthly evapotranspiration was calculated using the Ivanov formula (Bac 1968):

$$EP = 0.00144 (25 + T)^2 (100 - f)$$

where

EP is the monthly evapotranspiration potential (mm),

T is the average ambient air temperature ($^{\circ}\text{C}$),

f is the average monthly relative humidity of the air (%).

The meteorological data from the Warszawa-Okęcie weather station were used for the calculations.

3. Results

The soil water retention curves showed that at specific depths, the moisture limit values below the early wilting

Table 1. Biometric characteristics of the Scots pine trees studied

Parameters	Pine no. 1	Pine no. 2
Age	about 160 years	about 160 years
Height	27.3 m	25.6 m
DBH	69.1 cm	44.6 cm
Bark thickness	3.2 cm	2.1 cm
Width of sapwood at DBH	11.3 cm	5.2 cm
Cross sectional area at DBH	3087.6 cm ²	1294.6 cm ²
Sapwood area at DBH	1175.3 cm ²	587.7 cm ²

point were 0.048 cm³ · cm⁻³ at a depth of 10–20 cm; 0.036 cm³ · cm⁻³ at a depth of 40–50 cm; 0.030 cm³ · cm⁻³ at a depth of 70–80 cm (Table 2). The condition of soil drought, where soil moisture is lower than the values presented above, was met in the summer of 2006 (Fig. 1). In the periods of July 2–10 and July 23 to August 2, soil moisture was below the limit value for the early wilting point at all measured depths.

The occurrence of soil drought was the result of low rainfall from the beginning of the year until July 2006, where only 180.3 mm of precipitation was recorded.

As a result of the low rainfall, only in the winter months of January and February, there was a slightly greater inflow of moisture than outflow – a total of 40 mm. Successive months brought an ever greater moisture deficit, which reached 210 mm in July. From March to July, moisture outflows were about 446 mm higher than inflows (Fig. 2). In 2006, the water balance showed a moisture deficit amounting to

Table 2. Soil moisture (cm³ cm⁻³) at points of the pF curve at three soil depths of the study plot

pF-curve point	Depth [cm]		
	10–20	40–50	70–80
0.001	0.462	0.448	0.419
0.4	0.458	0.445	0.416
1.0	0.445	0.421	0.385
1.5	0.377	0.381	0.346
2.0	0.277	0.240	0.222
2.7	0.072	0.053	0.041
3.0	0.056	0.042	0.034
3.7	0.048	0.036	0.030
4.2	0.040	0.033	0.027

319 mm. Following the criteria adopted by Kowalczyk and others (1995), we can conclude that there was a very intense drought in 2006.

In the period from 1 June to 15 August 2006, pine no. 1 experienced a rapid reduction in water uptake because of drought soil conditions on July 2. Water uptake was interrupted from 4 July until 3 August, except for the period of July 12–15, when water uptake was resumed for a few days (Fig. 3). The daily amount of water uptake was similar in the period before soil drought and the period after it (up to 66.7 dm³ before the drought and up to 59.8 dm³ after the period of drought). Monthly water uptake after the period of drought was more than 950 dm³ in August and September (Fig. 4). The reduction in monthly consumption in October was associated with the end of the growing season.

Pine no. 2 had a daily water uptake of 52.3 dm³ before the drought. It stopped absorbing water already on 24 June 2006 as a result of the water deficit in the soil (Fig. 3). Although there was a small amount of water uptake on 12–13 July and 4, 6, 11 August, the interruption of water uptake can be regarded as permanent for this tree in that growing season. In the months of the drought, total water consumption reached only 2 dm³ in July and 21 dm³ in August. The tree no longer absorbed water in successive months (Fig. 4).

4. Discussion

When an unlimited amount of water is available in the soil, as is the case in wet habitats, the variability of water uptake by a tree depends mainly on weather factors (Boczoń 2004). Disturbances in the process of water uptake may be caused by other factors, for example, by folivores that reduce the number of leaves and area of tree transpiration or by pathogens that attack tree roots, leading to the reduction in the number of roots capable of absorbing water. In wetland habitats, the high amount of water itself is a factor limiting absorption ability. Excess water causes a lack of

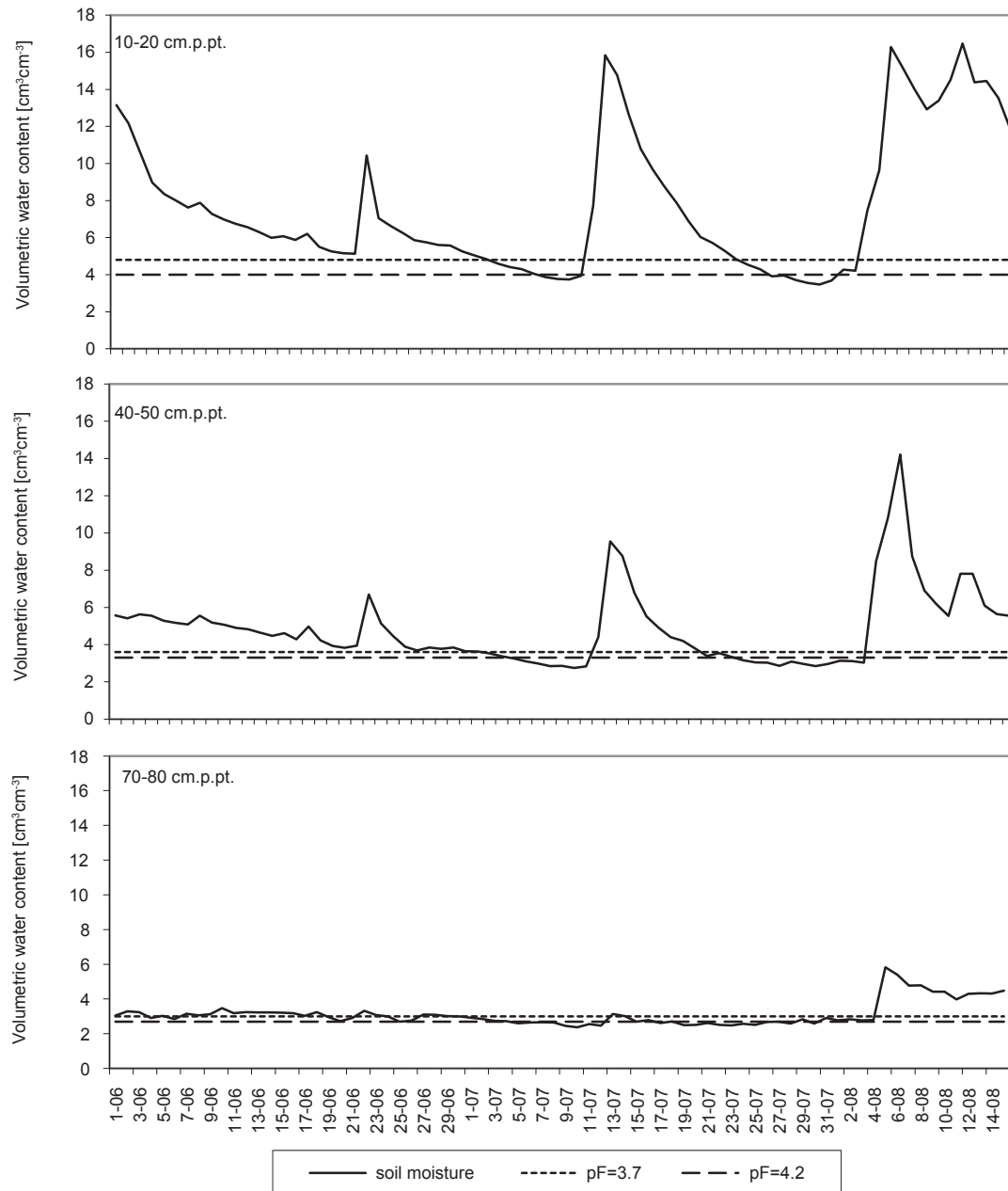


Figure 1. Soil moisture at depths of 10–20, 40–50 and 70–80 cm at the study plot with limit values at the early wilting point (pF = 3.7) and the permanent wilting point (pF = 4.2)

oxygen available to the roots, which affects their ability to function correctly, resulting in a decreased ability of trees to take up water, thereby reducing growth. In the case of dry and fresh habitats, periodic water shortages occur in the soil, which limits or completely inhibits water uptake by trees.

On the basis of water absorption measurements taken in the Sękocin Forest, different responses of the pines to soil

drought can be observed. In the summer of 2006, weather conditions caused two periods of soil drought within a few days of each other. The studied pines reacted similarly to the first period of soil drought; in both the cases, they stopped absorbing water. However, after this drought was over, the trees reacted differently. Pine no. 1 resumed water uptake, and daily consumption values were similar to those before

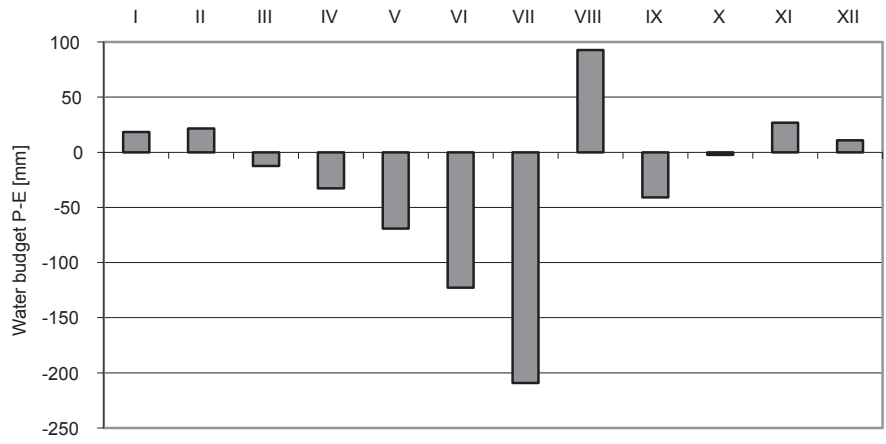


Figure 2. Monthly water balance (P-PET) in 2006 at the Warszawa-Okęcie weather station

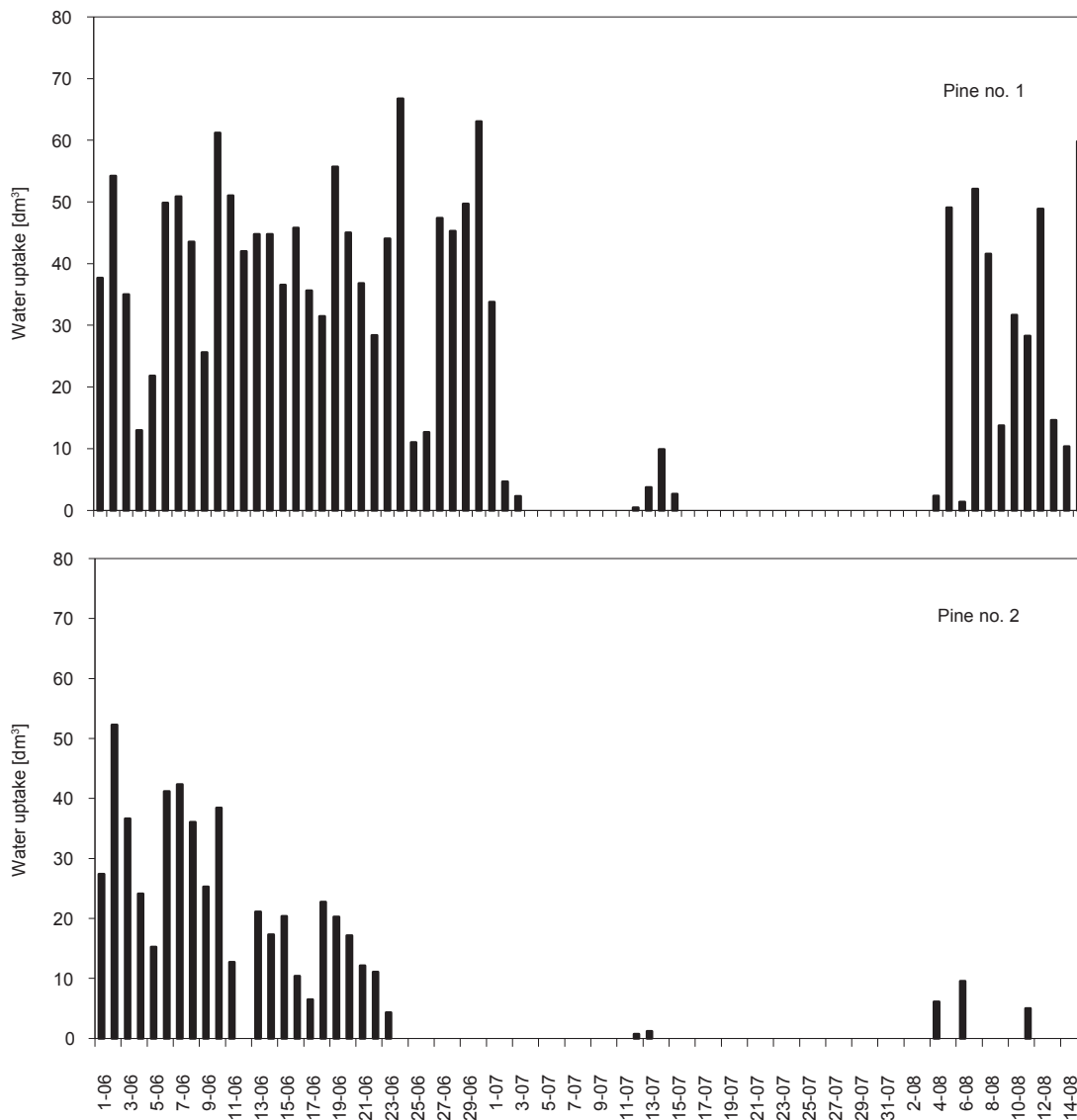


Figure 3. Daily water uptake by pine trees from 1 June to 15 August 2006

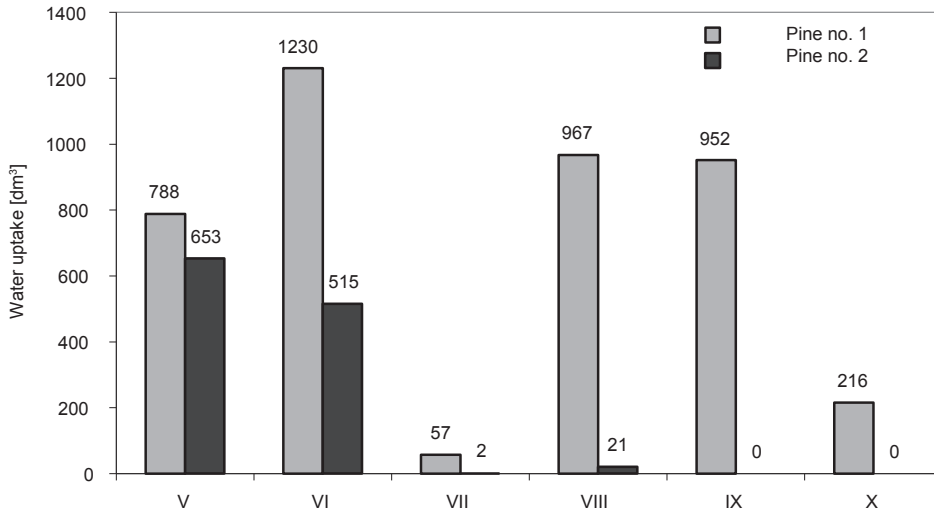


Figure 4. Monthly water uptake by pine trees from May to October 2006

the soil drought. Pine no. 2 did not resume water uptake. In the case of this tree, one can say that its growing season for that year concluded at the end of June. The diverse response of these trees to soil drought was conditioned by several factors. Pine no. 1, as the largest tree in the stand and extensively developed, was in a much better position to absorb water. Such trees have a higher water uptake than those in the lower layers of the stand. The largest and towering trees in the stand have the best growing conditions, and therefore, when there is good water availability, they are able to reach the largest size and develop the greatest leaf surface area. Their maximum water absorption surpasses the amount of water taken up by the trees in the canopy layer, and the amount of water taken up by the stand's understory layer has no practical significance for the stand's total water absorption. There is a clear interdependence between the size of trees, the surface area of the leaves and the amount of absorbed (transpired) water. Other authors have also noted this dependence. Strelcova (1998) performed measurements in a mature fir-spruce-beech stand, where under conditions of unlimited water availability in the soil, beeches in the upper layer of the canopy transpired 370 litres of water per day, whilst at the same time, beeches in the lower canopy layer transpired only 83 litres. In contrast, a single tree in the highest canopy layer transpired more than 14,500 litres of water throughout the growing season, whilst a tree in the lower canopy layer transpired just less than 3,300 litres. Similar studies were carried out in a 220-year-old stand of *Abies amabilis* fir (Martin et al., 2001). These studies clearly show that the social position of trees affects both their size and, hence, the amount of produced volume of timber, as well as on the amount of water uptake. Trees towering over the canopy absorbed a daily maximum of 281 dm³ of water and trees in the canopy layer absorbed 101 dm³, whilst un-

derstory trees absorbed 9 dm³. The better growing conditions of the trees in the uppermost stand layer are due to the more favourable micro-meteorological conditions for photosynthesis and transpiration, particularly greater access to light, and consequently, a higher temperature and lower relative humidity. The intensity of transpiration decreases about 20% in large trees with dense crowns when the shadows of surrounding trees fall on their crowns (Čermak 1995).

The occurrence of drought in the first months of the growing season has particularly strong impact on the growth of trees. Limiting the availability of water causes the weaker growth of pine needles and smaller increases in trunk size (Irvine et al., 1998). This affects the increase in trunk thickness in the next year, as the shortened needles impact the effectiveness of photosynthesis and transpiration, and lower annual growth results in a reduced effectiveness of water absorption. Intense soil drought reduces the transpiration of pine stands, both in the year of its occurrence (Cienciala et al., 1998) as well as in the following year, regardless of the favourable weather and water conditions which may occur (Clausnitzer et al. 2011).

5. Conclusions

Sandy soils, in which pine stands are mainly found, retain small amounts of water. Rapid changes in soil moisture result in a clear reaction of pines to the smaller amount of available water. Soil drought occurring in the growing season interrupts the process of water uptake by pines.

The reaction of trees to the deficit of water in the soil depends on their position in the tree stand. Dominant trees tolerate drought better than trees from the general level of canopy, which, in the case of recurring adverse conditions,

are not able to renew the process of water uptake after a period of drought and end their vegetation period earlier.

Conflict of interest

The authors declare no potential conflicts of interest.

Acknowledgements and financial sources

The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education for the statutory activities of the Forest Research Institute, topic no. 242009.

Reference

- Bac S. jun. 1968. Studia nad parowaniem z wolnej powierzchni wodnej, parowaniem terenowym i ewapotranspiracją potencjalną. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu. Melioracja* 13, 80, 7–68.
- Boczoń A. 2004. Zużycie wody przez dęby w siedlisku lasu wilgotnego. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN* 23: 1–123.
- Boczoń A. 2006. Charakterystyka warunków termiczno-pluwialnych w Puszczy Białowieskiej w latach 1950–2003. *Leśne Prace Badawcze* 1: 57–72.
- Čermak J. 1995. Transpiration of trees – variability, relation to structures, water balance and defence mechanisms. “Interazioni albero ambiente: metodi e strumenti di misura” a cura di T. Anfodillo i S. Rento, *Atti del XXXII Corso di Cultura in Ecologia*, 83–107.
- Cienciala E., Kucera J., Ryan M.G., Lindroth A. 1998. Water flux in boreal forest using two hydrologically contrasting years; species specific regulation of canopy conductance and transpiration. *Annales Des Sciences Forestieres* 55, 47–61. DOI: 10.1051/forest:19980104.
- Clausnitzer F., Kötner B., Schwäzel K., Bernhofer Ch. 2011. Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability – Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 1023–1034. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.04.007.
- Granier A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres* 42: 81–88.
- Innes J.L. 1993. Forest health: its assessment and status. Commonwealth Agricultural Bureau, Wallingford, 677 p. ISBN 0-85198-793-1.
- Irvine J., Perks M.P., Magnani F., Grace J. 1998. The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance. *Tree Physiology* 18(6): 393–402. DOI: 10.1093/treephys/18.6.393.
- Kowalczyk P., Farat R., Kępińska-Kasprzak M., Magier P. 1995. Susze na obszarze Polski w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze IMGW. Gospodarka Wodna i Ochrona Wód* 16: 1–141.
- Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H. 1996. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science* 47: 357–366. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x.
- Malicki M.A., Walczak R.T., Kokot J., Skierucha W.M., Kotliński J., Sobczuk H.A. 1998. Monitoring wilgotności, zasolenia i temperatury gleby. X Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki”, Lublin, 22-23 września 1998: 33–54.
- Martin T.A., Brown K.J., Kučera J., Meinzer F.C., Sprugel D.G., Hinckley T.M. 2001. Control of transpiration in a 220-year-old *Abies amabilis* forest. *Forest Ecology and Management* 152 (1/3): 211–224. DOI:10.1016/S0378-1127(00)00604-6.
- Strelcova K. 1998. Sezonna dynamika transpiracneho prudu buka lesneho (*Fagus sylvatica* L.) w stredohorskej oblasti Pol'any. *Lesny Casopis* 4: 245–260.

Author's contribution

A.B. – conceptualisation of the article, literature review, data analysis, preparation of the manuscript and corrections of the text; M.W. – field work and corrections.