

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 który 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.

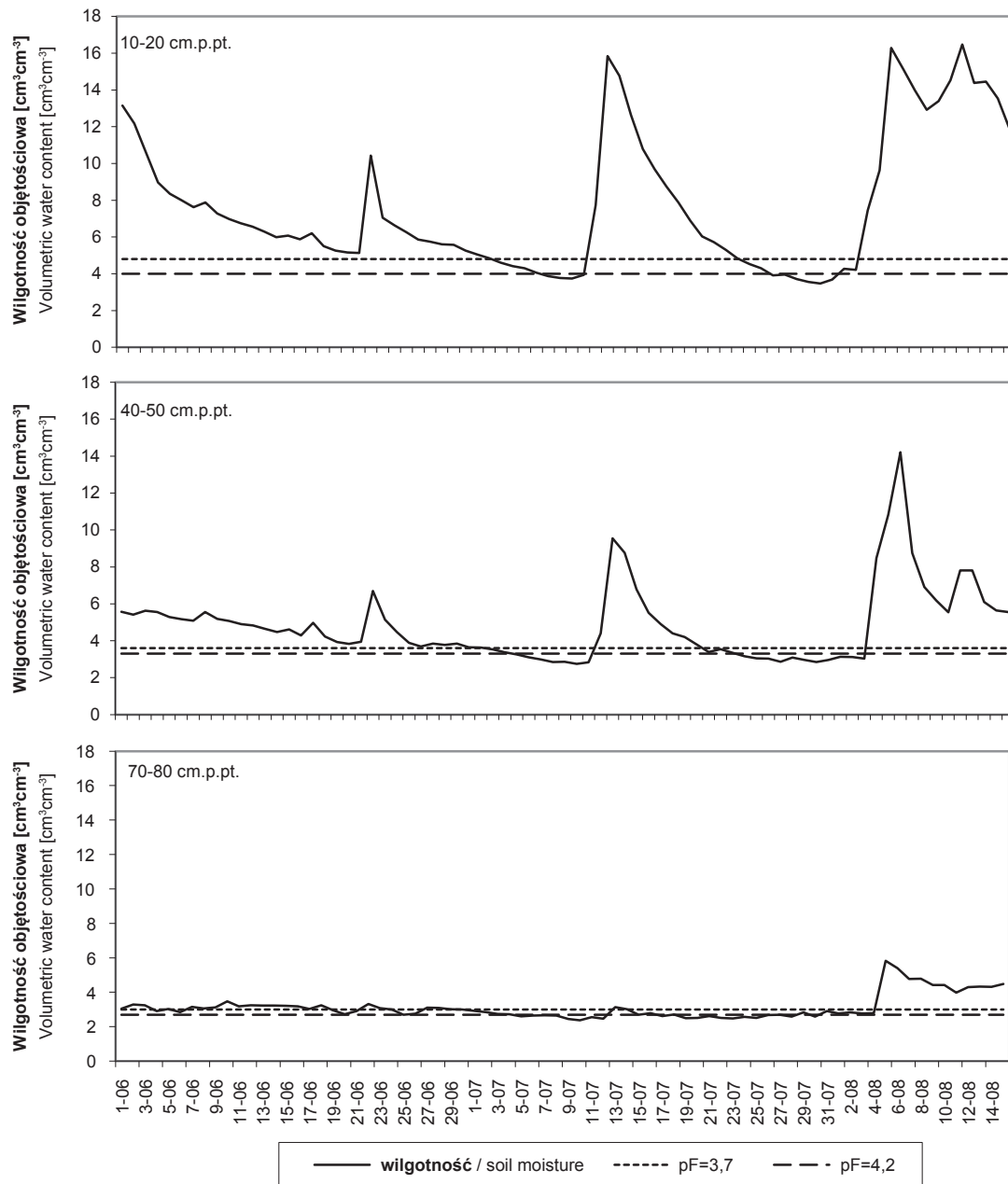
Sosna nr 2 przed wystąpieniem suszy pobierała w ciągu doby do 52,3 dm³ wody. Wystąpienie deficytu wody w glebie skutkowało zatrzymaniem pobierania wody już 24 czerwca 2006 r. (ryc. 3). Pomimo że w dniach 12–13 lipca i 4, 6, 11 sierpnia odnotowano jeszcze niewielki pobór wody przez to drzewo, jednak przerwanie 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



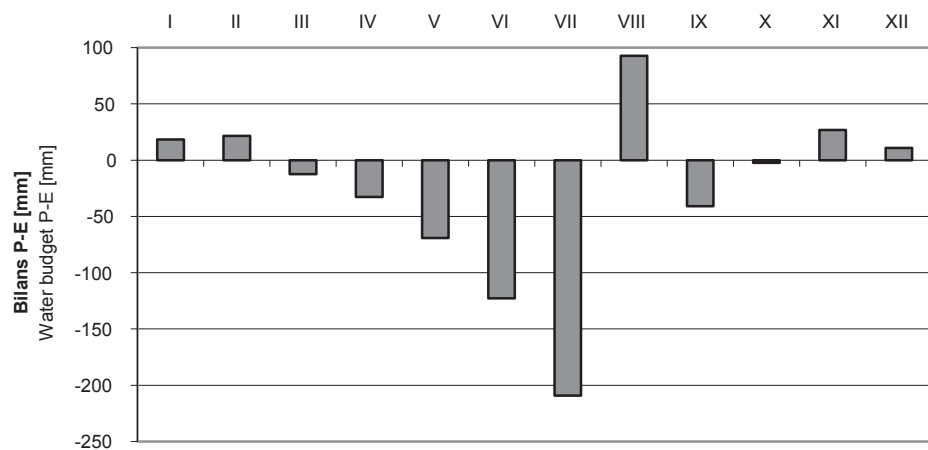
Rycina 1. Wilgotność gleby na głębokościach 10–20 cm, 40–50 cm, 70–80 cm na powierzchni badawczej wraz z granicznymi wartościami dla wody trudno dostępnej ($pF=3,7$) i niedostępnej dla roślin ($pF=4,2$)

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-

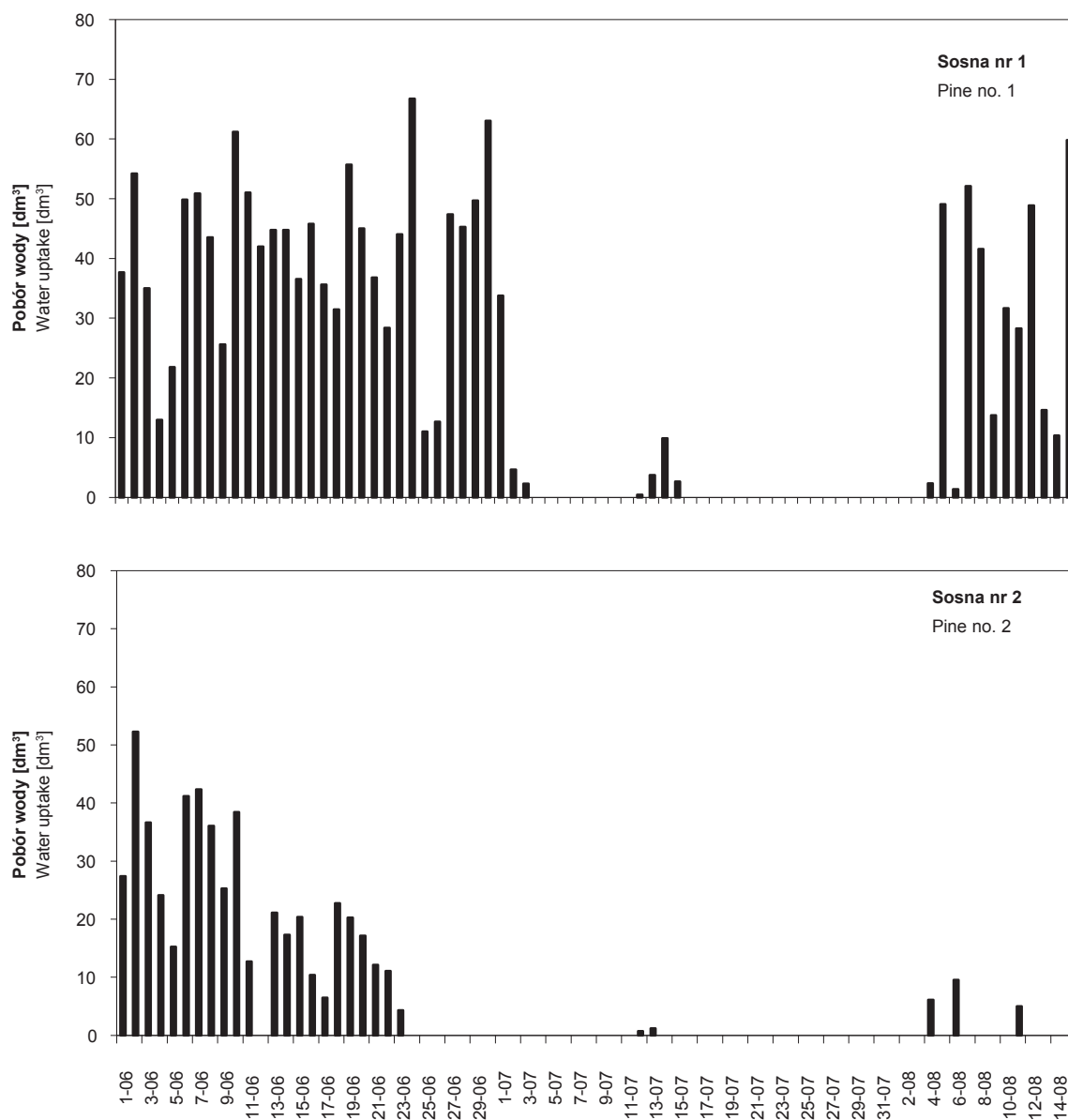
pującym okresowym brakiem wody w glebie, który limituje lub całkowicie hamuje pobór wody przez drzewa.

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



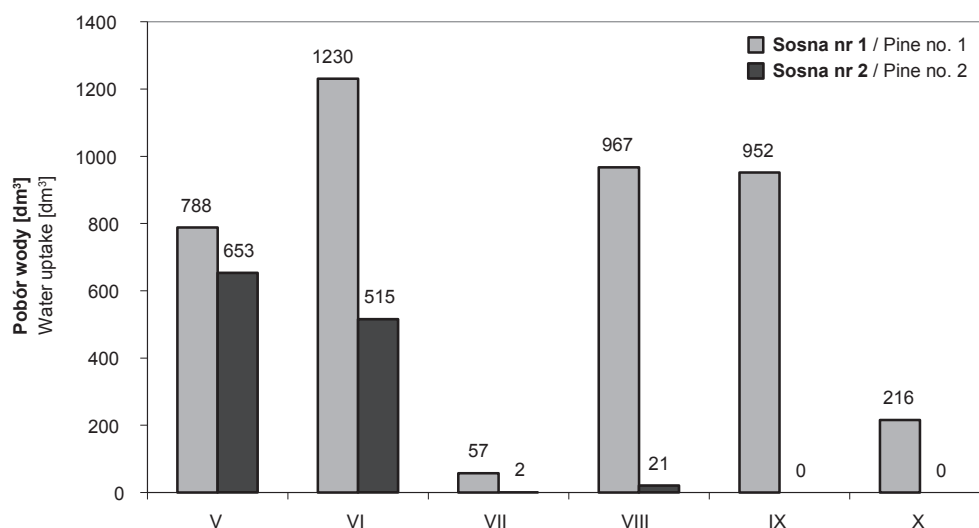
Rycina 2. Bilans klimatyczny w poszczególnych miesiącach 2006 r. dla stacji Warszawa-Okęcie

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 Fores-tieres* 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.