

## ŚLAD WODNY JAKO WSKAŹNIK ZUŻYCIA ZASOBÓW WODNYCH W PRODUKCJI ROŚLINNEJ NA TERENIE WOJEWÓDZTWA DOLNOŚLĄSKIEGO

Ewa Burszta-Adamiak<sup>1\*</sup>, Wiesław Fiałkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

\* Autor do korespondencji: [ewa.burszta-adamiak@upwr.edu.pl](mailto:ewa.burszta-adamiak@upwr.edu.pl)

### STRESZCZENIE

Wzrastający deficyt wody w środowisku, zmieniający się charakter opadów wynikający ze zmian klimatycznych przy jednoczesnym wzroście zapotrzebowania na wodę w rolnictwie wymuszają potrzebę podjęcia dyskusji na temat zarządzania zasobami wodnymi. Jednym z narzędzi pozwalających ocenić wykorzystanie wody na etapie uprawy roślin jest ślad wodny. W artykule przedstawiono wyniki analiz zużycia wody, wykorzystanej w rolnictwie do produkcji artykułów pochodzenia roślinnego w latach 2014–2017. Oceny wielkości i rodzaju zużytej wody dokonano poprzez zastosowanie wskaźnika śladu wodnego. W analizie uwzględniono 28 roślin, stanowiących w sumie blisko 95% ogólnej powierzchni zasiewów na terenie województwa dolnośląskiego. Wyniki badań wykazały, że całkowity ślad wodny dla wszystkich analizowanych upraw wyniósł 4815 mln m<sup>3</sup> na rok oraz 7032 m<sup>3</sup> w odniesieniu do hektara powierzchni zasiewów. Spośród trzech składowych śladu wodnego największe wartości osiągnięto dla zielonego śladu wodnego (76%), który określa ilość zużywanej wody pochodzącej z opadów atmosferycznych i jednocześnie tej wody, która jest magazynowana w glebie i pobierana przez rośliny. Wzrost częstości występowania okresów suszy, głównie w okresie wegetacyjnym roślin, zmusza do ukierunkowywania rolnictwa w stronę upraw roślin, które charakteryzują się zwiększoną odpornością na zmiany klimatu oraz mniejszą wodochłonnością (niższym jednostkowym śladem wodnym).

**Słowa kluczowe:** ślad wodny, zasoby wodne, rolnictwo, produkcja roślinna, województwo dolnośląskie

## WATER FOOTPRINT AS INDICATOR OF WATER RESOURCES CONSUMPTION BY CROP PRODUCTION IN THE LOWER SILESIAN VOIVODESHIP

### ABSTRACT

Growing deficit of water in environment, changing nature of rainfall resulting from climate change and simultaneous increase in water demand for agriculture, force the need for a discussion on the subject of water resources management. One of the tools to assess the use of water in the crop production is water footprint.



SIEĆ NA RZECZ  
INNOWACJI W ROLNICTWIE  
I NA OBSZARACH WIEJSKICH



Krajowa Sieć  
Obszarów Wiejskich



Program  
Rozwoju  
Obszarów  
Wiejskich  
na lata 2014-2020

„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”.

Artykuł opracowany na zlecenie Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.

Artykuł współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach II Schematu Pomocy Technicznej

„Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich” Program Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.

Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020

– Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

This article presents the results of analysis of water consumption in agriculture for the crop production in the years 2014–2017. The assessment of quantity and type of water used was made by applying the water footprint indicator. The analysis considered 28 plants covering almost 95% of the total sown area in the Lower Silesian Voivodeship. The research revealed that the total water footprint for all analysed crops amounted to 4815 million m<sup>3</sup> per year and 7 32 m<sup>3</sup> per hectare of sown area. Of the three components of the water footprint, the highest values were achieved for the green water footprint (76%), which determines the amount of water used from rainfall and stored in the soil to be used by crops. The increase in the frequency of drought periods, occurring mainly in the vegetation period, drives the agriculture to cultivate crops which are more resistant to climate changes and less water intensive (having lower unit water footprint).

**Keywords:** water footprint, water resources, agriculture, crop production, Lower Silesian Voivodeship

## WPROWADZENIE

Zagwarantowanie produkcji artykułów żywnościowych wobec nowych wyzwań gospodarczych oraz klimatycznych przy jednoczesnej potrzebie ochrony zasobów wodnych staje się wyzwaniem współczesnego świata [Saccon 2018]. W tej kwestii rolnictwo ma do odegrania szczególną rolę. Według wielu badań meteorologicznych i klimatologicznych [Kundzewicz i Kowalczyk 2008; IPCC 2013 i 2014] na częstsze występowanie okresów suszy najbardziej narażona jest Europa południowa i południowo – wschodnia. Jednak ostatnie lata (np. 2015 i 2018) pokazały, że susza dotyka także rejony w Polsce, przyczyniając się do poważnych strat w rolnictwie. Wyniki badań przeprowadzonych przez Jankowiak i Bieńkowskiego [2011] wykazują, że wykorzystanie potencjalnej produktywności rolnictwa w Polsce, w warunkach istniejących niedoborów wodnych, kształtuje się na poziomie zaledwie 62%.

Wydawałoby się, że w ogólnym rozrachunku zużycia wody w Polsce na wszystkie potrzeby gospodarki narodowej i ludności, rolnictwo stanowi niewielki udział, bo zaledwie ponad 10 % [GUS OŚ 2017]. Należy jednak wziąć pod uwagę, że podawana w rocznikach statystycznych informacja, obejmuje tylko objętość wody zużywaną do nawodnień, które w Polsce nie są tak rozpowszechnione jak w innych krajach europejskich. Większość nawadnianych terenów znajduje się w regionie śródziemnomorskim. Francja, Grecja, Włochy, Portugalia i Hiszpania mają razem 9,15 milionów ha, co stanowi 84% powierzchni z infrastrukturą irygacyjną wśród wszystkich państw członkowskich Unii Europejskiej [Eurostat 2015]. W samych Włoszech systemy nawadniające są stosowane na ponad 20% użytków rolnych [Natali i in. 2009]. Dla porównania w Polsce udział ten stanowi tylko 0,4% [GUS OŚ 2017]. Jednak brak równowagi pomiędzy dostępnością

do wody i zapotrzebowaniem na nią, szczególnie w okresie wegetacji, prawdopodobnie zmieni dotychczasowe statystyki. Już w roku 2016 w stosunku do roku poprzedzającego pobór wody do nawodnień użytków rolnych i gruntów leśnych uległ w Polsce zwiększeniu o 3,9 hm<sup>3</sup> (o 4,5%), przy jednoczesnym wzroście powierzchni nawadnianej (o 3,2 tys. ha tj. ok. 4,6%) [GUS OŚ 2017].

Całkowite zużycie zasobów wodnych w rolnictwie w rzeczywistości jest znacznie większe, gdyż obejmuje poza bezpośrednim wykorzystaniem wody (np. do nawodnień) także wodę wykorzystywaną w sposób pośredni tzn. do wyprodukowania żywności w całym okresie wegetacji z uwzględnieniem wód pochodzących z opadów atmosferycznych. Kompleksowa ocena wielkości zużytej wody w rolnictwie jest możliwa poprzez zastosowanie wskaźnika śladu wodnego. Koncepcja śladu wodnego (ang. *Water Footprint* – WF) była rozwijana od lat 90 XX w. Po raz pierwszy pojęcie wody „wirtualnej”, czyli wody wykorzystanej na produkowanie i dostarczenie wyrobów zostało zdefiniowane przez Allana w 1993 roku [Allan 1998]. Nieco później, bo w roku 2002 Arjen Hoekstra zaproponował pojęcie śladu wodnego jako ogólnego zużycia zasobów wody słodkiej w aspekcie objętościowym (wyrażonego np. w m<sup>3</sup>/jedn. produktu lub w m<sup>3</sup>/rok) dla analizowanego rejonu, produktu lub usługi biorąc pod uwagę zarówno ilości zużywanej wody jak i jej jakość w przypadku wprowadzania zanieczyszczeń do środowiska [Hoekstra i in. 2011]. W 2014 roku wskaźnik śladu wodnego doczekał się standaryzacji w międzynarodowej normie ISO 14046:2014, w której podano zasady, wymagania i wytyczne związane z oceną śladu wodnego wyrobów, procesów i organizacji na podstawie oceny cyklu życia (LCA). W normie uwzględniono tylko wyliczenia wielkości emisji do powietrza i gleby, które wpływają na jakość wody ale nie uwzględniono wszystkich komponentów śladu

wodnego. Z tych względów większość badań opiera się na metodologii śladu wodnego opracowanego przez Hoekstra [2002].

W koncepcji śladu wodnego można wyodrębnić trzy komponenty tj. ślad niebieski, zielony i szary. Niebieski ślad wodny określa ilości wody podziemnej i powierzchniowej zużywanej podczas produkcji produktu. Konsumpcja tego rodzaju wód ma ścisły związek ze zmniejszaniem zasobów wodnych na terenie zlewni. Do niebieskiego śladu wodnego zaliczane są wody pobierane z rzek, jezior, stawów oraz zbiorników podziemnych. Zielony ślad wodny to ta część wody pochodząca z opadów atmosferycznych, która jest wykorzystana przez rośliny, a jej nadmiar odparowywany do atmosfery w wyniku ewapotranspiracji. To woda magazynowana w glebie i pobierana przez rośliny. Szary ślad wodny wyrażony jest jako hipotetyczna objętość wody niezbędna do rozcieńczenia wprowadzonego do wody ładunku zanieczyszczenia do takiego stopnia, aby jakość wody nie przekraczała ustalonych norm i standardów [Hoekstra i in. 2011].

W dotychczas prowadzonych badaniach podejście śladu wodnego wykorzystano m.in. do oszacowania zużycia wody na obszarach miejskich [Fiałkiewicz i in. 2013]. Temat ilości wody zużywanej do celów produkcji rolniczej poprzez pomiar śladu wodnego był rozpatrywany zarówno w ujęciu globalnym [Mekonnen i Hoekstra 2012, 2014] jak i krajowym m.in. dla Chin [Sun i in. 2013, Xinchun i in. 2018], Stanów Zjednoczonych [Marston i in. 2018] oraz państw, w których już dziś występują poważne problemy z dostępnością do wody [Chouchane i in. 2015, Pahlow i in. 2015]. Badania bardziej szczegółowe, rozpatrujące zagadnienie zużycia wody w produkcji rolniczej w mniejszej skali tzn. wydzielonej jednostki terytorialnej zostały wykonane m.in. przez Fingera [2013] oraz Sun i in. [2013]. Porównanie wielkości śladów wodnych określanych dla różnych skal prowadzi do uzyskania dużych rozbieżności pomiędzy wynikami. Z tych względów niejednokrotnie podkreślana jest potrzeba tworzenia lokalnych zbiorów danych o wysokiej rozdzielczości i wiarygodności [Shtull-Trauring i Bernstein 2018]. Dodatkowo tylko nieliczne badania [m.in. Rodriguez i in. 2015, Xinchun i in. 2018] koncentrują się na produktach rolniczych konsumowanych na co dzień przez mieszkańców danego obszaru. Większość badań dotyczy zużycia wody na wyprodukowanie artykułów eksportowanych, wykorzystywanych niemalże w każ-

dym rejonie świata tj. rośliny włókniste, oleiste oraz energetyczne [Mekonnen i Hoekstra 2014, Lovarelli i in. 2016].

Celem niniejszego artykułu jest określenie, przy użyciu wskaźnika śladu wodnego (WF), zużycia wody wykorzystanej w polskim rolnictwie do produkcji artykułów pochodzenia roślinnego w latach 2014–2017. Szczegółową analizą objęto uprawy na terenie województwa dolnośląskiego tj. piątego największego województwa pod względem ludności oraz siódmego pod względem wielkości powierzchni w Polsce [GUS 2018].

## METODYKA BADAŃ

Podstawowym źródłem danych dotyczących produkcji roślinnej w województwie dolnośląskim były informacje i opracowania statystyczne opublikowane przez Urząd Statystyczny we Wrocławiu dla lat 2014–17 [US Wrocław 2016, 2018]. Województwo dolnośląskie zajmuje według granic administracyjnych blisko 2 mln ha, tj. 6,4% powierzchni kraju. Maksymalna powierzchnia użytków rolnych w analizowanym okresie wynosiła 934 900 ha w 2014 roku natomiast minimalna 901 200 ha w 2016 roku. Ogólna powierzchnia zasiewów kształtowała się od 735 389 ha w 2014 roku do 760 329 ha w 2015 roku. Okres analizy obejmował lata, w których średnie roczne temperatury powietrza kształtowały się na zbliżonym do siebie poziomie (10,4–11,1 °C), jednak pod względem uwarunkowań opadowych obserwowane było większe zróżnicowanie. Najwyższą roczną sumę opadów we Wrocławiu odnotowano w 2016 roku (611 mm), a najniższą w 2015 roku (391 mm). W okresie wegetacyjnym (od kwietnia do września) w 2015 roku spadło jedynie 217 mm opadu, w tym tylko 4 mm w sierpniu. W pozostałych dwóch latach tj. roku 2014 i 2017 roczne sumy opadów wynosiły odpowiednio 573 mm i 586 mm. Uprawami, dla których w dalszej części wyznaczono ślad wodny były ziemniaki w tym: pszenica, żyto, jęczmień, owies, pszenżyto, mieszanki zbożowe, gryka, proso, kukurydza, strączkowe jadalne, ziemniaki, buraki cukrowe, rzepak i rzepik; warzywa: kapusta, kalafior, cebula, marchew jadalna, ogórki, pomidory i pozostałe; krzewy: truskawki, maliny, porzeczki i agrest oraz owoce: jabłka, gruszki, śliwki i wiśnie. Stanowiły one w sumie blisko 95% ogólnej powierzchni zasiewów.

Obliczenia śladu wodnego dla produktów roślinnych wykonano według metodologii opisanej szczegółowo przez Mekonnen i Hoekstra.[2010]. Zakłada ona, że całkowity ślad wodny  $WF_i$  uprawy roślinnej wyrażony objętością zużytej wody na tonę powstałego produktu w ciągu jednego roku można opisać równaniem (1):

$$WF_i = WF_{i,Z} + WF_{i,N} + WF_{i,Sz} \quad (1)$$

gdzie:  $WF_{i,Z}$  jest zielonym,  $WF_{i,N}$  niebieskim a  $WF_{i,Sz}$  szarym śladem wodnym.

Zielony ślad wodny uwzględnia ewapotranspirację rzeczywistą rośliny uprawnej zależną od parametrów klimatycznych, charakterystyki rośliny i dostępności wody. W przypadku upraw stosujących nawadnianie, ilość wody powierzchniowej i podziemnej dostarczonej w celu zapewnienie potrzeb wodnych danej uprawy tworzy niebieski ślad wodny. Szary składnik śladu wodnego obliczany jest jako iloraz dawki azotu zawartego w nawozach wypłukiwanego do wód podziemnych lub spływu powierzchniowego przez iloczyn różnicy pomiędzy maksymalnym akceptowalnym i naturalnym stężeniem azotu w odbiorniku wodnym a rzeczywistym plonem danej rośliny.

W opracowaniu Mekonnen i Hoekstra.[2010] ślad wodny został wyznaczony dla 146 roślin uprawnych stosując model o rozdzielczości 5 na 5 minut geograficznych. Pozwoliło to oszacować średni ślad wodny dla większości krajów na świecie. W niniejszym opracowaniu w celu wyznaczenia poszczególnych składników śladu wodnego  $WF_i$  [ $m^3/rok$ ] dla województwa dolnośląskiego posłużono się średnim dla obszaru Polski śladem wodnym rośliny uprawnej [ $m^3/tonę$  produktu] oraz plonem rośliny uprawnej na terenie całego województwa wyrażonym w tonach (równanie 2):

$$WF_i = \overline{WF}_i \cdot P_i \quad (2)$$

Ślad wodny można też przedstawić w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, dzieląc wartość przez pole powierzchni danej uprawy wyrażone w hektarach oraz w mm słupa wody przypadającego na jednostkę powierzchni, mnożąc wartość wyrażoną w  $m^3/ha$  przez współczynnik 0,1.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki obliczeń śladu wodnego dla 28 roślin uprawianych na terenie województwa dolnoślą-

skiego przedstawia tabela 1. Wybrane do analiz uprawy stanowią ok. 95% ogólnej powierzchni zasiewów na tym obszarze. Najwyższym jednostkowym całkowitym śladem wodnym charakteryzują się zboża, a wśród nich gryka ( $2207 m^3/t$ ). Z kolei najniższy wśród zbóż całkowity ślad wodny wykazywany jest w uprawach pszenżyta ( $998 m^3/t$ ). Mniej wodochłonne są uprawy warzyw, poza strączkowymi i roślinami oleistymi (tu rzepak i rzepik), których całkowity ślad wodny zbliżony jest do tego dla zbóż, odpowiednio  $1063 m^3/t$  w przypadku roślin strączkowych i  $1467 m^3/t$  roślin oleistych. Wśród warzyw i owoców najwięcej wody potrzebują do wzrostu truskawki ( $933 m^3/t$ ) oraz wiśnie ( $1503 m^3/t$ ). Najwyższe wartości całkowitego śladu wodnego dla lat 2014–2017, biorąc pod uwagę powierzchnie upraw danej rośliny na terenie województwa dolnośląskiego, wykazano dla uprawy pszenicy (średnio  $2391$  mln  $m^3/rok$ ), a następnie dla kukurydzy na ziarno ( $591$  mln  $m^3/rok$ ) oraz roślin oleistych ( $571$  mln  $m^3/rok$ ). W niewielkim stopniu na wielkość całkowitego śladu wodnego wpływ miała uprawa kalafiorów (zużycie wody średnio  $486 m^3/rok$ ) oraz malin (średnio  $368 m^3/rok$ ). W przeliczeniu na hektar do największego zużycia wody na obszarze objętym analizą przyczyniła się uprawa buraków cukrowych ( $10\,739 m^3/ha$ ) oraz pszenicy ( $8696 m^3/ha$ ). Całkowity ślad wodny dla wszystkich analizowanych upraw wyniósł  $4815$  mln  $m^3$  na rok oraz  $7032 m^3$  w odniesieniu do hektara powierzchni zasiewów. Oceniając poszczególne komponenty wchodzące w skład całościowego śladu wodnego związanego z uprawą można zauważyć, że podczas produkcji artykułów pochodzenia roślinnego spośród trzech składowych największą wartość osiąga zielony ślad wodny, którego wartość od roku 2015 systematycznie rośnie osiągając wartość maksymalną  $3783$  mln  $m^3$  w 2017 roku (rys. 1). Jest to wielkość na ogół przekraczająca kilkakrotnie szary ślad wodny, którego wartość wykazuje tendencję malejącą. Niska wartość niebieskiego śladu wodnego wynika z małych ilości wody powierzchniowej i podziemnej wykorzystywanej w warunkach polskich na cele nawadniania upraw polowych. W analizowanym przypadku, w latach 2014–2017 średni niebieski ślad wodny związany z nawadnianiem wyniósł  $28$  mln  $m^3$  wody rocznie, co stanowi zaledwie 15% całkowitego zużycia wody na cele gospodarki narodowej. Obserwowany trend rosnący dla niebieskiego śladu wodnego sugeruje, że



**Tabela 1.** Uśredniony ślad wodny produkcji roślinnej dla analizowanego okresu (2014-2017) w przeliczeniu na tonę produktu, rok oraz hektar**Table 1.** Average water footprint of crop production for the period 2014-2017 in tons of product per year and per hectare

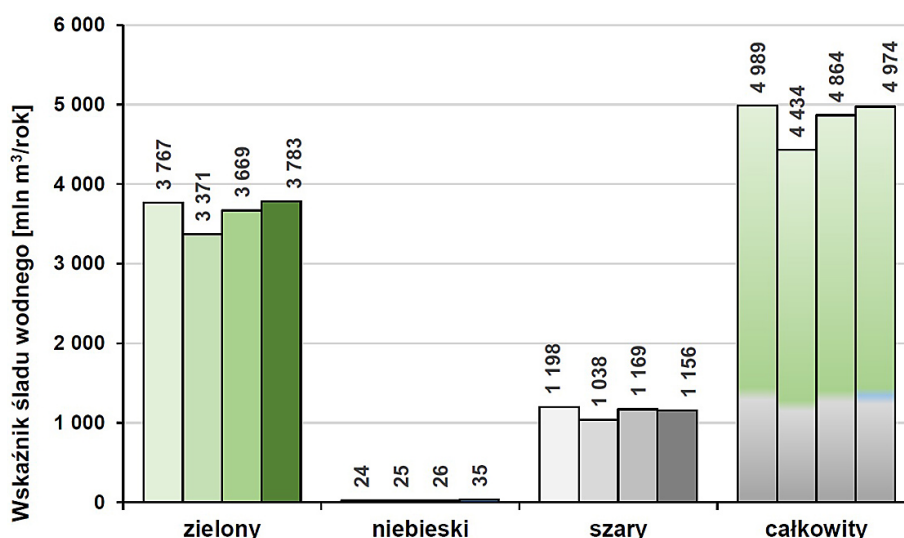
Uprawa	Średnia powierzchnia zasiewów [ha]	Średnie zbiory [tys. ton]	Ślad wodny na tonę produktu [m <sup>3</sup> /t]				Ślad wodny dla woj. dolnośląskiego [tys. m <sup>3</sup> /rok]				Ślad wodny na hektar [m <sup>3</sup> /ha]
			zielony	niebieski	szary	całkowity	zielony	niebieski	szary	całkowity	
Pszenica	274 949	146 512	1115	0,40	516,06	1 632	1 633 995	584	756 086	2 390 664	8 696
Żyto	20 291	7 236	1352	0,19	0,02	1 352	97 814	14	2	97 829	4 818
Jęczmień	62 298	28 004	1213	78,87	131,22	1 423	339 776	22 088	36 746	398 611	6 401
Owies	17 445	5 933	1305	0,82	0,05	1 306	77 443	49	3	77 494	4 428
Pszenżyto	45 863	19 809	997	0,47	0,04	998	197 588	93	7	197 688	4 304
Mieszanki zbożowe	11 026	3 833	1716	1,48	0,05	1 717	65 771	57	2	65 830	5 954
Gryka	8 647	1 239	2206	0,82	0,00	2 207	27 325	10	0	27 335	3 148
Proso	817	122	1582	0,00	0,00	1 582	1 932	0	0	1 932	2 310
Kukurydza na ziarno	82 281	54 346	683	3,74	401,00	1 088	371 227	2 033	217 930	591 190	7 243
Strączkowe jadalne	3 142	783	1063	0,00	0,09	1 063	8 318	0	1	8 318	2 674
Ziemniaki	19 881	54 936	192	1,00	79,39	273	105 748	547	43 613	149 908	7 693
Buraki cukrowe	17 413	113 213	92	0,56	75,69	168	103 931	639	85 689	190 259	10 739
Rzepak i rzepik	126 334	38 907	1467	0,00	0,24	1 467	570 799	0	94	570 894	4 519
Kapusta	773	2992	88	1,00	0,003	89	2 634	30	0	2 664	3 462
Kalafiory	131	293	166	0,23	0,01	166	486	1	0	486	3 687
Cebula	1 538	4157	150	5,37	0,004	156	6 252	223	0	6 475	4 164
Marchew jadalna	904	2832	55	0,08	0,004	56	1 570	2	0	1 572	1 731
Ogórki	684	1058	206	1,30	0,002	207	2 176	14	0	2 190	3 217
Pomidory	269	442	170	2,84	0,001	173	752	13	0	765	2 916
Pozostałe warzywa <sup>a</sup>	4 479	4558	122	2,97	0,01	125	5 571	135	0	5 707	1 270
Truskawki <sup>b</sup>	1 837	612	767	165,95	0,01	933	4 694	1 016	0	5 710	3 101
Maliny <sup>c</sup>	252	89	410	4,98	0,01	415	363	4	0	368	1 428
Porzeczki	442	286	530	1,27	0,01	531	1 518	4	0	1 521	3 409
Agrest	114	62	427	0,41	0,02	428	263	0	0	263	2 358
Jabłka	1 901	2093	424	0,95	0,001	425	8 877	20	0	8 897	4 684
Gruszki	236	111	1183	2,65	0,0005	1 186	1 311	3	0	1 314	5 624
Śliwki	408	215	1359	3,05	0,02	1 362	2 921	7	0	2 928	7 178
Wiśnie	798	414	1500	3,35	0,04	1 503	6 208	14	0	6 222	7 803
SUMA	705 153	2093	22 543	285	1 204	24 032	3 647 262	27 598	1 140 174	4 815 034	128 961

<sup>a</sup> Pietruszka, por, seler, sałata, rzodkiewka, rabarbar i inne, <sup>b</sup> Łącznie z poziomkami, <sup>c</sup> Łącznie z jeżyną bezkolcową

składnik ten będzie odgrywał coraz większą rolę w całkowitym śladzie wodnym.

Z uwagi na przeważający udział zielonego śladu wodnego w jego całkowitej wartości dodatkowo przeanalizowano rodzaje upraw, które mają największy wpływ na wielkość tej składowej śladu wodnego (rys. 2). Z analizy uzyskanych danych wynika, że zboża są odpowiedzialne w 77% za wykazywaną wielkość zielonego śladu wodnego. Przyczynia się do tego znaczny areal uprawy zbóż (ok. 57% całkowitej powierzchni zasiewów) oraz wysoki w porównaniu z warzywami i owocami jednostkowy ślad wodny (w przeliczeniu na

tonę produktu) mieszczący się w granicach od 683 m<sup>3</sup> w przypadku kukurydzy, przeznaczonej na ziarno do 2206 m<sup>3</sup> w przypadku upraw gryki. Spośród zbóż, pszenica zajmuje największy areal (ok. 52%) i to ten rodzaj uprawy ma największy udział w zielonym śladzie wodnym (ponad 58%). W dalszej kolejności, znaczący wpływ na wielkość zielonego śladu ma uprawa kukurydzy i jęczmienia stanowiące odpowiednio 13,2% oraz 12,08% jego wartości (rys. 2). Gryka, pomimo najwyższego wśród zbóż jednostkowego zielonego śladu wodnego (2206 m<sup>3</sup>/t) na wartość wyliczanego dla województwa dolnośląskiego zie-



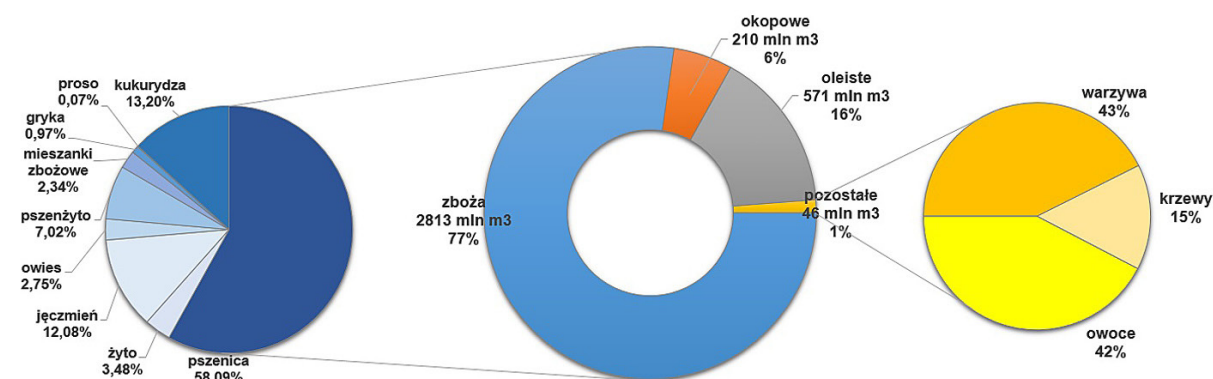
Rys. 1. Składowe wskaźnika śladu wodnego dla województwa dolnośląskiego. Kolejne słupki w każdej grupie prezentują wartości dla lat (od lewej dla roku 2014, 2015, 2016 i 2017)

Fig. 1. Components of water footprint indicator for Lower Silesia Voivodship. Consecutive bars in each group present values (from left) for 2014, 2015, 2016 and 2017

lonego śladu wodnego ma niewielki wpływ (jej uprawa stanowi zaledwie 0,97% wartości  $WF_z$ ). Wynika to z niewielkiej powierzchni uprawy tej rośliny na analizowanym obszarze, kształtującej się w latach 2014–2017 na poziomie średnio 8647 ha. Produkty pochodzenia roślinnego w najmniejszym stopniu wpływające na zielony ślad wodny na terenie analizowanego obszaru to owoce, warzywa i krzewy, co spowodowane jest ich najmniejszym udziałem w powierzchni zasiewów wynoszącym zaledwie 2% i w większości z nich, jak wspomniano powyżej, niższym od zbóż jednostkowym śladem wodnym.

Wysokie wartości zielonego śladu wodnego w sumarycznej jego wielkości świadczą o zużyciu w uprawach roślin głównie wody pochodzącej z opadów atmosferycznych, które zaliczane są do

zasobów odnawialnych, zasilających w wody odbiorniki wód powierzchniowych i podziemnych. Opad atmosferyczny to jednocześnie źródło wody dostępnej dla roślin podczas okresu wegetacji oraz czynnik, który w znacznym stopniu wpływa na plonowanie roślin. W przypadku większości produktów roślinnych, których okres wegetacji w województwie dolnośląskim rozpoczyna się od połowy kwietnia i trwa do końca września, największe potrzeby wodne obserwuje się w lipcu i sierpniu. To właśnie od przebiegu opadów w tych miesiącach zależy jakość i wysokość uzyskanego plonu. Wydłużające się okresy bezopadowe w ostatnich latach pokazują, że uprawy mogą być częściej narażone na niedobór niż na nadmiar opadów. Przykładowo w lipcu 2015 roku na badanym przez autorów obszarze, spadło jedynie 70%, a w

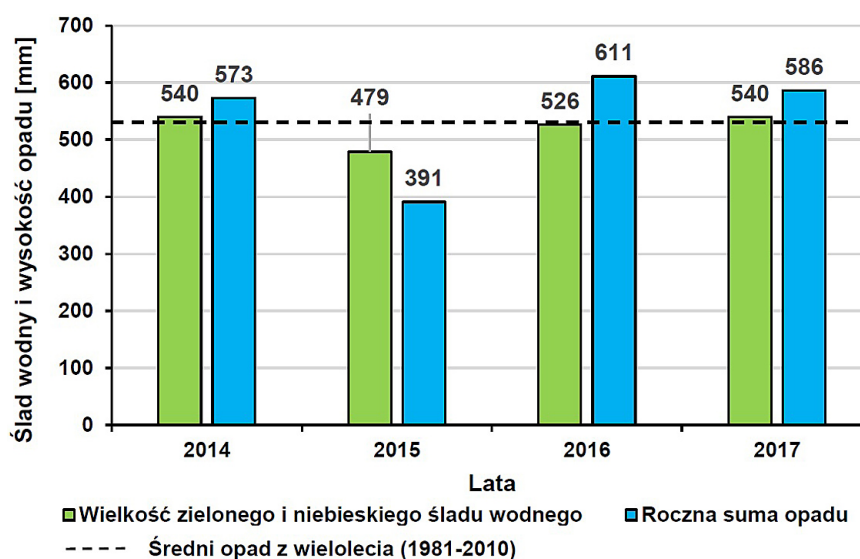


Rys. 2. Udział poszczególnych produktów roślinnych w zielonym śladzie wodnym  
Fig. 2. Share of individual crop products in green water footprint

sierpniu zaledwie 10% wieloletniej normy opadowej (1971–2000). Taka sytuacja wpłynęła nie tylko na obniżenie plonów, ale także na zwiększenie zużycia dostępnych zasobów wodnych, gdyż zapotrzebowanie roślin na wodę było większe niż przychód wody w formie opadów (rys. 3). W 2016 roku sytuacja uległa poprawie tzn. w całorocznym bilansie zapotrzebowania roślin na wodę, więcej wody z opadów dostało się na teren upraw niż rośliny zdołały jej wykorzystać. Z kolei w 2014 i 2017 roku nadwyżka opadów w stosunku do zapotrzebowania produktów pochodzenia roślinnego na wodę była niewielka (odpowiednio 33 mm w 2014 roku i 46 mm w 2017 roku). Są to wysokości opadów odpowiadające niekiedy miesięcznej sumie opadów deszczu.

Prawdopodobieństwo zwiększenia bieżącego deficytu wody oraz ograniczone rezerwy wodne Polski wobec nowych wyzwań mogą wpłynąć na zmianę zarówno dostępu do wody jak i zapotrzebowania na wodę w rolnictwie. Stanowi to argumentację do podjęcia działań umożliwiających bardziej efektywne korzystanie z zasobów wodnych. Dziś sposoby służące oszczędzaniu wody w rolnictwie w celu zwiększenia odporności na zmiany klimatu powinny być coraz szerzej stosowane, aby jak najlepiej wykorzystać dostępną wodę. Zalecanymi rozwiązaniami jest m.in. magazynowanie w zbiornikach wody deszczowej i wykorzystywanie jej w okresie niedoborów opadów, przyjęcie takich praktyk agromelioracyjnych, które sprzyjają infiltracji i zatrzymywaniu wody w glebie, ulepszenie pracy systemów na-

wadniających dzięki lepszemu serwisowaniu, sadzenie żywopłotów lub zagajników na ziemiach rolnych w celu redukcji odpływu wody oraz ochrony przed wiatrem. Wszystkie te metody mają już swoją długoletnią tradycję w praktyce rolniczej. Współcześnie rolników czekają nowe wyzwania. Wśród innowacyjnych podejść może być dostosowanie dat zasiewów do temperatury i opadów w ciągu roku oraz stosowanie odmian roślin lepiej znoszących nowe warunki pogodowe (np. odmian o krótszych cyklach wegetacyjnych, bardziej odpornych na niedobór wody), a tym samym pozwalających na zmniejszenie śladu wodnego (szczególnie zielonego) w przeliczeniu na jednostkę wyprodukowanego produktu pochodzenia roślinnego. Analizując ślad wodny upraw w przeliczeniu na hektar można zaobserwować, że największy ślad wodny powstaje podczas uprawy buraka cukrowego i pszenicy (Tabela 1). Jak to opisano wcześniej, pszenica ma największy udział zarówno w powierzchni zasiewów jak i śladzie wodnym. Chociaż buraki cukrowe w 2015 roku zajmowały tylko 2% powierzchni zasiewów i miały 2% udział w całkowitym śladzie wodnym to w 2017 roku powierzchnia wzrosła już do 3% natomiast ślad wodny do 5%. Wydaje się więc, że celowym byłoby zachęcanie rolników do podejmowania nowych inicjatyw uwzględniających zmiany uprawy z wodochłonnych na rzecz tych, które w mniejszym stopniu zużywają zasoby wodne poprzez system zachęt finansowych oraz edukację proekologiczną rolników w tym zakresie. Szary ślad wodny, stanowiący ok.



Rys. 3. Porównanie wielkości zielonego i niebieskiego śladu wodnego z roczną sumą opadów atmosferycznych we Wrocławiu

Fig. 3. Comparison of green and blue water footprints with annual sums of atmospheric precipitation in Wrocław

24% całkowitego śladu wodnego (rys. 1) może być zmniejszany poprzez ograniczenie użycia nawozów i pestycydów w okresie upraw do poziomu niezbędnego minimum w celu podtrzymania ilości i jakości plonów. Pomimo zauważalnego wpływu stosowania nawozów w polskim rolnictwie warto zauważyć, że w Polsce problem zanieczyszczenia środowiska z tytułu przedostawania się form azotu oraz fosforu do gleby nie jest jeszcze tak poważny jak w innych rejonach świata, w których dawki nawozowe, stosowane w uprawach są znacznie wyższe. Nie znaczy to jednak, że problem szarego śladu wodnego powinien być marginalizowany. Wręcz przeciwnie, w okresie potrzeby ochrony zasobów wodnych, poza ilością zużywanej wody powinno zwracać się uwagę jakiej jakości wody powracają do środowiska.

## WNIOSKI

Wielkości śladu wodnego dla produktów rolniczych pochodzenia roślinnego, objętych szczegółową analizą w niniejszym artykule, obrazują wpływ działalności człowieka na środowisko w zakresie zużycia zasobów wodnych. Podział śladu wodnego na trzy podgrupy pozwolił ustalić skąd pochodzi woda potrzebna do produkcji danego produktu i w jakiej ilości zużyto wodę na jego wytworzenie.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyciągnięto następujące wnioski końcowe:

1. Całkowity ślad wodny dla wszystkich 28, branych pod uwagę produktów pochodzenia roślinnego wyniósł 4815 mln m<sup>3</sup> na rok oraz 7032 m<sup>3</sup> w odniesieniu do hektara powierzchni zasiewów. Najwyższe wartości całkowitego śladu wodnego na terenie województwa dolnośląskiego wykazano dla uprawy pszenicy (średnio 2391 mln m<sup>3</sup>/rok), a w dalszej kolejności dla kukurydzy na ziarno (591 mln m<sup>3</sup>/rok) oraz roślin oleistych (571 mln m<sup>3</sup>/rok). Do największego zużycia wody na obszarze objętym analizą w przeliczeniu na hektar zasiewów przyczyniła się uprawa buraków cukrowych (10 739 m<sup>3</sup>/ha) oraz pszenicy (8696 m<sup>3</sup>/ha).
2. Spośród trzech składowych największą wartość osiągał zielony ślad wodny, którego wartość od roku 2015 systematycznie rosła osiągając wartość maksymalną 3783 mln m<sup>3</sup> w 2017 roku. Za wykazywaną wielkość zielonego śladu wodnego odpowiedzialne są w 77% zboża, w tym w ponad 58% uprawa pszenicy.

Wynika to z dużego areалу zbóż na terenie województwa dolnośląskiego (ok. 57% całkowitej powierzchni zasiewów) oraz wysokiego, w porównaniu z warzywami i owocami, jednostkowego śladu wodnego (w przeliczeniu na tonę produktu).

3. Wysokie wartości zielonego śladu wodnego świadczą o wykorzystywaniu do produkcji roślinnej głównie wody pochodzącej z opadów atmosferycznych. Zatem wydłużające się okresy bezopadowe w ostatnich latach, występujące głównie w okresach wegetacyjnych roślin mogą doprowadzać do zwiększenia się deficytów zasobów wodnych przy zachowaniu dotychczasowych praktyk upraw. Taka sytuacja miała miejsce w 2015 roku, w którym przychód wody opadowej był niższy niż zapotrzebowanie roślin, wyrażone za pomocą zielonego i niebieskiego śladu wodnego.
4. Niska wartość niebieskiego śladu wodnego wynikała z małych ilości wody powierzchniowej i podziemnej wykorzystywanej w warunkach polskich na cele nawadniania upraw polowych. Jednak obserwowany trend rosnący dla niebieskiego śladu wodnego sugeruje, że składnik ten będzie odgrywał coraz większą rolę w całkowitym śladzie wodnym. Potwierdzają to także dane statystyczne dotyczące wzrastającej powierzchni nawadnianych w Polsce użytków rolnych.
5. Prezentowane wyniki obliczeń śladu wodnego powinny być potraktowane jako podstawa do rozpoczęcia debaty na temat roli wody w rolnictwie, wpływie upraw na wielkość zasobów wodnych oraz planów na najbliższą przyszłość, w okresie wzrastających niedoborów wodnych. Taka sytuacja wymusza także wdrażanie praktyk rolniczych uwzględniających uprawy roślin, które będą bardziej odporne na zmieniający się klimat, a ich jednostkowe zapotrzebowanie na wodę, wyrażone przez wartości śladu wodnego będzie mniejsze.

## BIBLIOGRAFIA

1. Allan J.A. 1998. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 36, 545–546.
2. Chouchane H., Hoekstra A.Y., Krol M.S., Mekonnen M.M. 2015. The water footprint of Tunisia from an economic perspective, *Ecological Indicators*, 52.



3. Eurostat 2015. Dane statystyczne dotyczące struktury gospodarstw rolnych ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Main\\_Page](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Main_Page)).
4. Fiałkiewicz W., Burszta-Adamiak E., Malinowski P., Kolonko A. 2013. Urban Water Footprint system monitorowania i oceny gospodarowania wodą w miastach. *Ochrona Środowiska*, 35 (3), 9-12.
5. Finger, R. 2013. More than the mean—a note on heterogeneity aspects in the assessment of water footprints. *Ecological Indicators*, 29, 145–147.
6. GUS 2018. Główny Urząd Statystyczny. Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2018 r., Warszawa 2018.
7. GUS OŚ, 2017. Główny Urząd Statystyczny. *Ochrona Środowiska*, Warszawa.
8. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London, UK.
9. IPCC, 2013. Podsumowanie dla Decydentów: Przyczynek I Grupy Roboczej do Piątego Raportu Oceny Zmiany Klimatu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu 2013: Fizyczne Podstawy Naukowe. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex i P.M. Midgley (red.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, NY, USA.
10. IPCC, 2014. IPCC Fifth Assessment Report (AR5). *Climate change - The Synthesis Report 2014*.
11. ISO 14046:2014. Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines.
12. Jankowiak J., Bieńkowski J. 2011. Kształtowanie i wykorzystanie zasobów wodnych w rolnictwie. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 5, 39-48.
13. Kundzewicz Z.W., Kowalczyk P. 2008. *Zmiany klimatu i ich skutki*. Wydawnictwo Kurpisz S.A.
14. Lovarelli D., Jacopo B., Marco F. 2016. Water Footprint of crop productions: A review. *Science of The Total Environment*, 548-549, 236-251.
15. Marston, L., Ao, Y., Konar, M., Mekonnen, M.M. & Hoekstra, A.Y. 2018. High-resolution water footprints of production of the United States, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2017WR021923> (w druku).
16. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
17. Mekonnen M.M., Hoekstra A. Y. 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, 15, 401–415.
18. Mekonnen M.M., Hoekstra A. Y. 2014. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214–223.
19. Natali, F., Marta, A.D., Orlando, F., Orlandini, S., 2009. Water use in Italian agriculture: analysis of rainfall patterns. *Italian Journal of Agrometeorology*, 55 (3), 56–59.
20. Pahlow M., Snowball J., Fraser G. 2015. Water footprint assessment to inform water management and policy making in South Africa. *Water SA*, 41 (3), 300-313.
21. Rodriguez C.I., Ruiz de Galarreta V.A., Kruse E.E. 2015. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina, *Journal of Cleaner Production*, Volume 90, , 91-96.
22. Saccon P. 2018. Water for agriculture, irrigation management, *Applied Soil Ecology*, 123, 793–796.
23. Shtull-Trauring E., Bernstein N. 2018. Virtual water flows and water-footprint of agricultural crop production, import and export: A case study for Israel. *Science of the Total Environment* 622–623, 1438–1447.
24. Sun, S., Wu, P., Wang, Y., Zhao, X., Liu, J., Zhang, X., 2013. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China. *Sci. Total Environ.* 444, 498–507.
25. [US Wrocław 2016] Urząd Statystyczny we Wrocławiu, 2016. *Rolnictwo w województwie dolnośląskim w latach 2014-2015*, Wrocław.
26. [US Wrocław 2018] Urząd Statystyczny we Wrocławiu, 2018. *Rolnictwo w województwie dolnośląskim w latach 2016-2017*, Wrocław.
27. Xinchun C., Mengyang W., Rui S., La Z., Dan Ch., Guangcheng S., Xiangping G., Weiguang W., Shuhai T. 2018. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China, *Science of The Total Environment*, 610–611, 84-93.