INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

No I/1/2023, POLISH ACADEMY OF SCIENCES, Cracow Branch, pp. 169 -186
Commission of Technical Rural Infrastructure

DOI: https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2023.009

ZAPOTRZEBOWANIE NA WODĘ W NAWADNIANIU PODSIĄKOWYM TERENÓW ZIELENI MIEJSKIEJ W PARKACH BYDGOSZCZY, GRUDZIĄDZA, TORUNIA I WŁOCŁAWKA ZALEŻNIE OD SCENARIUSZA PRZEWIDYWANYCH ZMIAN KLIMATYCZNYCH

Stanisław ROLBIECKI[1], Roman ROLBIECKI[1], Renata KUŚMIEREK-TOMASZEWSKA[1], Jacek ŻARSKI[1], Ariel ŁANGOWSKI[1]

WATER DEMAND FOR UPWARD IRRIGATION OF URBAN GREEN AREAS IN THE PARKS OF BYDGOSZCZ, GRUDZIĄDZ, TORUŃ AND WŁOCŁAWEK DEPENDING ON THE SCENARIO OF EXPECTED CLIMATE CHANGES

Streszczenie

Celem pracy była próba oszacowania zapotrzebowania na wodę do nawodnień podsiąkowych terenów zieleni miejskiej w parkach czterech wybranych miast województwa kujawsko-pomorskiego (Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń, Włocławek) w zależności od przewidywanych zmian klimatycznych. W opracowaniu uwzględniono dwa scenariusze: scenariusz RCP 4.5 zakładający wzrost stężenia CO_2 do poziomu 540 ppm w roku 2100 i osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 4,5 $W \cdot m^{-2}$ oraz scenariusz RCP 8.5 zakładający wzrost stężenia CO_2 do poziomu

[1] Pracownia Melioracji i Agrometeorologii, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska im. J.i.J.Śniadeckich, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-021 Bydgoszcz rolbr@pbs.edu.pl

940 ppm w roku 2100 i osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 8,5 W/m^2. Uwzględniono 3 wybrane dekady (dziesięciolecia) XXI wieku: 2021-2030, 2051-2060 i 2091-2100. Na podstawie przyjętych założeń oraz przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że największe ilości wody do nawadniania będą potrzebne w ostatnim dziesięcioleciu XXI wieku. Największe zapotrzebowanie na wodę wystąpi w lipcu, a następnie - w sierpniu. Wyższe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej – w porównaniu do scenariusza RCP 4.5 – (za wyjątkiem Grudziądza) stwierdzono wscenariuszu RCP 8.5. Spośród czterech badanych miast województwa kujawsko-pomorskiego, najniższe zapotrzebowanie na wodę wystąpiło w Grudziądzu, wyższe w Bydgoszczy, jeszcze wyższe w Toruniu, a najwyższe – we Włocławku. W dziesięcioleciu 2091-2100, wyrażone jako dopływ jednostkowy, zapotrzebowanie na wodę do nawadniania terenów zieleni miejskiej systemem podsiąkowym o zmiennym piętrzeniu w lipcu – odpowiednio dla scenariusza RCP 4.5 i RCP 8.5 w latach bardzo suchych (p=10%), wyniesie 1,19 i 1,19 dm^3·s^{-1}·ha^{-1} w Grudziądzu, 1,18 i 1,21 dm^3·s^{-1}·ha^{-1} w Bydgoszczy, 1,23 i 1,25 dm^3·s^{-1}·ha^{-1} w Toruniu oraz 1,26 i 1,29 dm^3·s^{-1}·ha^{-1} we Włocławku.

Słowa kluczowe: potrzeby wodne, nawadnianie podsiąkowe, tereny zurbanizowane, zmiany klimatu

Abstract

The aim of the study was to attempt to estimate the demand for water for upward irrigation of urban green areas in parks of four selected cities in the Kuyavian-Pomeranian Voivodeship (Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń, Włocławek) depending on expected climate changes. The study takes into account two scenarios: the RCP 4.5 scenario assuming an increase in CO_2 concentration to the level of 540 ppm in 2100 and achieving radiative forcing of 4.5 W/m^2, and the RCP 8.5 scenario assuming an increase in CO_2 concentration to 940 ppm in 2100 and achieving radiative forcing of level 8.5 W/m^2. Three selected decades (decades) of the 21st century are included: 2021-2030, 2051-2060 and 2091-2100. Based on the adopted assumptions and calculations, it was found that the largest amounts of water for irrigation will be needed in the last decade of the 21st century. The greatest demand for water will occur in July, and then

in August. Higher water needs of urban green areas - compared to the RCP 4.5 scenario - (except for Grudziądz) were found in the RCP 8.5 scenario. Among the four examined cities in the Kuyavian-Pomeranian Voivodeship, the lowest demand for water occurred in Grudziądz, higher in Bydgoszcz, even higher in Toruń, and the highest - in Włocławek. In the decade 2091-2100, expressed as a unit inflow, the demand for water for irrigation of urban green areas using a upward system with variable damming in July - for the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios in very dry years (p=10%), respectively, will amount to 1 .19 and 1.19 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ in Grudziądz, 1.18 and 1.21 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ in Bydgoszcz, 1.23 and 1.25 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ in Toruń and 1.26 and 1.29 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ in Włocławek.

Keywords: water needs, upward irrigation, urban areas, climate changes

WSTĘP

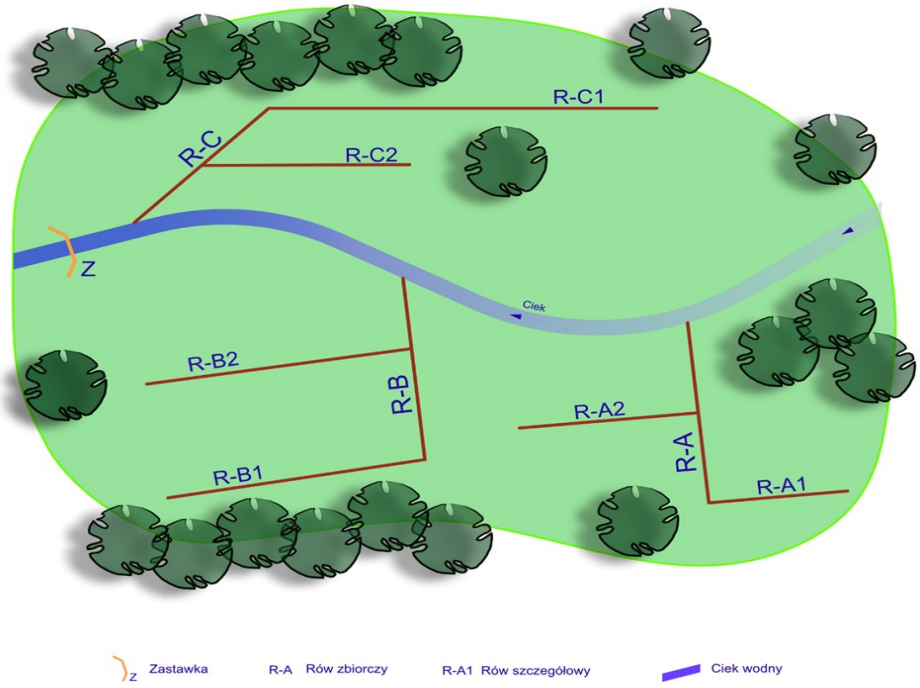
Zasoby wodne – cechującego się ograniczoną zdolnością samoregulacji oraz znaczną ingerencją człowieka – krajobrazu kulturowego Polski, zmniejszają się. Za główne przyczyny takiego stanu rzeczy uważa się m.in.: dłuższe serie lat o niskich opadach atmosferycznych, odwodnienia budowlane, nadmierną eksploatację wód wgłębnych i niektóre zabiegi wodno-melioracyjne (np. takie, jak regulacje rzek, obwałowania bądź odwodnienia terenów dolinowych) (Pływaczyk i Kowalczyk 2007).

Ważnym elementem krajobrazu miejskiego – a w szczególności zieleni miejskiej – są m.in. trawniki, które często zlokalizowane są w parkach położonych na obszarze o niezbyt głęboko zalegającej wodzie gruntowej (nie głębiej niż 0,8-1,0 m poniżej poziomu gruntu), co stwarza możliwość ich nawadniania za pomocą systemu nawodnień podsiąkowych (rys. 1). Do piętrzenia wody w ciekach (np. rowach) zlokalizowanych w obrębie terenów zieleni miejskiej można korzystać np. z przepustów rurowych z piętrzeniem, które istnieją w małych budowlach komunikacyjnych danego parku, takich jak np. małe mostki czy kładki (Pływaczyk i Kowalczyk 2007).

Dość liczne, opracowane w ostatnich latach dla Polski, scenariusze zmian temperatury powietrza i naturalnych opadów atmosferycznych różnią się między sobą istotnie w odniesieniu do okresu letniego (w szczególności: czerwiec-sierpień). Wszystkie modele przewidują bowiem wzrost temperatury, a tylko nieliczne z nich – wzrost opadów, niektóre natomiast – nawet spadek opadów.

W ocenie specjalistów, przewidywane zmiany klimatyczne mogą wpłynąć na wzrost potrzeb wodnych roślin. Dotyczy to zarówno terenów niezurbanizowanych, jak i zurbanizowanym obejmujących m.in. tereny zieleni miejskiej (Łabędzki 2009a).

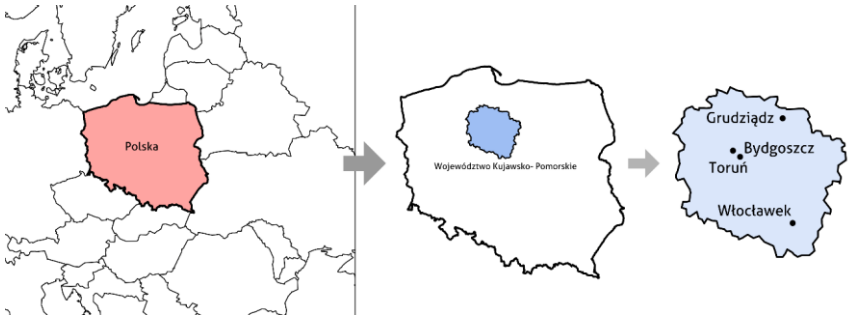
Celem niniejszej pracy była próba oszacowania zapotrzebowania na wodę do nawodnień podsiąkowych terenów zieleni miejskiej w parkach czterech wybranych miast województwa kujawsko-pomorskiego (Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń, Włocławek) w zależności od przewidywanych zmian klimatycznych. Województwo kujawsko-pomorskie cechuje się bardzo dużymi potrzebami klimatycznymi nawodnień o czym świadczą m.in. ujemne wartości klimatycznego bilansu wodnego (Kaca i Rek-Kaca 2019).



Rysunek 1. Przykład nawadniania podsiąkowego wybranego terenu zieleni miejskiej za pomocą niesystematycznej sieci rowów
Figure 1. An example of upward irrigation of a selected urban green area using a non-systematic network of ditches.
Źródło/Source: Opracowanie własne / Own elaboration

MATERIAŁ I METODY

W opracowaniu wykorzystano przewidywane średnie temperatury miesięczne (t; °C) oraz miesięczne sumy opadów (P; mm) dla czterech obszarów miejskich (zurbanizowanych): Bydgoszczy, Grudziądza, Torunia i Włocławka (rys. 2). Dane te pozyskano z portalu Klimada 2.0 (https://klimada2.ios.gov.pl/klimat-scenariusze-portal/) dla 2 scenariuszy zmian klimatycznych (RCP 4.5 oraz RCP 8.5). Scenariusz RCP 4.5 jest scenariuszem umiarkowanym, zakładającym wzrost stężenia CO_2 do poziomu 540 ppm w roku 2100 (osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 4,5 $W \cdot m^{-2}$). Scenariusz RCP 8.5 jest scenariuszem ekstrapolacyjnym zakładającym wzrost stężenia CO_2 do poziomu 940 ppm w roku 2100 (osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 8,5 $W \cdot m^{-2}$). Uwzględniono sześć miesięcy półrocza letniego (kwiecień, maj, czerwiec, lipiec, sierpień i wrzesień) dla 3 wybranych dekad (dziesięcioleci) XXI wieku: 2021-2030, 2051-2060 oraz 2091-2100.



Rysunek 2. Analizowane obszary zurbanizowane: Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń i Włocławek

Figure 2. Analysed urban areas: Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń i Włocławek.
Źródło/Source: Opracowanie własne / Own elaboration

Wysokość ewapotranspiracji potencjalnej (wskaźnikowej) obliczono wzorem Szarowa (Grabarczyk 1989):

$$ETp = \alpha \cdot \Sigma t, \quad (2)$$

gdzie:
ETp – ewapotranspiracja potencjalna (ewapotranspiracja wskaźnikowa) (mm),
α – współczynnik zależny od stanu powierzchni parującej (mm/1°C), (0,14-0,30) przyjęto dla warunków Polski według Grabarczyka (Grabarczyk 1989): IV: α= 0,25, V: α= 0,24, VI: α= 0,23, VII: α= 0,21, VIII: α= 0,20, IX: α= 0,19.

Wielkość niedoborów opadu (N) dla terenu zieleni miejskiej (trawnika) w roku średnim ($N_{50\%}$), średnio suchym ($N_{25\%}$) i bardzo suchym ($N_{10\%}$) wyznaczono metodą Ostromęckiego (Tabaszewski 1980, Żakowicz i Hewelke 2002, Żakowicz i in. 2009).

$$N_{p\%} = A_{p\%} \cdot ETp - B_{p\%} \cdot P \quad (1)$$

gdzie:
$N_{p\%}$ - niedobór opadu o prawdopodobieństwie pojawienia się równym p % (mm·okres^{-1}),
ETp – średnia z wielolecia wysokość ewapotranspiracji potencjalnej (wskaźnikowej) w analizowanym okresie (mm·okres^{-1}),
P – średnia z wielolecia wysokość opadu w analizowanym okresie (mm·okres^{-1}),
$A_{p\%}$ i $B_{p\%}$ - współczynniki liczbowe charakteryzujące zmienność ewapotranspiracji i opadów dla danej stacji meteorologicznej.

Niedobory wody dla kwietnia wyznaczono ze wzoru:

$$N_W = N_{IV} - \Delta R \quad (3)$$

gdzie:

N_w – niedobory wody dla kwietnia (mm),

N_{IV} – niedobór opadu dla kwietnia (mm),

ΔR – retencja wody w glebie (mm); przyjęto, że ΔR=30 mm.

Dla każdego pozostałych 5 miesięcy półrocza letniego przyjęto założenie, że niedobory wody są równe niedoborom opadów. Wyznaczono je zatem z formuły:

$$N_W = N \tag{4}$$

gdzie:

N - niedobór opadu dla danego miesiąca z okresu (V-IX) (mm).

Zapotrzebowanie wody do nawadniania podsiąkowego o stałym poziomie wody gruntowej (q_s) stałym piętrzeniu wody) wyznaczono ze wzoru:

$$Q_s = 0{,}116 \cdot Nw/T \ (dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}) \tag{5}$$

gdzie:

T – czas nawadniania (w dobach)

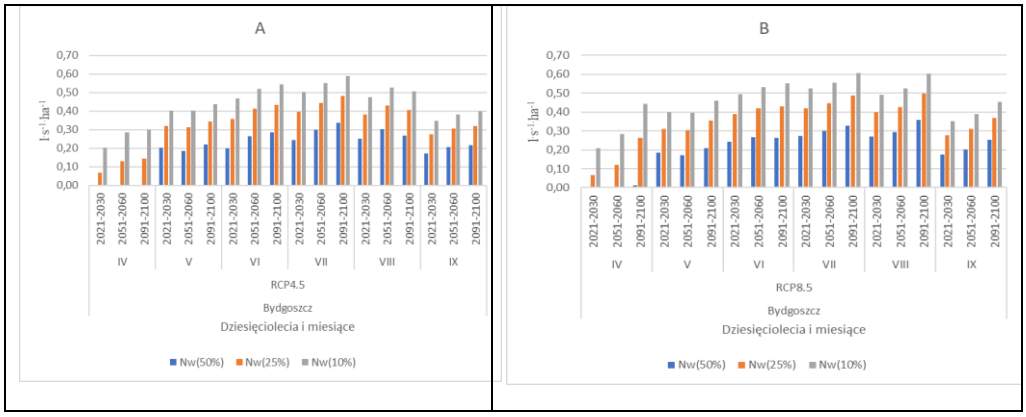
Zapotrzebowanie wody do nawadniania podsiąkowego o zmiennym poziomie wody gruntowej (zmiennym piętrzeniu wody)(q_z) wyznaczono – w sposób uproszczony – ze wzoru:

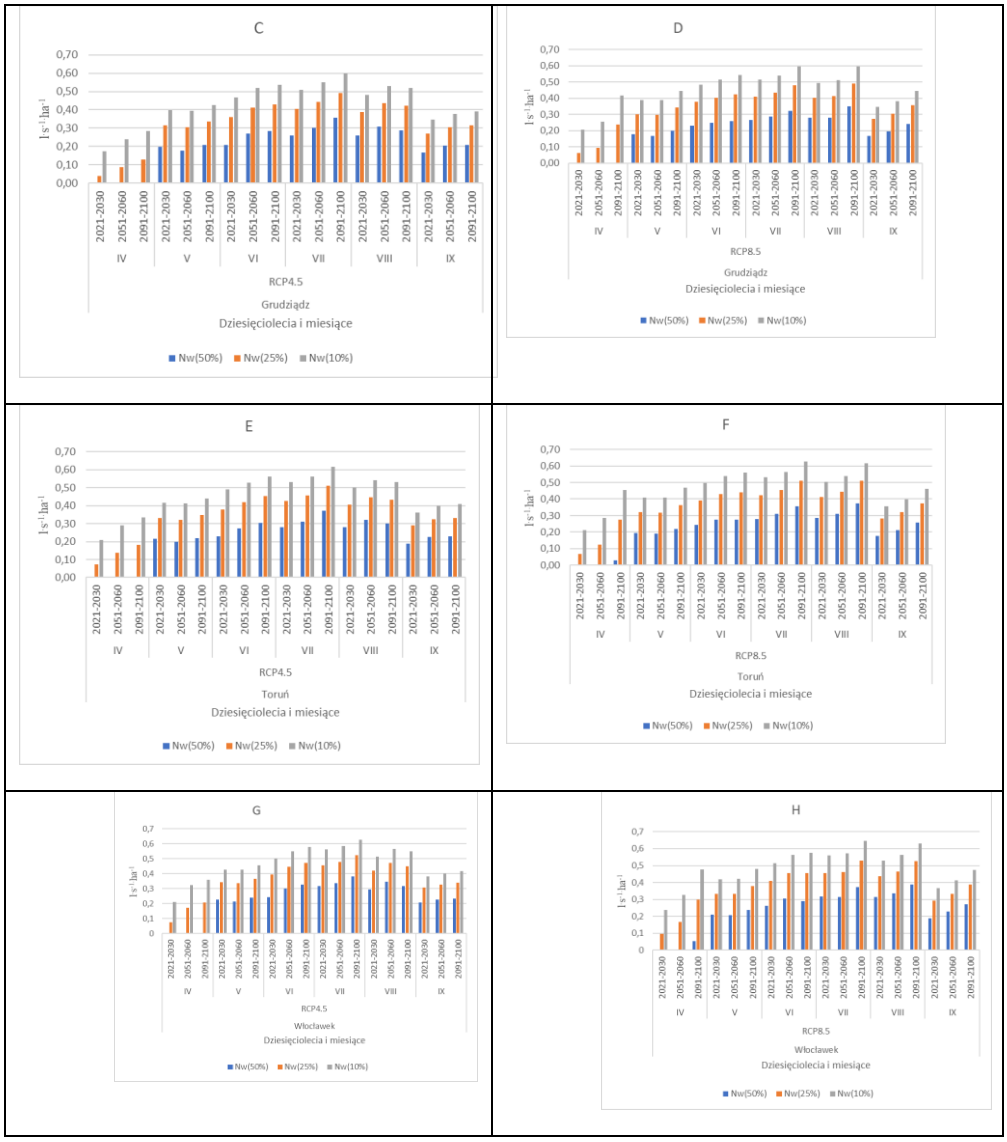
$$q_z = q_s \cdot 2 \ (dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}) \tag{6}$$

WYNIKI BADAŃ

Zapotrzebowanie na wodę do nawadniania terenów zieleni miejskiej systemem podsiąkowym o stałym piętrzeniu dla czterech wybranych miast i dwóch przyjętych scenariuszy zmian klimatu przedstawiono na rys. 3. Zapotrzebowanie na wodę wzrastało w kolejnych dziesięcioleciach – a największe ilości wody do nawadniania będą potrzebne w ostatnim dziesięcioleciu XXI wieku. Wśród sześciu rozpatrywanych miesięcy półrocza letniego (przyjętego za okres wegetacji zieleni miejskiej), największe zapotrzebowanie na wodę występowało w lipcu. Drugim miesiącem cechującym się wysokimi potrzebami wodnymi był sierpień. Z dwóch uwzględnionych w badaniach scenariuszy zmian klimatu, wyższe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej stwierdzono w scenariuszu RCP 8.5. Spo-

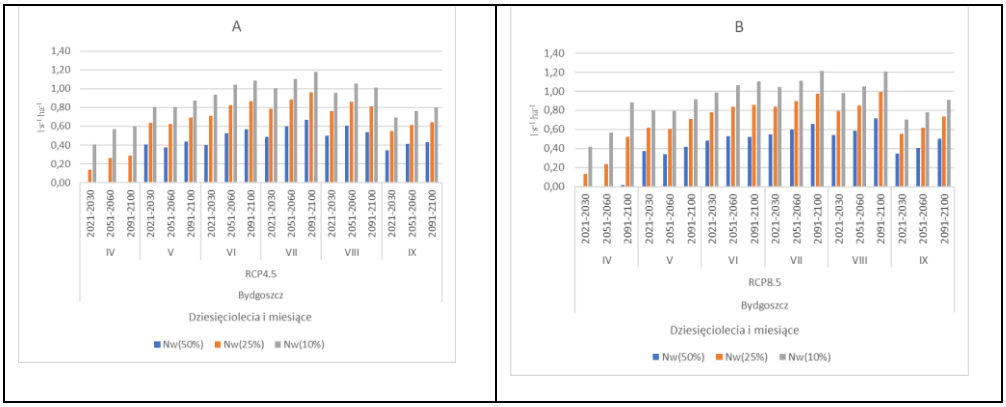
śród czterech badanych miast województwa kujawsko-pomorskiego, najniższe zapotrzebowanie na wodę wystąpiło w Grudziądzu, wyższe w Bydgoszczy, jeszcze wyższe w Toruniu, a najwyższe – we Włocławku. Potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej wzrastały także w zależności od kategorii posuszności lat. Najniższe były one w latach przeciętnych (prawdopodobieństwo ich wystąpienia wynosi p=50%), nieco wyższe w latach średnio suchych (p=25%), a największe w latach bardzo suchych (p=10%). Przykładowo, w dziesięcioleciu 2091-2100, w lipcu, potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej w latach bardzo suchych – wyrażone jako dopływ jednostkowy – odpowiednio dla scenariusza RCP4.5 i RCP8.5 wyniosły 0,59 i 0,61 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Bydgoszczy, 0,62 i 0,63 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Toruniu oraz 0,63 i 0,64 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ we Włocławku. Jedynie w Grudziądzu potrzeby wodne kształtowały się odwrotnie, odpowiednio dla scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5 wynosząc 0,60 i 0,59 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ dla lipca; w sierpniu natomiast wyniosły one odpowiednio 0,52 i 0,60 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$.





Rysunek 3. Zapotrzebowanie na wodę w nawadnianiu podsiąkowym o stałym zwierciadle wody
Figure 3. Water demand in upward irrigation with a constant water table.

Zapotrzebowanie na wodę do nawadniania terenów zieleni miejskiej systemem podsiąkowym o zmiennym piętrzeniu dla czterech wybranych miast i dwóch przyjętych scenariuszy zmian klimatu przedstawiono na rys. 4. Najniższe potrzeby wodne – a w konsekwencji zapotrzebowanie na wodę w systemie nawodnień podsiąkowych o zmiennym zwierciadle wody gruntowej – stwierdzono w latach przeciętnych (p=50%), nieco wyższe w latach średnio suchych (p=25%), a największe w latach bardzo suchych (p=10%). Podobnie jak to było przy nawadnianiu podsiąkowym o stałym piętrzeniu, największe ilości wody do nawadniania będą potrzebne w ostatnim dziesięcioleciu XXI wieku. Największe zapotrzebowanie na wodę występowało w lipcu, a następnie - w sierpniu. Wyższe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej – w porównaniu do scenariusza RCP 4.5 – (za wyjątkiem Grudziądza) stwierdzono w scenariuszu RCP 8.5. Spośród czterech badanych miast województwa kujawsko-pomorskiego, najniższe zapotrzebowanie na wodę wystąpiło w Grudziądzu, wyższe w Bydgoszczy, jeszcze wyższe w Toruniu, a najwyższe – we Włocławku. Zatem, w dziesięcioleciu 2091-2100, potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej w lipcu – odpowiednio dla scenariusza RCP4.5 i RCP8.5 – w latach bardzo suchych wyniosły 1,19 i 1,19 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Grudziądzu, 1,18 i 1,21 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Bydgoszczy, 1,23 i 1,25 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Toruniu oraz 1,26 i 1,29 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ we Włocławku.



Rysunek 4. Zapotrzebowanie na wodę w nawadnianiu podsiąkowym o zmiennym zwierciadle wody
Figure 4. Water demand in upward irrigation with variable water table

Większe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej stwierdzono w scenariuszu RCP 8.5, który zakłada wyższe stężenie CO_2 (940 ppm w roku 2100, w porównaniu do 540 ppm w scenariuszu RCP 4.5). W konsekwencji scenariusz RCP 8.5 zakłada wystąpienie wyższych wartości temperatury powietrza. Przykładowo, według wykorzystanych w niniejszej publikacji informacji zamieszczonych na stronie Klimada 2.0, średnia miesięczna temperatura lipca w dziesięcioleciu 2091-2100 – odpowiednio dla scenariusza RCP 4.5 i RCP 8.5 – wyniesie: 20,3°C i 21,5°C w Grudziądzu, 20,6°C i 21,9°C w Bydgoszczy, 20,8°C i 22,0°C w Toruniu oraz 21,0°C i 22,3°C we Włocławku. Strużewska i in. (2020) podają, że według scenariusza RCP 4.5 temperatura średnia roczna na terenie Polski wzrośnie w ciągu stulecia o 1,3°C, natomiast według scenariusza RCP 8.5 trend wzrostowy średniej rocznej temperatury będzie znacznie silniejszy. Najszybszy wzrost prognozowany jest – według cytowanego zespołu autorów – w latach 2025 - 2040, po czym na około dekadę ulega stabilizacji. Po roku 2050 temperatura średnia roczna wykazuje silny trend wzrostowy prowadzący do zwiększenia średnich rocznych temperatur na obszarze Polski o ponad 3°C (w stosunku do dekady 2011-2020).

DYSKUSJA

Stwierdzone w niniejszej pracy prawidłowości znajdują potwierdzenie w literaturze. Przykładowo Łabędzki (2009a,b) podaje, że w Polsce można spodziewać się wzrostu temperatury powietrza w zakresie od 2 do 4°C. Można w tym miejscu odnotować, że większość scenariuszy zmian klimatycznych dla Polski nie przewiduje wzrostu sumy opadów w ciągu roku. Można natomiast – w ich świetle – spodziewać się wzrostu opadów zimowych, a zmniejszenia opadów letnich (Alcamo i in. 2007, EEA 2008, IPCC 2007, Kundzewicz 2003, 2007, Parry 2000, Randall i in. 2007). Podobne scenariusze zmian klimatycznych – nie uwzględnione w niniejszym opracowaniu – dotyczą również interesującego nas obszaru województwa kujawsko-pomorskiego, tak w odniesieniu do temperatury (Bąk i Łabędzki 2014a), jak i opadów atmosferycznych (Bąk i Łabędzki 2014b).

Wyższe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej stwierdzone we Włocławku i następnie w Toruniu, a niższe w Grudziądzu i Bydgoszczy. Wytłumaczenia tego – poza wzrostem temperatury powietrza – można także upatrywać w nieco większych sumach opadów, które przewidywane są w Grudziądzu, a niższe

we Włocławku. Wpływa to w konsekwencji na większe ilości wody, które muszą być zagwarantowane poprzez systemy irygacyjne (w tym przypadku system nawodnień podsiąkowych). W przykładach, które uzyskano w wyniku przeprowadzonych, podano najwyższe wartości zapotrzebowania na wodę do nawodnień – dla lat bardzo suchych (p=10%). Uwzględnienie tych wyników oznacza, że zaprojektowane w oparciu o te liczby systemy nawodnień będą w stanie zabezpieczyć 90% zapotrzebowania danego terenu zieleni miejskiej na wodę.

Liczni autorzy są zgodni co do tego, że – wraz z nasilaniem się niekorzystnych zmian klimatycznych – w Polsce będzie wzrastać znaczenie nawodnień, zwłaszcza w Polsce centralnej (Kuchar i Iwański 2011, Kuchar i Iwański 2013, Kuchar i in. 2015, Kuchar i in. 2017, Łabędzki 2009a,b, Łabędzki i in. 2013, Stachowski i Markiewicz 2011). Pływaczyk i Kowalczyk (2007) zwracają uwagę na to, że – uwzględniony w niniejszej pracy – system nawodnień podsiąkowych, może być jednym z zalecanych systemów nawadniania na terenach zurbanizowanych przyczyniając się w efekcie do racjonalnego gospodarowania wodą na terenach zieleni miejskiej położonych na obszarze o niezbyt głęboko zalegającej wodzie gruntowej (nie głębiej niż 0,8-1,0 m poniżej poziomu gruntu).

Powstaje problem zabezpieczenia odpowiednich ilości wód dyspozycyjnych do prowadzenia nawodnień według przyjętych założeń. Wojciechowska i in. (2015) podają, że na terenach zurbanizowanych wprowadza się zrównoważone gospodarowanie wodą deszczową. Zgodnie z nowoczesnym podejściem woda deszczowa przestaje być uważana za „niepotrzebną" czy „niechcianą". W wielu krajach, zarówno tych o ograniczonych zasobach wodnych, jak i rozwiniętych (np. Dania, Szwecja, Niemcy) woda deszczowa zaczyna być postrzegana jako cenny zasób, nadający się do ponownego wykorzystania np. do nawadniania terenów zieleni miejskiej. Wody opadowe powinny być zatem w możliwie dużym stopniu wykorzystywane w miejscu wystąpienia opadu, a dopiero ich nadmiar może być kierowany dalej do kolejnych elementów systemu takich jak retencja krajobrazowa, urządzenia wodne – przede wszystkim te w najmniejszym stopniu ingerujące w przyrodę – oraz zbiorniki retencyjne (preferowane powinny być zbiorniki otwarte z infiltracją i zielenią). Zasadnicze znaczenie ma spowolnienie odpływu oraz zatrzymanie jak największej ilości wody w lokalnej zlewni miejskiej (Hajto i in. 2023, Wojciechowska i in. 2015).

PODSUMOWANIE

Na podstawie przyjętych założeń i przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że największe ilości wody do nawadniania będą potrzebne w ostatnim dziesięcioleciu XXI wieku. Największe zapotrzebowanie na wodę wystąpi w lipcu, a następnie - w sierpniu. Wyższe potrzeby wodne terenów zieleni miejskiej – w porównaniu do scenariusza RCP 4.5 – (za wyjątkiem Grudziądza) stwierdzono w scenariuszu RCP 8.5. Spośród czterech badanych miast województwa kujawsko-pomorskiego, najniższe zapotrzebowanie na wodę wystąpiło w Grudziądzu, wyższe w Bydgoszczy, jeszcze wyższe w Toruniu, a najwyższe – we Włocławku.

W dziesięcioleciu 2091-2100, wyrażone jako dopływ jednostkowy, zapotrzebowanie na wodę do nawadniania terenów zieleni miejskiej systemem podsiąkowym o zmiennym piętrzeniu w lipcu – odpowiednio dla scenariusza RCP 4.5 i RCP 8.5 w latach bardzo suchych (p=10%), wyniesie 1,19 i 1,19 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Grudziądzu, 1,18 i 1,21 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Bydgoszczy, 1,23 i 1,25 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ w Toruniu oraz 1,26 i 1,29 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ we Włocławku.

LITERATURA

1. Alcamo, J., J.M. Moreno J.M., Nováky B., Hindi M., Corobov R., Devoy R.J.N., Giannakopoulos C., Martin E., Olesn J.E., Shvidenko A. Europe. 2007. Climate Change 2007. *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007, 541-580.
2. Bąk B., Łabędzki L. 2014a. *Thermal conditions in Bydgoszcz region in growing seasons 2011–2050 in view of expected climate change*. Journal of Water and Land Development, 23, 21-29.
3. Bąk B., Łabędzki L. 2014b. Prediction of precipitation deficit and excess in Bydgoszcz region in view of predicted climate change. Journal of Water and Land Development, 23, 11-19.
4. EEA. 2008. *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment*. Joint EEA-JRC-WHO report. Report No 4/2008, 2008.
5. Grabarczyk. S. 1989. *Potrzeby wodne użytków zielonych i traw.* W: *Potrzeby wodne roślin* (J. Dzieżyc-red.), PWN Warszawa, 189-226.
6. Hajto M., Bidłasik M., Kuśmierz A., Marcinkowski M., Potapowicz I., Rajkowska B., Romańczak A., Ewelina Siwiec E. 2023. *Podręcznik adaptacji dla miast. Aktualizacja 2023. Wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu*. IOŚ-PIB, s. 1-109.
7. IPCC. 2007. The Fourth Assessment Report of the IPCC (AR4). *Intergovernmental Panel on Climate Change.* 2007.
8. Kaca E., Rek-Kaca G. 2019. *Względna przyrodnicza zasadność rozwoju nawodnień w skali województw w Polsce.* Materiały Konferencyjne XXIII Sympozjum Nawadniania Roślin „Nawadnianie roślin w świetle zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich" – aspekty przyrodniczo-produkcyjne i techniczno-infrastrukturalne, 11-14 czerwca 2019, Bydgoszcz-Fojutowo, 33-35.
9. Kuchar, L.; Iwański, S. 2011. *Rainfall simulation for the prediction of crop irrigation in future climate*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas 2011, 5, 7–18.
10. Kuchar, L.; Iwański, S. 2013. *Rainfall evaluation for crop production until 2050-2060 and selected climate change scenarios for North Central Poland*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas 2013, 2(I), 187–200.

11. Kuchar, L.; Iwański, S.; Diakowska, E.; Gąsiorek, E. 2015. *Simulation of hydrothermal conditions for crop production purpose until 2050-2060 and selected climate change scenarios for North Central Poland*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas 2015, II(1), 319–334.
12. Kuchar, L.; Iwański, S.; Diakowska, E.; Gąsiorek, E. 2017. *Assessment of meteorological drought in 2015 for North Central part of Poland using hydrothermal coefficient (HTC) in the context of climate change*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas 2017, I(2), 257–273.
13. Kundzewicz Z. 2007. *Projekcje zmian klimatu – ekstrema hydrometeorologiczne*. I Polska Konferencja ADAGIO, Poznań 24 kwietnia 2007.
14. Kundzewicz Z. 2003. *Scenariusze zmian klimatu. W: Czy Polsce grożą katastrofy klimatyczne?.* Komitet Prognoz „Polska 200 Plus", Polski Komitet Międzynarodowego Programu „Zmiany Globalne Geosfery i Biosfery" przy Prezydium PAN, Warszawa, 2003, 14-31.
15. Łabędzki L. 2009a. *Foreseen climate changes and irrigation development in Poland*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas, 3, 7-18.
16. Łabędzki L. 2009b. *Expected development of irrigation in Poland in the context of climate change*. Journal of Water and Land Development, 13b, 17-29.
17. Ostromęcki J. 1973. *Podstawy melioracji nawadniających*. Warszawa: PWN, 1-450.
18. Parry M.L. (ed.). 2000. *Assessment of potential effects and adaptation for climate change in Europe: The Europe ACACIA Project*. Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich United Kingdom, 2000, pp. 324.
19. Pływaczyk A., Kowalczyk T. 2007. *Gospodarowanie wodą w krajobrazie*. Wyd. UP we Wrocławiu, 1-126.
20. Randall, D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. 2007. *Climate models and their evaluation. W: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA. 2007.

21. Strużewska J., Jefimow M., Jagiełło P., Kłeczek M., Sattari A., Gienibor A., Norowski A., Durka P., Walczak B., Drzewiecki P. 2020. *Zmiany temperatury i opadu na obszarze Polski w warunkach przyszłego klimatu do roku 2100 (Raport skrócony)*. Wyd. IOŚ-PIB, s. 1-31.
22. Tabaszewski, J. 1980. *Elementy inżynierii wodnej*. Wyd. ART Olsztyn, 1-189.
23. Wojciechowska E., Gajewska M., Żurkowska N., Surówka M., Obarska-Pempkowiak H. 2015. Zrównoważone systemy gospodarowania wodą deszczową. Wyd. Politechniki Gdańskiej, 1-147.
24. Żakowicz, S. 2010. *Podstawy technologii nawadniania rekultywowanych składowisk odpadów komunalnych*, Wyd. SGGW Warszawa, 1-96.
25. Żakowicz, S.; Hewelke, P. 2002. *Podstawy inżynierii środowiska*. Wyd. SGGW Warszawa, 1-192.
26. Żakowicz, S.; Hewelke, P.; Gnatowski, T. 2009. *Podstawy infrastruktury technicznej w przestrzeni produkcyjnej*. Wyd. SGGW

Autor do korespondencji: Prof. dr hab. inż. Stanisław Rolbiecki
ORCID: 0000-0002-1433-2212

email: Stanislaw.Rolbiecki@pbs.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Roman Rolbiecki
ORCID: 0000-0001-6230-4227
e-mail: rolbr@pbs.edu.pl

dr inż. Renata Kuśmierek-Tomaszewska
ORCID: 0000-0002-2333-376X
email: rkusmier@pbs.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Jacek Żarski
ORCID: 0000-0002-5098-4242

Mgr inż. Ariel Łangowski
ORCID: 0000-0002-3459-8990

Politechnika Bydgoska im. J. J. Śniadeckich
Pracownia Melioracji i Agrometeorologii
Al.. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

Otrzymano: 20.11.2023 r.
Zwrócono po recenzji: 19.12.2023 r.
Zaakceptowano: 22.12.2023 r.