INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

2025, Vol. 20(1), 89–108
e-ISSN: 2956-7971, License CC-BY 4.0

DOI: https://doi.org/10.14597/infraeco.2025.006

POTRZEBY WODNE BURAKA CUKROWEGO W POWIECIE CHEŁMIŃSKIM W ŚWIETLE PRZEWIDYWANYCH ZMIAN KLIMATU

WATER NEEDS OF SUGAR BEET IN THE CHEŁMNO COUNTY DEPENDING ON EXPECTED CLIMATE CHANGES

Stanisław ROLBIECKI [1]***, Piotr MIETŁA***

STRESZCZENIE

Celem pracy była próba oszacowania zapotrzebowania na wodę u buraka cukrowego w powiecie chełmińskim w zależności od przewidywanych zmian klimatycznych. W opracowaniu uwzględniono dwa scenariusze (RCP 4.5 i RCP 8.5) dla okresu 2021-2100. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że najwięcej wody rośliny buraka – dla prawidłowego przebiegu wzrostu i rozwoju – będą wymagać w lipcu. Dobowe zapotrzebowanie na wodę w tym miesiącu – odpowiednio w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych – wyniesie 4,3 mm, 4,7 mm i 5,2 mm w świetle scenariusza RCP4.5, natomiast w zgodnie ze scenariuszem RCP8.5 będą one większe – odpowiednio na poziomie 4,4 mm, 4,9 mm i 5,3 mm. Potrzeby wodne buraka cukrowego w całym okresie wegetacji (21 IV – 30 IX), jeśli zmiany klimatyczne przebiegną według scenariusza RCP4.5 – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosą odpowiednio 475 mm, 523 mm i 570 mm. Natomiast zgodnie ze scenariuszem RCP8.5 będą one większe, kształtując się na poziomie odpowiednio 492 mm, 541 mm i 590 mm. Z równań regresji liniowej, które wyznaczono dla okresu prognozowanego (2021-2100) wynika, że należy oczekiwać zwiększenia się potrzeb wodnych buraka cukrowego. Odpowiednio dla scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5, potrzeby wodne buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 IV – 30 IX) będą w każdym dziesięcioleciu wzrastać o 4,1 mm i 10,3 mm. Niedobory opadu w całym okresie wegetacji buraka cukrowego – w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5 w latach średnich, suchych i bardzo suchych – będą wynosić odpowiednio 141 mm, 246 mm i 327 mm, natomiast w scenariuszu RCP8.5 będą one większe, kształtując się na poziomie odpowiednio 145 mm, 251 mm i 336 mm. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że średnio dla osiemdziesięciolecia 2021-2100 – większe przyrosty plonu korzeni buraka cukrowego (37,3 t/ha) będą możliwe do uzyskania poprzez deszczowanie, jeśli zmiany klimatyczne będą przebiegały według scenariusza RCP4.5 aniżeli w scenariuszu RCP8.5 (35,3 t/ha).

[1] *Politechnika Bydgoska im. J. J. Śniadeckich, Polska*

Słowa kluczowe: *burak cukrowy, potrzeby wodne, niedobory opadu, nawadnianie, zmiany klimatu*

ABSTRACT

The aim of this study was to estimate the water demand for sugar beet in Chełmno County, depending on projected climate change. The study considered two scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) for the period 2021-2100. Based on the calculations, it was concluded that sugar beet plants will require the most water in July for proper growth and development. Daily water demand in this month – in average, moderately dry and very dry years, respectively – will be amounted 4.3 mm, 4.7 mm and 5.2 mm under the RCP4.5 scenario, while in the RCP8.5 scenario they will be higher – at 4.4 mm, 4.9 mm and 5.3 mm, respectively. Sugar beet water needs throughout the growing season (April 21 – September 30), if climate change unfolds according to the RCP4.5 scenario – in average, dry, and very dry years – will be amounted 475 mm, 523 mm, and 570 mm, respectively. However, under the RCP8.5 scenario, they will be higher, reaching 492 mm, 541 mm, and 590 mm, respectively. The linear regression equations determined for the forecast period (2021-2100) indicate that the water needs of sugar beet are expected to increase. For the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the water needs of sugar beet during the growing season (April 21–September 30) will increase by 4.1 mm and 10.3 mm in each decade. Rainfall deficiencies throughout the sugar beet growing season – according to the RCP4.5 climate change scenario – in average, dry and very dry years – will amount to 141 mm, 246 mm and 327 mm, respectively, while in the RCP8.5 scenario they will be greater, reaching 145 mm, 251 mm and 336 mm, respectively. The calculations show that – on average for the eighty-year period 2021-2100 – higher increases in sugar beet root yield (37.3 t/ha) will be possible to achieve due to irrigation if climate change proceeds according to the RCP4.5 scenario than in the RCP8.5 scenario (35.3 t/ha).

Keywords*: sugar beet, water needs, rainfall deficit, irrigation, climate changes*

WSTĘP

Zmiany klimatyczne, obserwowane zarówno w skali globalnej, jak i lokalnej, coraz silniej wpływają na funkcjonowanie rolnictwa – sektora szczególnie wrażliwego na zmienność warunków meteorologicznych (Bąk i Łabędzki 2014a,b). Wzrost średnich temperatur, zmiany rozkładu i ilości opadów oraz częstsze występowanie okresów suszy stanowią poważne wyzwania dla stabilności plonowania wielu gatunków uprawnych, w tym buraka cukrowego, który jest jedną z kluczowych roślin przemysłowych w Polsce.

Burak cukrowy, ze względu na swoją wysoką wrażliwość na niedobory wody, wymaga odpowiednio zbilansowanego nawodnienia w kluczowych fazach rozwojowych (Dmowski i in. 2011; Żarski i in. 2020). W warunkach coraz bardziej nieregularnych i niewystarczających opadów atmosferycznych, identyfikacja rzeczywistych potrzeb wodnych tej rośliny

oraz oszacowanie deficytów wodnych w sezonie wegetacyjnym staje się koniecznością, zwłaszcza w regionach intensywnej produkcji rolniczej, takich jak powiat chełmiński.

Celem niniejszej pracy jest analiza potrzeb wodnych buraka cukrowego, identyfikacja niedoborów opadów oraz ocena konieczności stosowania nawadniania w warunkach powiatu chełmińskiego, z uwzględnieniem prognozowanych zmian klimatycznych. Przeprowadzona analiza pozwoli lepiej zrozumieć, jak przyszłe warunki klimatyczne mogą wpłynąć na wymagania wodne tej uprawy oraz jak należy dostosować praktyki rolnicze, by zapewnić jej optymalne warunki wzrostu i rozwoju.

MATERIAŁ I METODY

W pracy posłużono się przewidywanymi średnimi temperaturami miesięcznymi (t; °C) i miesięcznymi sumami opadów (P; mm) dla powiatu chełmińskiego. Dane te uzyskano z portalu Klimada 2.0 [https://klimada2.ios.gov.pl/klimat-scenariusze-portal/] dla 2 scenariuszy zmian klimatycznych (RCP4.5 oraz RCP8.5)(rys. 1). Pierwszy scenariusz – RCP4.5 – jest scenariuszem umiarkowanym, który zakłada wzrost stężenia CO2 do poziomu 540 ppm w roku 2100 (osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 4.5 W/m^2). Drugi scenariusz – RCP 8.5 – jest scenariuszem ekstrapolacyjnym, który zakłada wzrost stężenia CO_2 do poziomu 940 ppm w roku 2100 (osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 8.5 W/m^2). Uwzględniono sześć miesięcy (3. dekada kwietnia, maj, czerwiec, lipiec, sierpień, wrzesień) dla 8 następujących dziesięcioleci XXI wieku: 2021-2030, 2031-2040, 2041-2050, 2051-2060, 2061-2070, 2071-2080, 2081-2090, 2091-2100.

Potrzeby wodne buraka cukrowego – na podstawie temperatury powietrza – obliczono wykorzystując metodę współczynników roślinnych (Allen i in. 1998, Łabędzki i in. 1996). W metodzie tej potrzeby wodne roślin (np. buraka cukrowego) utożsamiane są z ewapotranspiracją potencjalną (ETp).

ETp buraka cukrowego obliczono zatem ze wzoru:

$$ET = kc \cdot ETo \qquad (1)$$

gdzie;
kc – współczynnik roślinny dla buraka cukrowego
ETo – ewapotranspiracja wskaźnikowa (mm).

Współczynnik roślinny (kc) wyznaczono ze wzoru:

$$kc = S/ETo, \qquad (2)$$

gdzie:
S – polowe zużycie wody przez rośliny buraka cukrowego – przyjęte jako ewapotranspiracja rzeczywista (ETr) wyznaczona wzorem Penmana-Monteitha.

ETo policzono ze wzoru:

$$ETo = n \cdot \alpha \cdot t, \quad (3)$$

gdzie:
n – liczba dni w miesiącu,
α – współczynnik empiryczny wyznaczony przez Tredera (www.nawadnianie.inhort) (tab. 1),
t – średnia miesięczna temperatura powietrza (°C).

Tabela 1. Wartości współczynnika α do wzoru na ETo, według Tredera
Table 1. Values of α coefficient for ETo formula according to Treder

Wyszczególnienie	
Miesiąc	**α**
IV	0,28
V	0,21
VI	0,19
VII	0,18
VIII	0,17
IX	0,16

Wielkość niedoborów opadu (N) dla buraka cukrowego w roku średnim ($N_{50\%}$), średnio suchym ($N_{25\%}$) i bardzo suchym ($N_{10\%}$) wyznaczono metodą Ostromęckiego (Ostromęcki 1973; Tabaszewski 1980; Żakowicz i Hewelke 2002; Żakowicz i in. 2009).

$$N_{p\%} = A_{p\%} \cdot ETp - B_{p\%} \cdot P \quad (4)$$

gdzie;
$N_{p\%}$ – niedobór opadu o prawdopodobieństwie pojawienia się równym p % (mm·okres^{-1}),
ETp – średnia z wielolecia wysokość ewapotranspiracji potencjalnej 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.

Wyniki opracowano statystycznie wyznaczając wartości: średnią, zwyczajną (medianę), maksymalną i minimalną oraz odchylenie standardowe (SD) i współczynnik zmienności (VC), czyli stosunek odchylenia standardowego do średniej. Podjęto także próbę określenia ewentualnych tendencji (trendów) zmian badanego wskaźnika potrzeb wodnych buraka cukrowego w powiecie chełmińskim – z wykorzystaniem

analizy regresji liniowej, z wyznaczeniem współczynników determinacji (R^2). Wychodząc z definicji współczynnika determinacji (Rudnicki 1992), że jest to kwadrat współczynnika korelacji, wartości współczynników korelacji (r) wyznaczono z zależności:

$$r = \sqrt[2]{R_2} \tag{5}$$

Istotność współczynników korelacji, przy liczebności próby n=8, wyznaczono dla poziomu ufności α =0.1, α =0.05, α =0.02, α =0.01 i α =0.001. Dla liczby stopni swobody *j*=6 (ponieważ *j*=n-2) wartości krytyczne współczynnika korelacji (r) – odpowiednio dla poziomu ufności (α)wynoszącego α =0.1, α =0.05, α =0.02,α =0.01, α =0.001były równe: 0.6215, 0.7067, 0.7887, 0.8343 i 0.92493 (Platt 1978).

Prognozowanie przyrostu plonów korzeni buraka cukrowego możliwych do uzyskania w warunkach nawadniania deszczownianego przeprowadzono podstawie zależności przedstawionej w pracy Kuśmierek-Tomaszewskiej i in. (2023). Wzór opisujący tę zależność ma postać:

$$\Delta Q = 0{,}356\ (241 - P_{rz}) \tag{6}$$

gdzie:
ΔQ – przyrost plonu korzeni buraka cukrowego pod wpływem deszczowania (t/ha)
P_{rz} – opady rzeczywiste w okresie wzmożonego zapotrzebowania roślin buraka cukrowego (VII-VIII) na wodę (mm)

WYNIKI

Z analizy danych zawartych w tabeli 2 wynika, że większą zmiennością – tak bezwzględną, jak i względną – cechowały się potrzeby wodne buraka cukrowego w scenariuszu RCP8.5. Świadczą o tym wyższe wartości odchylenia standardowego (SD) oraz współczynnika zmienności (VC) w każdym z sześciu rozpatrywanych miesięcy okresu wegetacji oraz w całym okresie wegetacji.

Tabela 2. Statystyczna charakterystyka potrzeb wodnych buraka cukrowego (Etp; mm) w zależności od scenariusza zmian klimatycznych
Table 2. Statistical characteristics of water needs for sugar beet (Etp; mm) depending on the climate change scenario

Miara statystyczna	Miesiące okresu wegetacji						
	21-30 IV	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**21 IV – 30 IX**
Scenariusz zmian klimatu RCP 4.5							
Minimum	9,80	56,08	94,07	127,93	105,30	60,46	453,63
Maksimum	11,69	62,07	100,79	137,31	111,60	65,46	487,56
Mediana	10,83	59,50	98,48	133,12	109,67	63,58	475,17
Średnia	10,86	59,29	99,11	133,62	110,17	63,37	477,53
SD	0,584	1,968	2,248	2,859	2,183	1,726	10,950
VC (%)	5,4	3,3	2,3	2,1	2,0	2,7	2,3
Scenariusz zmian klimatu RCP 8.5							
Minimum	10,15	58,22	95,19	128,60	105,30	60,87	458,33
Maksimum	13,34	67,21	106,94	145,34	123,04	73,38	529,26
Średnia	11,70	61,48	101,49	136,72	113,82	66,81	492,01
Mediana	11,69	60,78	101,35	135,30	112,74	66,92	488,77
SD	1,016	3,078	4,272	6,508	6,434	4,495	25,485
VC (%)	8,7	5,0	4,2	4,8	5,7	6,7	5,2

SD – odchylenie standardowe; *VC* – współczynnik zmienności

Wyznaczenie współczynnika kc do wzoru Tredera

Zgodnie z podaną w rozdziale „Materiał i metody" formułą wyznaczono wartości współczynnika roślinnego (kc) dla poszczególnych miesięcy okresu wegetacji buraka cukrowego. Wartość współczynnika kc wzrastała od 0,42 w trzeciej dekadzie kwietnia do 1,2 w lipcu, by następnie zmniejszać się do wartości 0,87 we wrześniu (tab. 3).

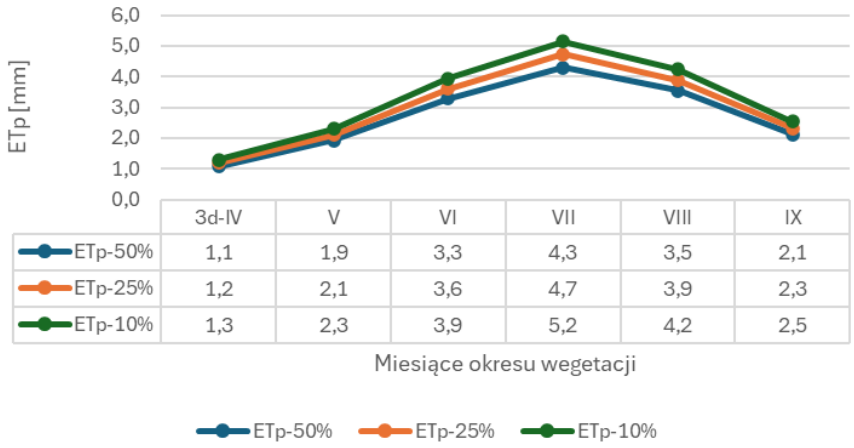
Tabela 3. Wartości współczynnika roślinnego (kc) do wzoru Tredera wyznaczonych na podstawie ETr (S) według Penmana-Monteitha
Table 3. Values of crop coefficient (kc) for Treder formula on the base of ETr (S) according to Penman-Monteith

Wyszczególnienie	3d-IV	V	VI	VII	VIII	IX
S = ETr wg P-M	10,39	61,40	96,25	130,89	108,06	58,30
ETo wg Tredera	24,94	93,50	97,86	108,76	99,38	67,03
kc = ETr/ETo	0,42	0,66	0,98	1,20	1,09	0,87

Potrzeby wodne buraka cukrowego

Dobowe potrzeby wodne

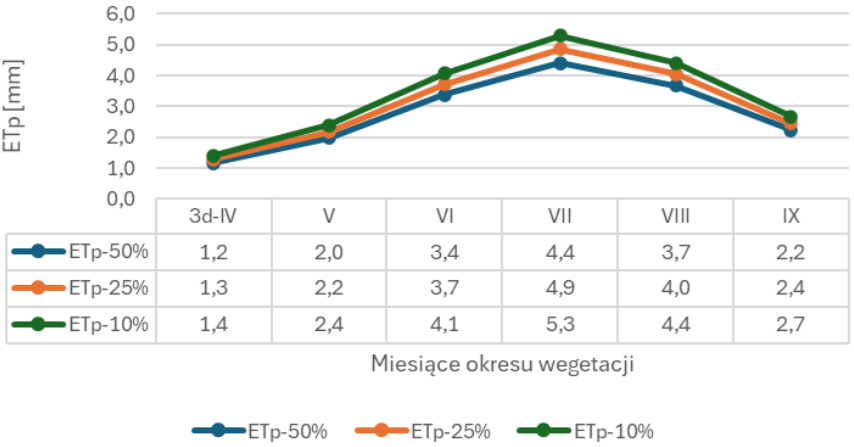
Na rysunku 1 przedstawiono przebieg dobowych potrzeb wodnych buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji – w latach średnich (z prawdopodobieństwem wystąpienia p = 50%), średnio suchych (odpowiednio: p = 25%) i bardzo suchych (p = 10%) w świetle scenariusza RCP4.5. Najwięcej wody rośliny buraka – dla prawidłowego przebiegu wzrostu i rozwoju – będą wymagać w lipcu. Dobowe zapotrzebowanie na wodę w tym miesiącu – odpowiednio w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych – wyniesie 4,3 mm, 4,7 mm i 5,2 mm.



Rysunek 1. Dobowe potrzeby wodne buraka cukrowego (ETp; mm) w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, suchych i bardzo suchych w zależności od zmian klimatu według scenariusza RCP4.5

Figure 1. Daily values of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP4.5

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg dobowych potrzeb wodnych buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji – w latach średnich (z prawdopodobieństwem wystąpienia p = 50%), średnio suchych (odpowiednio: p = 25%) i bardzo suchych (p = 10%) w świetle scenariusza RCP8.5. Najwięcej wody rośliny buraka – dla prawidłowego przebiegu wzrostu i rozwoju – będą wymagać w lipcu. Dobowe zapotrzebowanie na wodę w tym miesiącu będzie większe niż w scenariuszu RCP4.5 – odpowiednio w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych – wyniesie 4,4 mm, 4,9 mm i 5,3 mm.

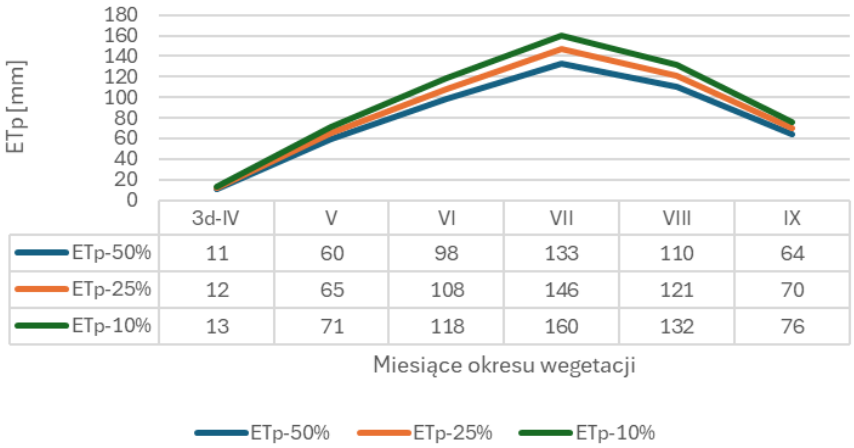


Rysunek 2. Dobowe potrzeby wodne buraka cukrowego (ETp; mm) w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, suchych i bardzo suchych w zależności od zmian klimatu według scenariusza RCP8.5

Figure 2. Daily values of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP8.5

Miesięczne potrzeby wodne

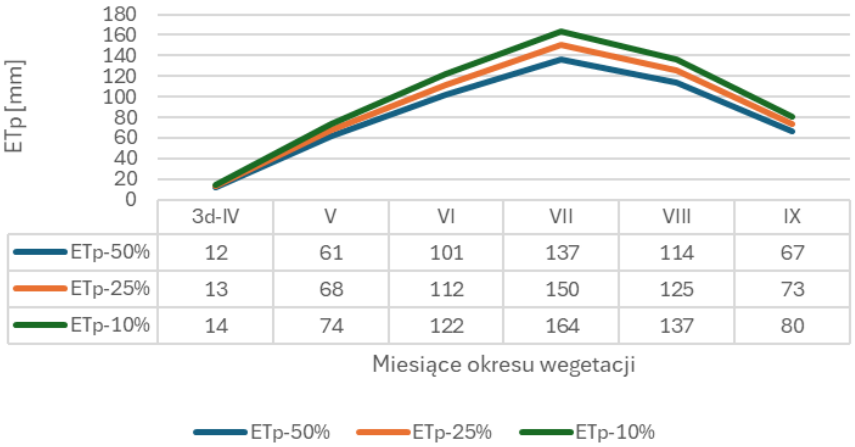
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg miesięcznych sum potrzeb wodnych buraka cukrowego w powiecie chełmińskim w świetle scenariusza RCP4.5. Spośród analizowanych miesięcy okresu wegetacji, najwyższe potrzeby wodne wystąpiły w lipcu, a następnie w sierpniu i czerwcu. W lipcu – dla lat średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły one odpowiednio 133 mm, 146 mm i 160 mm.



Rysunek 3. Miesięczne potrzeby wodne buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5

Figure 3. Monthly values of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP4.5

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg potrzeb wodnych buraka cukrowego w powiecie chełmińskim w świetle scenariusza RCP8.5. Spośród analizowanych miesięcy okresu wegetacji, najwyższe potrzeby wodne wystąpiły w lipcu, a następnie w sierpniu i czerwcu. W lipcu – dla lat średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły one odpowiednio 137 mm, 150 mm i 164 mm.

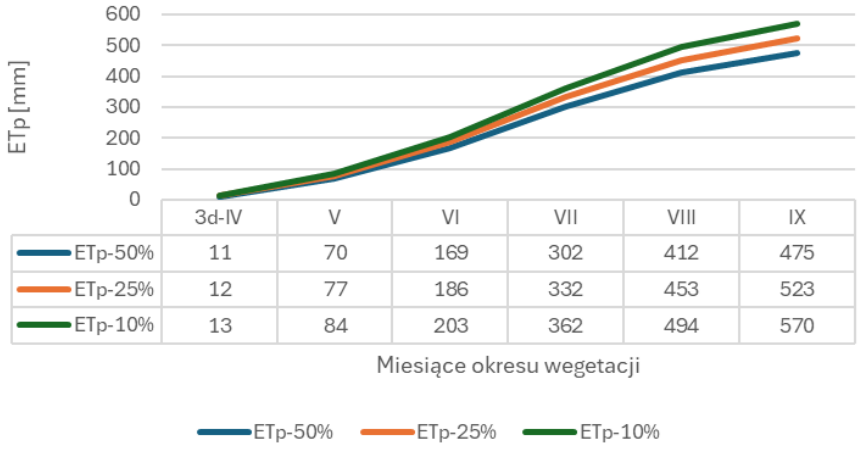


	3d-IV	V	VI	VII	VIII	IX
ETp-50%	12	61	101	137	114	67
ETp-25%	13	68	112	150	125	73
ETp-10%	14	74	122	164	137	80

Rysunek 4. Miesięczne potrzeby wodne buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5

Figure 4. Monthly values of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP8.5

Na rysunku 5 przedstawiono sumowane potrzeby wodne buraka cukrowego w powiecie chełmińskim w świetle scenariusza RCP4.5. Potrzeby te w całym okresie wegetacji buraka (21 IV – 30 IX) – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 475 mm, 523 mm i 570 mm.

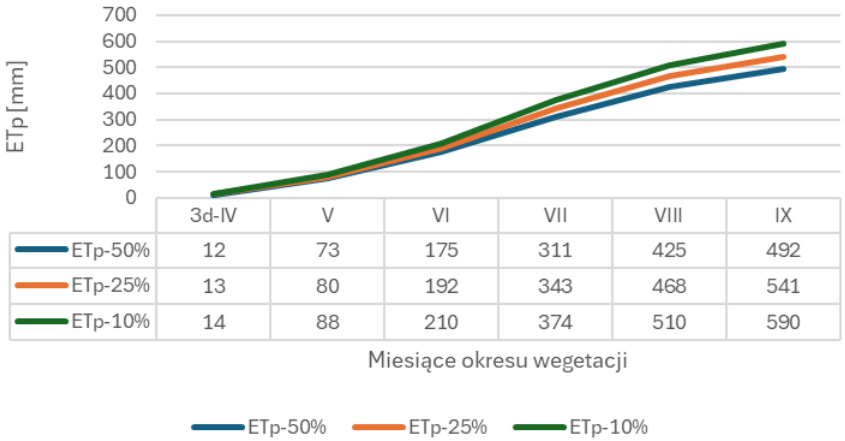


	3d-IV	V	VI	VII	VIII	IX
ETp-50%	11	70	169	302	412	475
ETp-25%	12	77	186	332	453	523
ETp-10%	13	84	203	362	494	570

Rysunek 5. Sumowane potrzeby wodne buraka cukrowego (Etp; mm) w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5

Figure 5. Cumulated sum curve of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP4.5

Na rysunku 6 przedstawiono sumowane potrzeby wodne buraka cukrowego w powiecie chełmińskim w świetle scenariusza RCP8.5. Potrzeby te w całym okresie wegetacji buraka (21 IV – 30 IX) – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 492 mm, 541 mm i 590 mm.

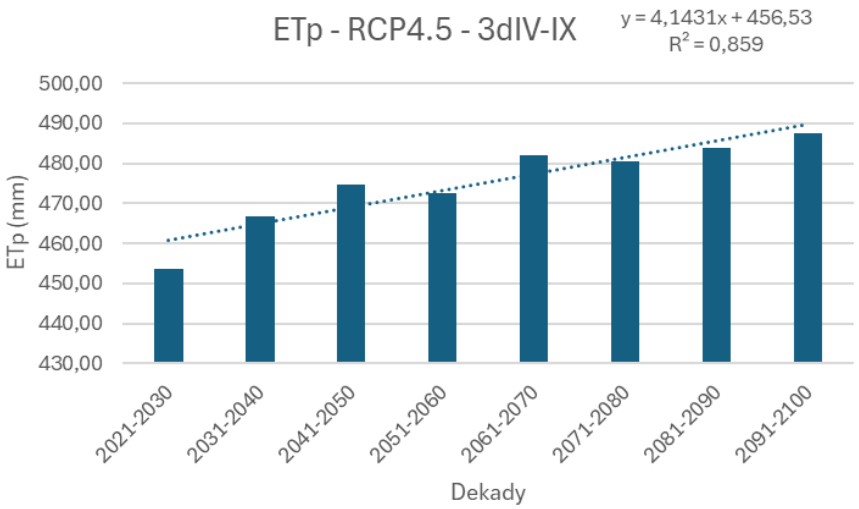


Rysunek 6. Sumowane potrzeby wodne buraka cukrowego (Etp; mm) w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5

Figure 6. Cumulated sum curve of sugar beet water needs (Etp; mm) in the following months of the vegetation period during the average years, medium dry years and very dry years – depending on the climate change scenario RCP8.5

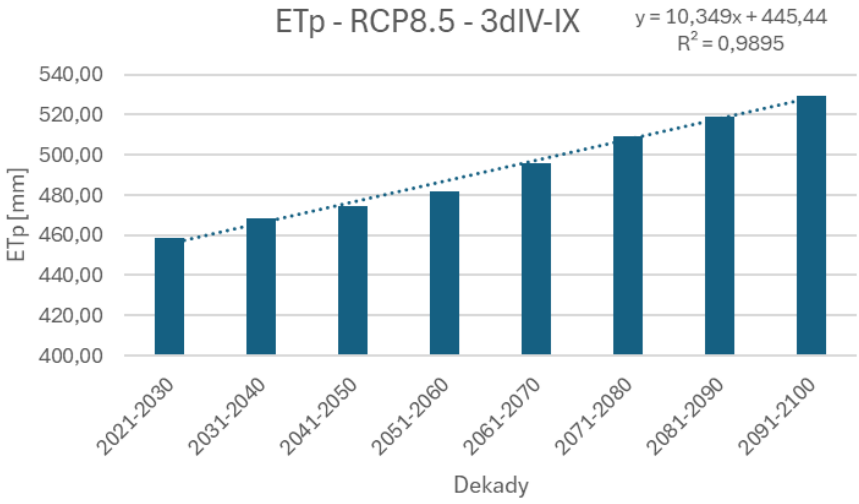
Trendy czasowe potrzeb wodnych

Na rysunku 7 przedstawiono trend czasowy potrzeb wodnych buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 kwiecień-30 wrzesień) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5. Z analizy równania regresji liniowej wynika, że sezonowe potrzeby wodne buraka będą wzrastać w okresie prognozowanym. Wzrost potrzeb wodnych (w okresie wegetacji) w każdym dziesięcioleciu będzie wynosił 4.1 mm.



Rysunek 7. Trend czasowy potrzeb wodnych buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 kwiecień-30 wrzesień) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5
Figure 7. Time trend of sugar beet water needs in the vegetation period (April 21 – September 30) depending on the climate change scenario RCP4.5

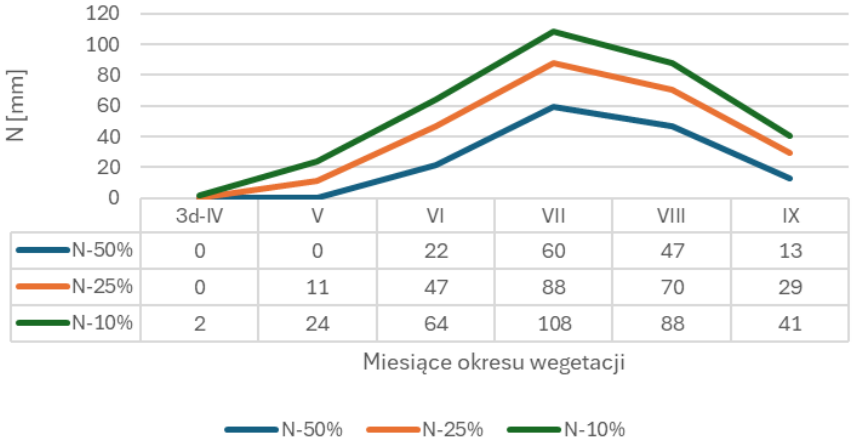
Na rysunku 8 przedstawiono z kolei trend czasowy potrzeb wodnych buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 kwiecień-30 wrzesień) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5. W świetle scenariusza RCP8.5 wzrost potrzeb wodnych buraka cukrowego w okresie wegetacji będzie znacznie większy niż w scenariuszu RCP4.5. Z równania regresji liniowej opisującej trend wzrostowy potrzeb wodnych wynika bowiem, że będą one wzrastać w każdym dziesięcioleciu o 10,3 mm.



Rysunek 8. Trend czasowy potrzeb wodnych buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 kwiecień-30 wrzesień) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5
Figure 8. Time trend of sugar beet water needs in the vegetation period (April 21 – September 30) depending on the climate change scenario RCP8.5

Niedobory opadów

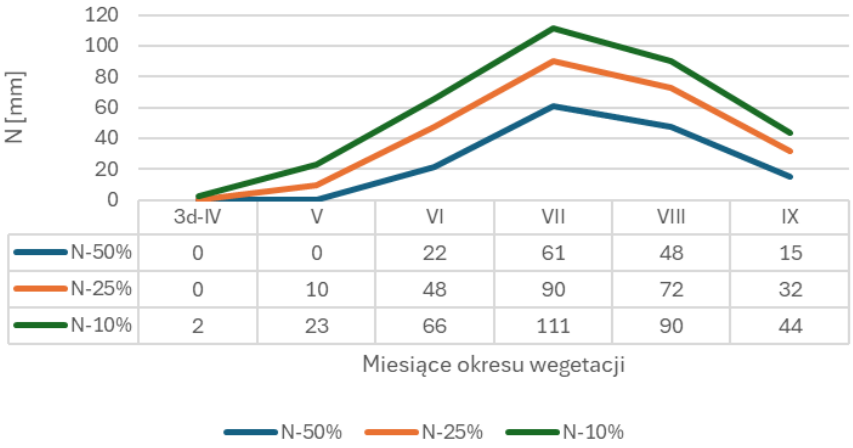
Na rysunku 9 przedstawiono niedobory opadów w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5. Niedobory były największe w lipcu, a następnie w sierpniu oraz czerwcu. Niedobory opadów w lipcu – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 60 mm, 88 mm i 108 mm.



	3d-IV	V	VI	VII	VIII	IX
N-50%	0	0	22	60	47	13
N-25%	0	11	47	88	70	29
N-10%	2	24	64	108	88	41

Rysunek 9. Niedobór opadu (N) w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich ($N_{50\%}$), średnio suchych ($N_{25\%}$) i bardzo suchych ($N_{10\%}$) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5
Figure 9. Rainfall deficiency (N) for sugar beet according to the RCP4.5 scenario for individual months of the growing season in a normal year ($N_{50\%}$), a medium dry year ($N_{25\%}$) and a very dry year ($N_{10\%}$)

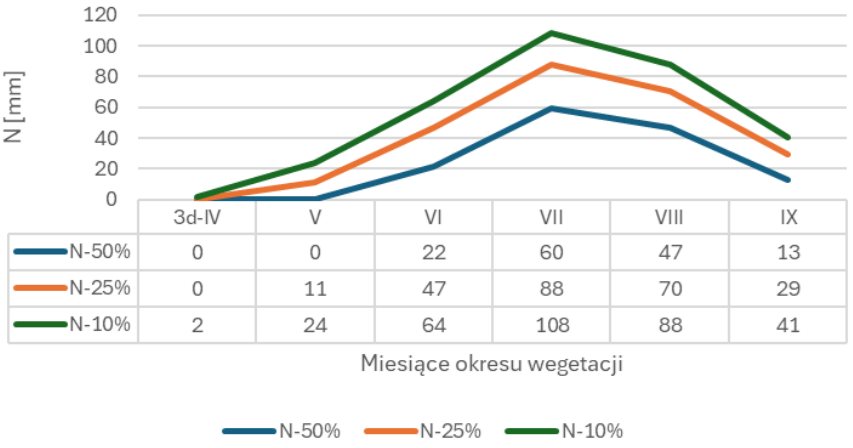
Na rysunku 10 przedstawiono niedobory opadów w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5. Niedobory były największe w lipcu, a następnie w sierpniu oraz czerwcu. Niedobory opadów w lipcu – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 61 mm, 90 mm i 111 mm.



Rysunek 10. Niedobór opadu (N) w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w latach średnich ($N_{50\%}$), średnio suchych ($N_{25\%}$) i bardzo suchych ($N_{10\%}$) w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5

Figure 10. Rainfall deficiency (N) for sugar beet according to the RCP8.5 scenario for individual months of the growing season in a normal year ($N_{50\%}$), a medium dry year ($N_{25\%}$) and a very dry year ($N_{10\%}$)

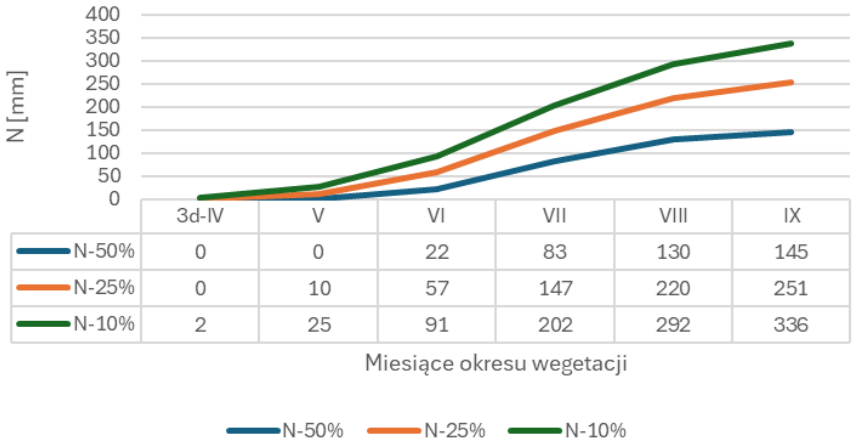
Na rysunku 11 przedstawiono sumowane niedobory opadów w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5. Niedobory te w całym okresie wegetacji – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 141 mm, 246 mm i 327 mm.



Rysunek 11. Krzywa sumowa niedoboru opadu (N) w uprawie buraka cukrowego według scenariusza RCP4.5 w roku średnim ($N_{50\%}$), średnio suchych ($N_{25\%}$) i bardzo suchych ($N_{10\%}$)

Figure 11. Cumulated sum curve of the rainfall deficiency (N) for sugar beet according to the RCP4.5 scenario in a normal year ($N_{50\%}$), a medium dry year ($N_{25\%}$) and a very dry year ($N_{10\%}$)

Na rysunku 12 przedstawiono sumowane niedobory opadów w uprawie buraka cukrowego w kolejnych miesiącach okresu wegetacji w świetle scenariusza zmian klimatu RCP8.5. Niedobory te w całym okresie wegetacji – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosły odpowiednio 145 mm, 251 mm i 336 mm.



Rysunek 12. Krzywa sumowa niedoboru opadu (N) w uprawie buraka cukrowego według scenariusza RCP8.5 w roku średnim ($N_{50\%}$), średnio suchych ($N_{25\%}$) i bardzo suchych ($N_{10\%}$)

Figure 12. Cumulated sum curve of the rainfall deficiency (N) for sugar beet according to the RCP8.5 scenario in a normal year ($N_{50\%}$), a medium dry year ($N_{25\%}$) and a very dry year ($N_{10\%}$)

Prognozowanie przyrostu plonów korzeni buraka cukrowego możliwych do uzyskania w warunkach nawadniania deszczownianego

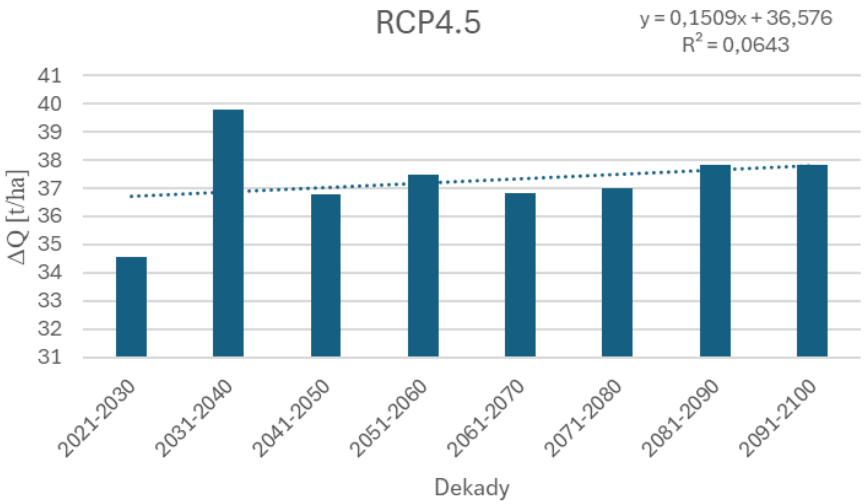
W tabeli 4 przedstawiono możliwe do uzyskania – dzięki nawadnianiu deszczownianemu - zwyżki plonu korzeni buraka cukrowego zależnie od sum opadów atmosferycznych w okresie wzmożonego zapotrzebowania na wodę (1 lipiec-31 sierpień) w poszczególnych dziesięcioleciach okresu 2021-2100 dla dwóch badanych scenariuszy zmian klimatu. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że większe przyrosty plonu korzeni buraka możliwe będą do uzyskania poprzez deszczowanie w scenariuszu RCP4.5 – średnio dla siedemdziesięciolecia 2021-2100 wynoszą one 37,3 t/ha. Drugi analizowany scenariusz zmian klimatu (RCP8.5) generował niższe zwyżki – średnio 35,3 t/ha.

Tabela 4. Porównanie zwyżek plonu korzeni buraka cukrowego (t/ha) możliwych do uzyskania w warunkach prowadzenia nawodnień deszczownianych w kolejnych dziesięcioleciach okresu prognozowanego – w zależności od scenariusza zmian klimatu

Table 4. Comparison of sugar beet root yield increases (t/ha) achievable under sprinkler irrigation conditions in the following decades of the forecast period – depending on the climate change scenario

Wyszczególnienie	**Scenariusz zmian klimatu**	
	RCP4.5	**RCP8.5**
2021-2030	34,6	36,5
2031-2040	39,8	35,0
2041-2050	36,8	35,2
2051-2060	37,5	35,3
2061-2070	36,8	34,7
2071-2080	37,0	36,8
2081-2090	37,8	36,3
2091-2100	37,8	32,6
Średnio dla lat 2021-2100	37,3	35,3

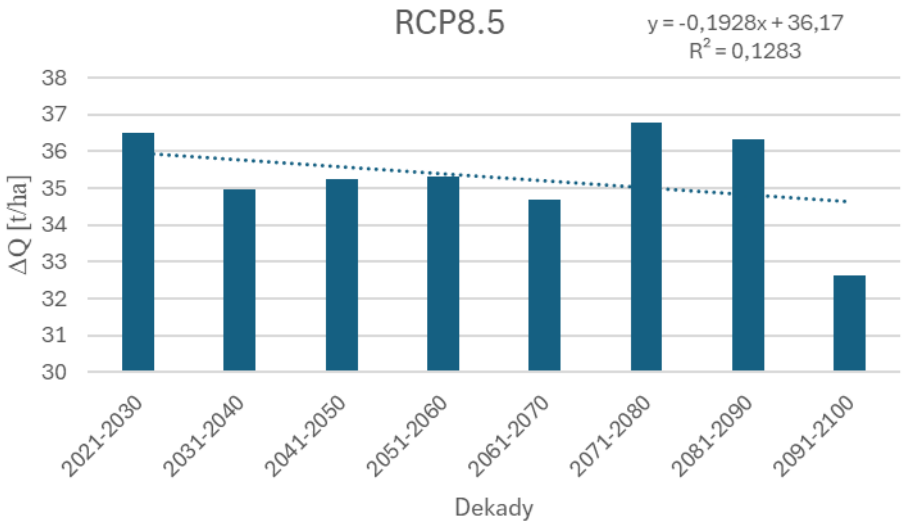
Na rysunku 13 przedstawiono trend czasowy zwyżek plonu korzeni buraka cukrowego, jakie będą możliwe do uzyskania dzięki deszczowaniu w świetle scenariusza RCP4.5. Z analizy równania regresji liniowej wynika, że w każdym dziesięcioleciu zwyżki plonu korzeni buraka – spowodowane deszczowaniem – będą wzrastać o 151 kg/ha.



Rysunek 13. Trend czasowy zwyżek plonu korzeni buraka cukrowego możliwych do uzyskania w warunkach prowadzenia nawodnień deszczownianych – w świetle sum opadów przewidywanych w scenariuszu RCP4.5

Figure 13. Time trend of sugar beet root yield increases achievable under sprinkler irrigation conditions – depending on the climate change scenario RCP4.5

Z kolei na rysunku 14 przedstawiono trend czasowy zwyżek plonu korzeni buraka cukrowego, jakie będą możliwe do uzyskania dzięki deszczowaniu w świetle scenariusza RCP8.5. W świetle tego scenariusza, zwyżki plonu korzeni buraka dzięki deszczowaniu będą maleć (o 193 kg/ha) w każdym kolejnym dziesięcioleciu.



Rysunek 14. Trend czasowy zwyżek plonu korzeni buraka cukrowego możliwych do uzyskania w warunkach prowadzenia nawodnień deszczownianych – w świetle sum opadów przewidywanych w scenariuszu RCP.5
Figure 14. Time trend of sugar beet root yield increases achievable under sprinkler irrigation conditions – depending on the climate change scenario RCP8.5

DYSKUSJA

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że uprawa buraka cukrowego w powiecie chełmińskim będzie wymagała coraz większych nakładów w zakresie zarządzania zasobami wodnymi, zwłaszcza w kontekście niedoborów opadów w okresie wegetacyjnym. Porównanie otrzymanych – na podstawie prognozy temperatury – wartości potrzeb wodnych z prognozowanymi sumami opadów wskazuje na rosnące zagrożenie deficytu wody, szczególnie w miesiącach letnich, które są kluczowe dla rozwoju korzeni. W świetle danych klimatycznych oraz przeprowadzonych obliczeń, w scenariuszu RCP8.5, niedobory opadów w suchych latach mogą przekroczyć nawet 330 mm. Ponadto, według scenariusza RCP8.5 potrzeby wodne będą rosnąć szybciej (10,3 mm/10 lat) niż w bardziej optymistycznym scenariuszu RCP4.5 (4,1 mm/10 lat). Różnice te pokazują wpływ intensywności zmian klimatycznych na potencjalne zapotrzebowanie na wodę. Jednocześnie, sumarycznie przyrosty plonów są większe w scenariuszu RCP4.5, natomiast w scenariuszu RCP8.5 obserwuje się tendencję spadkową w skuteczności nawadniania, co może być efektem nasilającej się nieregularności opadów oraz coraz wyższych temperatur powietrza, które prowadzą do zwiększenia ewapotranspiracji.

Przeprowadzone analizy wskazują również, że lipiec jest miesiącem o najwyższym zapotrzebowaniu wodnym, co pokrywa się z wcześniejszymi badaniami Dmowskiego i in. [2011], według których najintensywniejszy przyrost biomasy korzeniowej przypada właśnie na ten okres. Zdaniem tych autorów, optymalnym dla uzyskania najwyższych plonów korzeni buraka okazał się układ czynników: opad kwiecień-czerwiec 222 mm (najwyższy badany) i opad lipiec-wrzesień – 260 mm (nieco wyższy od średniej). Wysokie potrzeby wodne w tym miesiącu – nawet do 5,3 mm/dobę – przy jednocześnie niskich i nieregularnych opadach czynią lipiec najbardziej krytycznym okresem dla prowadzenia zabiegów nawadniania.

Wyniki regresji liniowej pokazujące wzrost potrzeb wodnych oraz jednocześnie spadek efektywności nawadniania (szczególnie w scenariuszu RCP8.5) sugerują konieczność modernizacji podejścia do gospodarki wodnej w rolnictwie. Wdrażanie precyzyjnych systemów nawadniania, rozwój retencji lokalnej oraz wybór odmian bardziej tolerancyjnych na suszę stają się koniecznością. Niezbędne będzie także zastosowanie narzędzi wspierających decyzje agrotechniczne (np. DSS) oraz ścisłe monitorowanie warunków pogodowych.

Wielu autorów wyraża opinię, 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; Rzekanowski i in. 2011; Stachowski i Markiewicz 2011; Żarski i in. 2020). Powierzchnia nawadniania i zużycie wody do nawodnień rolniczych w Polsce w przyszłości będzie jednak zależeć przede wszystkim od przyjętej strategii rozwoju rolnictwa oraz warunków ekonomicznych rolnictwa, zaś od uwarunkowań klimatycznych – w znacznie mniejszym stopniu (Łabędzki 2009b).

WNIOSKI

Na podstawie przewidywanych scenariuszy zmian klimatu w powiecie chełmińskim w latach 2021-2100, przyjętych założeń oraz przeprowadzonych obliczeń i analiz, można sformułować następujące wnioski:

1. Najwięcej wody rośliny buraka – dla prawidłowego przebiegu wzrostu i rozwoju – będą wymagać w lipcu. Dobowe zapotrzebowanie na wodę w tym miesiącu – odpowiednio w latach średnich, średnio suchych i bardzo suchych – wyniesie 4,3 mm, 4,7 mm i 5,2 mm w świetle scenariusza RCP4.5, natomiast w zgodnie ze scenariuszem RCP8.5 będą one większe – odpowiednio na poziomie 4,4 mm, 4,9 mm i 5,3 mm.
2. Potrzeby wodne buraka cukrowego w całym okresie wegetacji (21 IV – 30 IX), jeśli zmiany klimatyczne przebiegną według scenariusza RCP4.5 – w latach średnich, suchych i bardzo suchych – wyniosą odpowiednio 475 mm, 523 mm i 570 mm. Natomiast zgodnie ze

scenariuszem RCP8.5 będą one większe, kształtując się na poziomie odpowiednio 492 mm, 541 mm i 590 mm.

3. Z równań regresji liniowej, które wyznaczono dla okresu prognozowanego (2021-2100) wynika, że należy oczekiwać zwiększenia się potrzeb wodnych buraka cukrowego. Odpowiednio dla scenariuszy RCP4.5 i RCP8.5, potrzeby wodne buraka cukrowego w okresie wegetacji (21 IV – 30 IX) będą w każdym dziesięcioleciu wzrastać o 4.1 mm i 10,3 mm.
4. Niedobory opadu w całym okresie wegetacji buraka cukrowego – w świetle scenariusza zmian klimatu RCP4.5 — w latach średnich, suchych i bardzo suchych – będą wynosić odpowiednio 141 mm, 246 mm i 327 mm, natomiast w scenariuszu RCP8.5 będą one większe, kształtując się na poziomie odpowiednio 145 mm, 251 mm i 336 mm.
5. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że – średnio dla osiemdziesięciolecia 2021-2100 – większe przyrosty plonu korzeni buraka cukrowego (37,3 t/ha) będą możliwe do uzyskania poprzez deszczowanie, jeśli zmiany klimatyczne będą przebiegały według scenariusza RCP4.5 aniżeli w scenariuszu RCP8.5 (35,3 t/ha).

LITERATURA

1. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrig. Drain. Paper, 56, Rome, ss. 300.
2. Bąk B., Łabędzki L. 2014a. *Prediction of precipitation deficit and excess in Bydgoszcz region in view of predicted climate change*. Journal of Water and Land Development, 23, 11–19.
3. Bąk B., Łabędzki L. 2014b. *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.
4. Dmowski Z., Dzieżyc H., Chmura K. 2011. *Porównanie potrzeb wodnych buraka cukrowego określonych przez sumę opadów oraz liczbę dni z opadem.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 8(V), 183-192.
5. Kuchar L., Iwański S. 2011. *Rainfall simulation for the prediction of crop irrigation in future climate*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas, 5, 7–18.
6. 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, 2(I), 187–200.
7. 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, II(1), 319–334.
8. 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, I(2), 257–273.
9. Kuśmierek-Tomaszewska R., Żarski J., Dudek S. 2023. *Prognozowanie efektów produkcyjnych deszczowania roślin na podstawie wyników*

badan polowych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 18 I(1), 71-87.
10. Łabędzki L. 2009a. *Foreseen climate changes and irrigation development in Poland*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas, 3, 7-18.
11. Łabędzki L. 2009b. *Expected development of irrigation in Poland in the context of climate change.* Journal of Water and Land Development, 13b, 17-29.
12. Łabędzki L., Szajda J., Szuniewicz J. 1996. *Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicje, metody obliczania*. Przegląd stanu wiedzy. Wyd. IMUZ Falenty, Mat. Inf., 33, 1-15.
13. Łabędzki L., Bąk B., Liszewska M. 2013. *Wpływ przewidywanej zmiany klimatu na zapotrzebowanie ziemniaka późnego na wodę*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2(I), 155-165.
14. Platt C. 1978. *Problemy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*. PWN, Warszawa, ss. 377.
15. Rudnicki F. (red.) 1992. *Doświadczalnictwo rolnicze*. Wydawnictwa Uczelniane ATR. Bydgoszcz, ss. 1-210.
16. Rzekanowski, C., Żarski, J., Rolbiecki, S. 2011. *Potrzeby, efekty i perspektywy nawadniania roślin na obszarach szczególnie deficytowych w wodę.* Postępy Nauk Rolniczych, 1, 51–63.
17. Stachowski P., Markiewicz J. 2011. *The need of irrigation in central Poland on the example of Kutno county*. Annual Set The Environment Protection 13, 1453-1472.
18. Tabaszewski, J. 1980. *Elementy inżynierii wodnej.* Wyd. ART Olsztyn, 1-189.
19. Żakowicz, S.; Hewelke, P.; Gnatowski, T. 2009. *Podstawy infrastruktury technicznej w przestrzeni produkcyjnej*, SGGW Warszawa, 1-192.
20. Żarski, J., Kuśmierek-Tomaszewska, R., Dudek, S. 2020. *Impact of irrigation and fertigation on the yield and quality of sugar beet (Beta vulgaris L.) in a moderate climate.* Agronomy, 10(2), 166.

Źródła internetowe:

21. https://klimada2.ios.gov.pl/klimat-scenariusze-portal/
22. http://www.nawadnianie.inhort.pl/eto/26-eto-temp

Autor korespondencyjny: Stanisław Rolbiecki
ORCID: 0000-0002-1433-2212
e-mail: Stanislaw.Rolbiecki@pbs.edu.pl

Piotr Mietła

Katedra Biogeochemii, Gleboznawstwa i Melioracji Wodnych
Politechnika Bydgoska im. J. J. Śniadeckich
Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

Otrzymano: 05.08.2025 r.
Zwrócono po recenzji: 20.10.2025 r.
Zaakceptowano: 21.10.2025 r.