

PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2020), 29 (2), 123–135
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2020), 29 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2020), 29 (2), 123–135
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2020), 29 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2020.29.2.11

Libor ANSORGE, Lada STEJSKALOVÁ, Jiří DLABAL, Eližbta ČEJKA

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.
T. G. Masaryk Water Research Institute, p. r. i.

Wpływ oczyszczalni ścieków na redukcję zanieczyszczeń odprowadzanych w czeskiej części dorzecza Odry Effect of wastewater treatment plants to the reduction of pollution discharged in the Czech part of the Odra river basin

Słowa kluczowe: ocena śladu wodnego, szary ślad wodny, oczyszczalnie ścieków, zanieczyszczenie, obszar dorzecza

Key words: water footprint assessment, grey water footprint, wastewater treatment plants, pollution, river basin district

Wprowadzenie

Wzrost liczby ludności, urbanizacja i uprzemysłowienie to jedne z wiodących problemów współczesnego świata. W związku z tym pojawiają się pytania, jak zapewnić wystarczającą ilość jedzenia, energii i wody. Szacuje się, że znaczna część świata już jest narażona na tzw. stres wodny, to jest niedobór wody, a sytuacja w przyszłości jeszcze się pogorszy (Alcamo, Flörke i Märker, 2007; Mekonnen i Hoekstra, 2016; Wada i in.,

2016). Wraz ze wzrostem liczby ludności, rozrastającymi się aglomeracjami i rozwojem przemysłowym rośnie także ilość substancji odpadowych emitowanych do wód. Często wody te są nieodpowiednio oczyszczane, co powoduje problemy z ich dalszym wykorzystaniem poniżej zrzutu do odbiornika do poboru wody dla potrzeb gospodarczych i bytowych, do celów przemysłowych lub w rolnictwie, ale także w celu zapewnienia zaopatrujących ekosystemowych usług wodnych (Keeler i in., 2012). Problemy te będą nasilać się wraz ze zmianami klimatu i z rozwojem społeczno-gospodarczym (Li i in., 2017) i będą miały wpływ na gospodarkę oraz inne dziedziny życia (Hertel i Liu, 2016). Z tych właśnie powodów ONZ zdefiniowała jako jeden z 17 celów zrównoważonego rozwoju cel 6: Zapewnić

wszystkim ludziom dostęp do wody i warunków sanitarnych poprzez zrównoważoną gospodarkę zasobami wodnymi (UN, 2015). Aby to osiągnąć, określono konkretne zadania. Zadanie 6.3 ma na celu poprawienie jakości wód poprzez zmniejszenie odprowadzanych do nich zanieczyszczeń. Głównymi źródłami zanieczyszczeń dostających się do wody jest rolnictwo, przemysł i źródła komunalne. Zanieczyszczenia pochodzące z rolnictwa mają charakter zanieczyszczenia obszarowego wynikającego ze stosowania na gruntach rolnych nawozów, pestycydów i innych substancji. Zanieczyszczenia przemysłowe to zazwyczaj zanieczyszczenia punktowe z przedsiębiorstw i zakładów przemysłowych. Skład zanieczyszczeń z jednostek osadniczych zależy od typu zabudowy. W przypadku luźnej zabudowy zanieczyszczenie może być rozproszone. W Europie Środkowej jest jednak bardziej rozpowszechniony układ urbanistyczny w postaci aglomeracji miejskich i stref podmiejskich o dużej koncentracji ludności i powiązanych usług skupionych na niewielkim obszarze. Ścieki i wody deszczowe z tak zabudowanych obszarów są odprowadzane przez systemy kanalizacyjne, a ich zrzuty do odbornika są punktowe. W celu zmniejszenia zanieczyszczenia komunalnego generowanego na obszarach zurbanizowanych oraz zanieczyszczeń przemysłowych poszczególne systemy kanalizacyjne są zakończone, zgodnie z prawodawstwem europejskim, oczyszczalniami ścieków.

Przedstawione badania dotyczą oceny wpływu oczyszczalni ścieków na redukcję zanieczyszczeń odprowadzanych do wód z punktowych źródeł zanieczyszczeń. Do oceny wpływu zrzutów

zanieczyszczeń na odbornik stosuje się, w zależności od celu oceny, różne metody. W tym wypadku wybrano metodę analizy śladu wodnego. Ślad wodny to narzędzie, które pozwala wyrazić ilość wody zużytej zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio w całym cyklu produkcyjnym (np. wyrobów, firmy lub usługi) w celu rozcieńczenia zanieczyszczenia związanego z tym procesem. Koncepcja śladu wodnego została wprowadzona w 2002 roku (Hoekstra, 2003). Od momentu wprowadzenia wskaźnika śladu wodny, ze względu na jego prostotę i użyteczność w praktyce, zyskał dużą popularność wśród naukowców, organów decyzyjnych i użytkowników. W literaturze można znaleźć coraz więcej badań z wykorzystaniem śladu wodnego (Mubako, 2018; Ansorge, Stejskalová i Vološinová, 2019; Zhu i in., 2019). Szczegółowy opis metodologii określania śladu wodnego jest dostępny w wielu językach, w tym również w języku polskim (Fiałkiewicz, Burszta-Adamiak, Malinowski i Kolonko, 2013; Bergier i in., 2019).

Do oceny zanieczyszczenia wód służy tzw. szary ślad wodny. Określa on objętość wody wymaganą do rozcieńczenia ładunku odprowadzanych zanieczyszczeń do takiego stopnia, żeby jakość uzyskanej wody nie przekraczała obowiązujących standardów (Hoekstra, Chapagain, Aldaya i Mekonnen, 2011). Do wyliczenia śladu wodnego oprócz sposobu opartego na klasyfikacji zrzutów zanieczyszczeń (szary ślad wodny) stosuje się też metodę oceny cyklu życia (ang. *life cycle assessment* – LCA), która jest również określana jako ślad wodny (Bergier i in., 2019). Obliczanie śladu wodnego na podstawie wskaźnika LCA

zostało zdefiniowane w międzynarodowej normie ISO 14046:2014.

Oceną prawidłowego funkcjonowania oczyszczalni ścieków za pomocą śladu wodnego zajmowało się w przeszłości wielu autorów i na ten temat zostały opublikowane liczne badania. Shao i Chen (2013) w badaniu śladu wodnego oczyszczalni ścieków zajmowali się bezpośrednimi i pośrednimi kosztami oczyszczania ścieków z użyciem tzw. podejścia hybrydowego i analizy przepływów międzygałęziowych (ang. *input-output*). Analizę przepływów międzygałęziowych wykorzystano również do oszacowania udziału poszczególnych sektorów z obszarów zurbanizowanych (Li, Liu, Yang i Hao, 2016). Gu i inni (2016) zaproponowali, aby zastosować tzw. wskaźnik redukcji śladu wodnego przy określaniu roli oczyszczalni ścieków w zmniejszaniu wpływu człowieka na zasoby wodne. Z kolei Gómez-Llanos, Durán-Barroso i Matías (2018) do oceny poprawy jakości ścieków w procesie oczyszczania wprowadzili nowy wskaźnik – tzw. operatywny szary ślad wodny, tj. różnicę między szarym śladem wodnym bez oczyszczalni i z oczyszczalnią ścieków. Opublikowanych zostało także kilka analiz dotyczących szarego śladu wodnego w wybranych oczyszczalniach ścieków lub na wybranych terytoriach. Fiałkiewicz i inni (2013) zajęli się równowagą hydrologiczną miasta i ustalili ślad wodny Wrocławia. Teodosiu, Barjoveanu, Sluser, Popa i Trofin (2016) porównali metodologię oceny śladu wodnego (ang. *water footprint assessment*) zgodnie z zasadami LCA z metodologią według kwantyfikacji oddziaływania na środowisko (ang. *environmental impact quantification*) na komunalnej oczysz-

czalni ścieków w Iasi, w Rumunii (Barjoveanu, Cojocariu, Robu i Teodosiu, 2010). Morera, Corominas, Poch, Aldaya i Comas (2016) przetestowali metodologię śladu wodnego w oczyszczalni ścieków o wydajności 4000 m³ na dobę w miejscowości La Garriga, w Hiszpanii. Martínez-Alcalá, Pellicer-Martínez i Fernández-López (2018) zbadali wpływ 12 komunalnych oczyszczalni ścieków w regionie Murcia (Hiszpania) na zmniejszenie szarego śladu wodnego nie tylko w przypadku powszechnie spotykanych wskaźników zanieczyszczeń, ale także farmaceutyków. Ansoorge i inni (2019) wykorzystując szary ślad wodny, dokonali oceny zrzutów ścieków z 14 komunalnych oczyszczalni ścieków w północno-zachodnich Czechach z punktu widzenia kryteriów zrównoważonego rozwoju. Johnson i Mehrvar (2019) opublikowali badanie wykorzystujące ślad wodny do oceny ścieków z przemysłu winiarskiego oczyszczanych w oczyszczalni ścieków komunalnych w rejonie Niagara, w Ontario (Kanada). Stejskalová, Ansoorge, Kučera i Vološinová (2019) dokonali oceny zrównoważonego zrzutu ścieków z komunalnych oczyszczalni ścieków w małej zlewni łącznie z obliczeniem śladu wodnego przed modernizacją i po modernizacji tego obiektu. Qin, Sun, Han i Zou (2019) obliczyli szary ślad wodny dla przemysłu, rolnictwa i gospodarstw domowych w 31 prowincjach w Chinach w latach 1998–2012.

W niniejszym badaniu szary ślad wodny jest wykorzystywany do wyrażenia wpływu przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków na redukcję odprowadzanych zanieczyszczeń w czeskiej części międzynarodowego dorzecza Odry. Znaczne zanieczyszcze-

nie wód powierzchniowych w dorzeczu Odry jest postrzegane jako istotny problem o znaczeniu ponadregionalnym, którego rozwiązanie wymaga wymiany informacji i uzgodnienia na poziomie międzynarodowym. Oprócz problemów ponadregionalnych w dorzeczu Odry występują także problemy gospodarki wodnej o charakterze regionalnym, a jednym z nich jest niedostateczny w stosunku do obecnego stanu wiedzy i techniki oraz ustalonych celów środowiskowych dla wód powierzchniowych stopień oczyszczania odprowadzanych ścieków w regionalnych zlewniach cząstkowych.

Metodologia badań

Powierzchnia dorzecza Odry w Republice Czeskiej wynosi 7240 km², co stanowi zaledwie 6% całego dorzecza (MKOO, 2015). W celu realizacji dyrektywy 2000/60/WE ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej międzynarodowy obszar dorzecza Odry (MODO) podzielono na siedem jednostek, z których część obszarów opracowania górnej Odry i Nysy Łużyckiej znajduje się w Republice Czeskiej.

Dane dotyczące ścieków odprowadzanych do wód w ilościach przekraczających 500 m³ miesięcznie lub 6000 m³ rocznie są w Republice Czeskiej ewidencjonowane przez Státní Podniky Povodí (zarządy dorzecza) oraz zapisywane w rejestrze poborów wody i zrzutów ścieków do odbiornika, łącznie z wybranymi danymi dotyczącymi ilości i jakości ścieków surowych na dopływie do oczyszczalni i oczyszczonych odprowadzanych do odbiorników wod-

nych. Informacje o zanieczyszczeniach na dopływie do oczyszczalni oraz zrzutach ścieków oczyszczonych do odbiornika uwzględniają siedem wybranych wskaźników zanieczyszczenia, którymi są: biochemiczne zapotrzebowanie tlenu (BZT₅), chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT_{Cr}), zawiesiny ogólne, rozpuszczone związki mineralne, azot amonowy (N-NH₄⁺), azot nieorganiczny (N_{norg}) i fosfor ogólny (P_{og}).

Do badania śladu wodnego i analizy redukcji zanieczyszczeń wykorzystano dane charakteryzujące 391 oczyszczalni ścieków i miejsc zrzutu ścieków oczyszczonych do odbiorników wodnych w czeskiej części dorzecza Odry, które zebrano w latach 2004–2018 (tab. 1). Komunalne i przemysłowe oczyszczalnie ścieków identyfikowano na podstawie klasyfikacji działalności gospodarczych w Unii Europejskiej, tj. kodów NACE (Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne).

Kalkulacja zmniejszenia szarego śladu wodnego w dorzeczu odbywa się w czterech krokach. Zgodnie z równaniem (1) obliczano szary ślad wodny zarówno generowanych (na dopływie do oczyszczalni), jak i odprowadzanych zanieczyszczeń (na odpływie z oczyszczalni) dla każdego wskaźnika zanieczyszczenia i oraz punktu zrzutu j . Następnie na podstawie wzoru (2) obliczono ślad wodny ścieków surowych doprowadzonych do oczyszczalni i odprowadzanego ładunku zanieczyszczeń dla każdego punktu zrzutu j . W trzecim kroku, zgodnie z równaniem (3), określono szary ślad wodny dorzecza jako sumę śladów wodnych wszystkich miejsc zrzutu. Wreszcie redukcję zanieczyszczeń

TABELA 1. Liczba punktów zrzutów ścieków w czeskiej części dorzecza Odry (badania własne)
TABLE 1. Number of wastewater discharges in the Czech part of Odra river basin (own studies)

Wyszczególnienie Specification	Górna Odra Upper Odra	Nysa Łużycka Lusatian Neisse	Razem Sum
Liczba punktów zrzutów ścieków z redukcją odprowadzanych zanieczyszczeń Number of places of wastewater discharges with pollution reduction	329	62	391
Liczba zapisów zrzutów ścieków w rejestrze z redukcją odprowadzanych zanieczyszczeń Number of records concerning discharges with pollution reduction	2607	446	3053

(sprawność oczyszczania ścieków) określono na podstawie wzoru (4) jako stosunek różnicy szarego śladu wodnego na dopływie i odpływie (w miejscu zrzutu do odbiornika) do szarego śladu wodnego na dopływie.

$$SW_{szary,j,i,k} = \frac{L_{j,i,k}}{c_{max,j,i} - c_{nat,j,i}} \quad (1)$$

$$SW_{szary,j,k} = \max \{ SW_{szary,j,1,k}, SW_{szary,j,2,k}, \dots, SW_{szary,j,i,k} \} \quad (2)$$

$$SW_{szary,k} = \sum_{j=1}^n SW_{szary,j,k} \quad (3)$$

$$redukcja = \frac{SW_{szary,effluent} - SW_{szary,influent}}{SW_{szary,influent}} \quad (4)$$

gdzie:

k – identyfikator (*influent* – dopływ do oczyszczalni, *effluent* – odpływ z oczyszczalni),

$SW_{szary,j,i,k}$ – szary ślad wodny zanieczyszczenia i w miejscu zrzutu j [objętość / czas],

$SW_{szary,j,k}$ – szary ślad wodny oczyszczalni w miejscu zrzutu j [objętość / czas],

$SW_{szary,k}$ – szary ślad wodny analizowanego systemu [objętość / czas],

$L_{j,i,k}$ – ładunek zanieczyszczenia i na dopływie do oczyszczalni albo ładunek zanieczyszczenia i na odpływie z oczyszczalni w miejscu j [masa / czas],

$c_{max,j,i}$ – dopuszczalne stężenie zanieczyszczeń i w odbiorniku w miejscu j [masa / objętość],

$c_{nat,j,i}$ – naturalne stężenie zanieczyszczeń i w odbiorniku j [masa / objętość],
 n – liczba punktów zrzutów.

Poziomy granicznych zawartości monitorowanych zanieczyszczeń podaje czeska norma techniczna wydana w 2017 roku – ČSN 75 7221. Zgodnie z nią maksymalne stężenia zanieczyszczeń w odbiorniku (c_{max}) zostały ustalone na podstawie poziomów dla wód II klasy, a poziom naturalnego stężenia (c_{nat}) określono zgodnie z wartościami dla wód I klasy (tab. 2).

TABELA 2. Maksymalne i naturalne poziomy monitorowanych wskaźników
 TABLE 2. Monitored parameters with their natural and maximum concentration values

Wskaźnik Parameter	c_{nat} [mg·l ⁻¹]	c_{max} [mg·l ⁻¹]
Biochemiczne zapotrzebowanie tlenu Biochemical oxygen demand	2	4
Chemiczne zapotrzebowanie tlenu Chemical oxygen demand	15	25
Zawiesiny ogólne General suspensions	15	25
Rozpuszczone związki mineralne* Dissolved minerals	300	450
Azot nieorganiczny Inorganic nitrogen	2,75	5,55
Fosfor ogólny General phosphorus	0,05	0,15
Azot amonowy Ammonium nitrogen	0,2	0,4

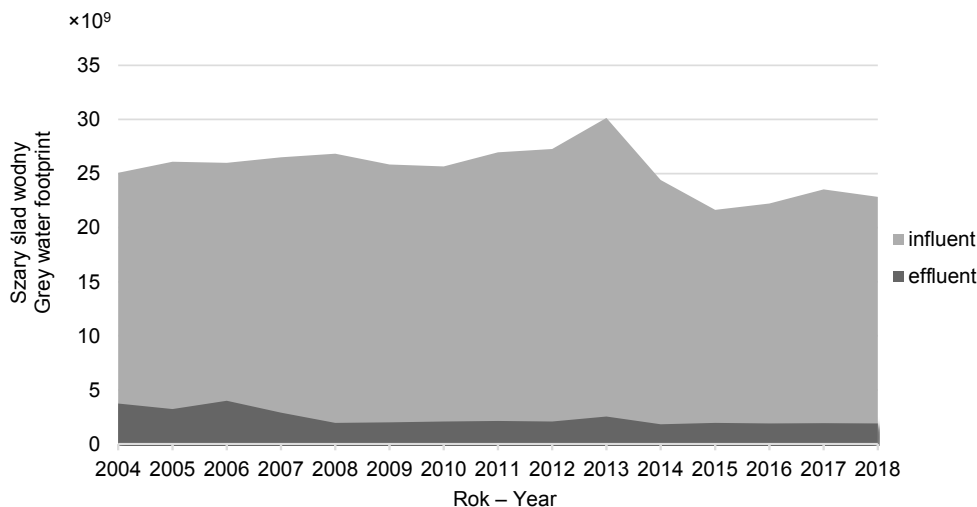
*Wartość zdolności asymilacyjnej ($c_{max}-c_{nat}$) rozpuszczonych związków mineralnych wyprowadzono na podstawie założenia, że rozpuszczone związki mineralne są podzbiorem całkowitej ilości rozpuszczonych substancji stałych. Wartość zdolności asymilacyjnej dla rozpuszczonych związków mineralnych określono na poziomie 3/4 zdolności asymilacyjnej całkowitej ilości rozpuszczonych substancji stałych zgodnie z normą ČSN 75 7221 (Ansorge, Stejskalová, Dlabal i Kučera, 2019).

Wyniki oraz ich dyskusja

Szary ślad wodny zanieczyszczeń odprowadzanych z oczyszczalni ścieków waha się w czeskiej części dorzecza Odry od 1,87 do 4,00·10⁹ m³ rocznie (rys.). Zlewnia cząstkowa górnej Odry ma w nim udział na poziomie 71–92%, a zlewnia Nysy Łużyckiej zaledwie 8–29%. Szary ślad wodny zanieczyszczeń na dopływie do oczyszczalni ścieków wynosi od 21,66 do 30,14·10⁹ m³ rocznie. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń w oczyszczalniach ścieków w czeskiej części dorzecza Odry wynosi 85–95% i podobne wyniki osiąga się również w cząstkowej zlewni górnej Odry, gdzie wielkość redukcji bada-

nych wskaźników osiąga od 86 do 95%. W czeskiej części zlewni Nysy Łużyckiej redukcja zanieczyszczeń kształtuje się w granicach od 58 do 92%. Szczegóły podano w tabeli 3.

Odpływy z oczyszczalni komunalnych (tab. 4) stanowią od 68 do 90% szarego śladu wodnego zrzucanych zanieczyszczeń. W zlewni Nysy Łużyckiej zrzuty z miejskich oczyszczalni ścieków stanowią od 88 do 99% całkowitego szarego śladu wodnego. Podobnie jest z zanieczyszczeniami w ściekach surowych na dopływie do oczyszczalni. Zanieczyszczenia dopływające do miejskich oczyszczalni ścieków stanowią od 68 do 93% szarego śladu wodnego zanieczyszczeń wytwarzanych w całym do-



RYSUNEK. Szary ślad wodny odpływu z oczyszczalni ścieków (ang. *effluent*) i dopływu do oczyszczalni (ang. *influent*) w czeskiej części dorzecza Odry (badania własne)
 FIGURE. Grey water footprint of pollution discharged from WWTPs (*effluent*) and pollution entering the WWTPs (*influent*) in the Czech part of Odra river basin (own studies)

rzeczu Odry – od 65 do 93% w dorzeczu górnej Odry, a od 92 do 99% w zlewni Nysy Łużyckiej. Ścieki odprowadzane z przemysłowych oczyszczalni ścieków (tab. 5) stanowią zatem jedynie niewielką część szarego śladu wodnego.

Przeprowadzone badania mają kilka ograniczeń:

1. W przypadku 168 zapisów dotyczących zrzutów zanieczyszczeń do odbiornika (co stanowi 5,5%) w rejestrze jest brak niektórych danych odnośnie wskaźnika zanieczyszczenia na dopływie do oczyszczalni ścieków, determinującego wartość śladu wodnego w odpływie z oczyszczalni. Zatem obliczenie stopnia zmniejszenia zanieczyszczenia w powyższych przypadkach może nie być całkowicie dokładne.
2. W trakcie badań dysponowano danymi o siedmiu podstawowych wskaźnikach zanieczyszczenia ujętych

w centralnym rejestrze, ale, jak pokazują badania zagraniczne (Martínez-Alcalá i in., 2018), na szary ślad wodny mogą mieć wpływ również substancje inne niż standardowo monitorowane w oczyszczalniach ścieków czy raportowane do rejestrów centralnych. W przypadku 1837 ewidencjonowanych pomiarów jakości ścieków surowych i oczyszczonych (tj. 60,2%) ze względu na niejednakową skuteczność usuwania poszczególnych zanieczyszczeń doszło do zamiany wskaźnika zanieczyszczenia determinującego ślad wodny na dopływie ścieków do oczyszczalni na wskaźnik dominujący na odpływie z oczyszczalni.

3. W 21 przypadkach (0,7%) na oczyszczalni ścieków nastąpił wzrost szarego śladu wodnego (poza przypadkami, o których mowa w pkt 1). Przyczyną mogły być błędy w centralnej bazie danych albo optymalizacja procesu

TABELA 3. Szary ślad wodny zanieczyszczenia na dopływie do oczyszczalni i na odpływie z oczyszczalni w czeskiej części dorzecza Odry (badania własne)

TABLE 3. Grey water footprint of pollution entering the WWTPs (influent) and pollution discharged from WWTPs (effluent) in the Czech part of Odra river basin (own studies)

Rok Year	Jednostka Unit	Szary ślad wodny na dopływie do oczyszczalni Grey water footprint – influent			Szary ślad wodny na odpływie z oczyszczalni Grey water footprint – effluent		
		dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse	dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse
2004	10 ⁹ m ³	25,07	22,60	2,46	3,75	3,25	0,50
2005	10 ⁹ m ³	26,10	23,51	2,59	3,24	2,43	0,81
2006	10 ⁹ m ³	25,99	23,61	2,38	4,00	3,00	1,00
2007	10 ⁹ m ³	26,51	24,40	2,11	2,91	2,07	0,84
2008	10 ⁹ m ³	26,85	24,40	2,44	1,97	1,78	0,18
2009	10 ⁹ m ³	25,85	23,27	2,58	2,00	1,76	0,24
2010	10 ⁹ m ³	25,65	23,79	1,86	2,09	1,91	0,18
2011	10 ⁹ m ³	26,95	24,73	2,22	2,12	1,72	0,40
2012	10 ⁹ m ³	27,26	24,67	2,59	2,08	1,71	0,36
2013	10 ⁹ m ³	30,14	27,71	2,43	2,55	2,08	0,46
2014	10 ⁹ m ³	24,41	21,66	2,75	1,82	1,61	0,22
2015	10 ⁹ m ³	21,66	19,00	2,65	1,95	1,52	0,43
2016	10 ⁹ m ³	22,23	19,59	2,64	1,90	1,45	0,45
2017	10 ⁹ m ³	23,53	20,69	2,84	1,93	1,54	0,39
2018	10 ⁹ m ³	22,85	19,74	3,11	1,90	1,47	0,44

TABELA 4. Szary ślad wodny zanieczyszczenia na dopływie do komunalnej oczyszczalni ścieków i na odpływie z oczyszczalni w czeskiej części dorzecza Odry (badania własne)

TABLE 4. Grey water footprint of pollution entering the municipal WWTPs (influent) and pollution discharged from municipal WWTPs (effluent) in the Czech part of Odra river basin (own studies)

Rok Year	Jednostka Unit	Szary ślad wodny na dopływie do oczyszczalni Grey water footprint – influent			Szary ślad wodny na odpływie z oczyszczalni Grey water footprint – effluent		
		dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra Upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse	dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra Upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse
2004	10 ⁹ m ³	17,73	15,32	2,41	2,57	2,09	0,48
2005	10 ⁹ m ³	19,23	16,69	2,54	2,45	1,67	0,79
2006	10 ⁹ m ³	18,54	16,21	2,33	2,91	1,92	0,98
2007	10 ⁹ m ³	19,32	17,25	2,08	2,23	1,40	0,82
2008	10 ⁹ m ³	19,81	17,40	2,42	1,34	1,17	0,17
2009	10 ⁹ m ³	18,65	16,13	2,52	1,43	1,20	0,23
2010	10 ⁹ m ³	17,95	16,16	1,79	1,55	1,39	0,16
2011	10 ⁹ m ³	18,79	16,77	2,03	1,60	1,25	0,36
2012	10 ⁹ m ³	19,46	16,94	2,52	1,57	1,22	0,35
2013	10 ⁹ m ³	20,41	18,05	2,36	1,89	1,44	0,45
2014	10 ⁹ m ³	19,96	17,27	2,69	1,45	1,25	0,20
2015	10 ⁹ m ³	20,23	17,64	2,60	1,68	1,26	0,42
2016	10 ⁹ m ³	20,39	17,79	2,59	1,66	1,21	0,45
2017	10 ⁹ m ³	21,13	18,31	2,82	1,74	1,35	0,39
2018	10 ⁹ m ³	21,23	18,16	3,08	1,71	1,28	0,43

TABELA 5. Szary ślad wodny zanieczyszczenia na dopływie do przemysłowej oczyszczalni ścieków i na odpływie z oczyszczalni w czeskiej części dorzecza Odry (badania własne)

TABLE 5. Grey water footprint of pollution entering the industrial WWTPs (influent) and pollution discharged from industrial WWTPs (effluent) in the Czech part of Odra river basin (own studies)

Rok Year	Jednostka Unit	Szary ślad wodny na dopływie do oczyszczalni Grey water footprint – influent			Szary ślad wodny na odpływie z oczyszczalni Grey water footprint – effluent		
		dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse	dorzecze Odry Odra river basin	górna Odra upper Odra	Nysa Lużycka Lusatian Neisse
2004	10 ⁹ m ³	7,34	7,29	0,05	1,18	1,16	0,02
2005	10 ⁹ m ³	6,86	6,81	0,05	0,79	0,76	0,03
2006	10 ⁹ m ³	7,45	7,41	0,05	1,09	1,08	0,02
2007	10 ⁹ m ³	7,19	7,15	0,04	0,69	0,67	0,02
2008	10 ⁹ m ³	7,03	7,01	0,02	0,63	0,62	0,01
2009	10 ⁹ m ³	7,20	7,14	0,06	0,57	0,56	0,01
2010	10 ⁹ m ³	7,70	7,64	0,07	0,54	0,52	0,01
2011	10 ⁹ m ³	8,16	7,97	0,19	0,52	0,47	0,05
2012	10 ⁹ m ³	7,80	7,73	0,07	0,51	0,50	0,01
2013	10 ⁹ m ³	9,73	9,66	0,07	0,66	0,64	0,01
2014	10 ⁹ m ³	4,45	4,39	0,06	0,38	0,36	0,01
2015	10 ⁹ m ³	1,42	1,37	0,06	0,27	0,26	0,01
2016	10 ⁹ m ³	1,84	1,79	0,05	0,25	0,24	0,01
2017	10 ⁹ m ³	2,40	2,37	0,03	0,19	0,19	0,00
2018	10 ⁹ m ³	1,61	1,58	0,03	0,19	0,19	0,01

oczyszczania zamierzona z pewnych względów na inny wskaźnik zanieczyszczenia niż te, na podstawie których określano szary ślad wodny.

Wnioski

Jedną z głównych zalet szarego śladu wodnego jest to, że transfiguruje każdy rodzaj zanieczyszczenia wypuszczanego do odbiornika w ilość wody niezbędną do rozcieńczenia wprowadzonego do wody ładunku zanieczyszczenia do takiego stopnia, aby jakość wody nie przekraczała ustalonych standardów. W ten sposób można porównywać ze sobą różne wskaźniki zanieczyszczenia. Jego wadą jest to, że odnosi się wyłącznie do chemizmu wody a nie uwzględnia wpływu odprowadzanych ścieków na stan ekologiczny.

Oczyszczalnie ścieków w znacznym stopniu redukują zanieczyszczenie odprowadzane do odbiornika, a tym samym minimalizują potrzebę rozcieńczenia zrzutu ścieków do bezpiecznego stężenia. W czeskiej części dorzecza Odry oczyszczalnie ścieków zmniejszają nawet o 92% ilość wody potrzebnej do rozcieńczenia odprowadzanych zanieczyszczeń, tj. szary ślad wodny. Czeska część dorzecza Odry jest podzielona na dwa obszary opracowania: około 90% szarego śladu wodnego dotyczy dorzecza górnej Odry, a 10% zlewni Nysy Łużyckiej. Na początku monitorowanego okresu 2004–2018 oczyszczalnie komunalne i przemysłowe przyczyniły się do wielkości szarego śladu wodnego w dorzeczu górnej Odry w 65 : 35. Pod koniec tego okresu stosunek ten wynosił 85 : 15. W zlewni Nysy Łużyckiej również wzrósł odsetek komunalnych oczyszczalni ścieków względem oczyszczalni prze-

mysłowych z około 96 : 4 do 98 : 2. Ze względu na niejednakowy stopień redukcji poszczególnych wskaźników zanieczyszczenia w oczyszczalniach ścieków w 60% oczyszczalni wielkość szarego śladu wodnego na wlocie do oczyszczalni była uwarunkowana innym wskaźnikiem niż na wylocie z oczyszczalni.

Literatura

- Alcama, J., Flörke, M. i Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.247>
- Ansorge, L., Stejskalová, L. i Vološinová, D. (2019). Srovnání výzkumu vodní stopy v ČR a ve světě – bibliometrická analýza. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 61(6), 60-62. Pobrano z: <https://www.vtei.cz/2019/12/srovnani-vyzkumu-vodni-stopy-v-cr-a-ve-svete-bibliometricka-analyza> [dostęp 19.12.2019].
- Ansorge, L., Stejskalová, L., Dlabal, J. i Kučera, J. (2019). Šedá vodní stopa jako ukazatel udržitelného vypouštění odpadních vod – případová studie *Povodí Ohře. Entecho*, 2(2), 12-18. <https://doi.org/10.35933/ENTECHO.2019.12.001>
- Barjoveanu, G., Cojocariu, C., Robu, B. i Teodosiu, C. (2010). Integrated assessment of wastewater treatment plants for sustainable river basin management. *Environmental Engineering and Management Journal*, 9(9), 1251-1258. Pobrano z: <http://eemj.eu/index.php/EEMJ/article/view/634> [dostęp 20.03.2020].
- Bergier, T., Burszta-Adamiak, E., Fiałkiewicz, W., Małek, P., Owsiany, M., Rosiek, K., Rybicki, S.M. i Wojciechowska, E. (2019). *Racjonalizacja wykorzystania zasobów wodnych na terenach zurbanizowanych*. Stowarzyszenie Gmin Polska Sieć „Energie Cités”. Pobrano z: http://www.sladwodnymiast.pl/images/2019/20191108/Racjonalizacja_wykorzystania_zasob%C3%B3w_wodnych_na_terenach_zurbanizowanych.pdf [dostęp 27.02.2020].
- ČSN 75 7221. Kvalita vod. Klasifikace kvality povrchových vod.

- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej. OJ L 327 z 22.12.2000.
- Fialkiewicz, W., Burszta-Adamiak, E., Malinowski, P. i Kolonko, A. (2013). Urban water Footprint – System monitorowania i oceny gospodarowania wodą w miastach. *Ochrona Środowiska*, 35(3), 9-12.
- Gómez-Llanos, E., Durán-Barroso, P. i Matías-Sánchez, A. (2018). Management effectiveness assessment in wastewater treatment plants through a new water footprint indicator. *Journal of Cleaner Production*, 198, 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.062>
- Gu, Y., Dong, Y., Wang, H., Keller, A., Xu, J., Chiramba, T. i Li, F. (2016). Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water–energy nexus perspective. *Ecological Indicators*, 60, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.012>
- Hertel, T.W. i Liu, J. (2019). Implications of water scarcity for economic growth. W *Economy-Wide Modeling of Water at Regional and Global Scales* (strony 11-35). Singapore: Springer.
- Hoekstra, A.Y. (2003). Virtual Water Trade. Proceedings of the international expert meeting on Virtual Water Trade (Value of Water Research Report Series No 12). IHE. Pobrano z: <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf> [dostęp 05.05.2015].
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. i Mekonnen, M.M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Abingdon, UK: Routledge.
- ISO 14046:2014. Environmental management. Water footprint. Principles, requirements and guidelines.
- Johnson, M.B. i Mehrvar, M. (2019). An assessment of the grey water footprint of winery wastewater in the Niagara Region of Ontario, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 214, 623-632. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.311>
- Keeler, B.L., Polasky, S., Brauman, K.A., Johnson, K.A., Finlay, J.C., O'Neill, A., Kovacs, K. i Dalzell, B. (2012). Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(45), 18619-18624. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215991109>
- Li, H., Liu, G., Yang, Z. i Hao, Y. (2016). Urban Gray Water Footprint Analysis Based on Input-Output Approach. *Energy Procedia*, 104, 118-122. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.021>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S.N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J. i Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present and future. *Earth's Future*, 5(6), 545-559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- Martínez-Alcalá, I., Pellicer-Martínez, F. i Fernández-López, C. (2018). Pharmaceutical grey water footprint: Accounting, influence of wastewater treatment plants and implications of the reuse. *Water Research*, 135, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.033>
- Mekonnen, M.M. i Hoekstra, A.Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Międzynarodowa Komisja Ochrony Odry przed Zanieczyszczeniem [MKOO] (2015). *Aktualizacja Planu Gospodarowania Wodami dla Międzynarodowego Obszaru Dorzecza Odry na cykl planistyczny 2016–2021*. Pobrano z: http://mkoo.pl/Grf/MKOO2009/PGW/PGW_2015/MKOO_Plan_MOPO_2016_2021.pdf [dostęp 20.03.2020].
- Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M.M. i Comas, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741-4748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.102>
- Mubako, S.T. (2018). Blue, green, and grey water quantification approaches: A bibliometric and literature review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), 4-19. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2018.03289.x>
- Qin, X., Sun, C., Han, Q. i Zou, W. (2019). Grey Water Footprint Assessment from the Perspective of Water Pollution Sources: A Case Study of China. *Water Resources*, 46(3), 454-465. <https://doi.org/10.1134/S0097807819030187>
- Shao, L. i Chen, G.Q. (2013). Water Footprint Assessment for Wastewater Treatment: Method, Indicator, and Application. *Environmental Science & Technology*, 47(14), 7787-7794. <https://doi.org/10.1021/es402013t>
- Stejskalová, L., Ansoerge, L., Kučera, J. i Vološinová, D. (2019). Využití indikátoru sedé vodní stopy k posouzení role ČOV v malém povodí. W 13. bienální konference Voda. 18–20.09.2019 Poděbrady.

- Teodosiu, C., Barjoveanu, G., Sluser, B.R., Popa, S.A.E. i Trofin, O. (2016). Environmental assessment of municipal wastewater discharges: A comparative study of evaluation methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 395-411. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1029-5>
- United Nations [UN] (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Pobrano z: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication> [dostęp dd.mm.rr].
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Vliet, M.T.H. van, Yillia, P., Ringler, C., Burek, P. i Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WfS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175-222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Zhu, Y., Jiang, S., Han, X., Gao, X., He, G., Zhao, Y. i Li, H. (2019). A Bibliometrics Review of Water Footprint Research in China: 2003–2018. *Sustainability*, 11(18), 5082. <https://doi.org/10.3390/su11185082>

Streszczenie

Wpływ oczyszczalni ścieków na redukcję zanieczyszczeń odprowadzanych w czeskiej części dorzecza Odry. Zanieczyszczenie wód powierzchniowych w całym dorzeczu Odry jest postrzegane jako poważny problem, na który znacząco wpływa niewystarczający stopień oczyszczania ścieków w zlewniach cząstkowych w stosunku do dostępnych najnowocześniejszych technologii i celów środowiskowych dyrektywy 2000/60/WE. Do określenia wpływu przemysłowych i komunalnych oczyszczalni ścieków na redukcję odprowadzanych zanieczyszczeń w czeskiej części międzynarodowego dorzecza Odry wykorzystano metodę oceny szarego śladu wodnego. W czeskiej części dorzecza Odry przeanalizowano dane z 391 oczyszczalni ścieków w latach 2004–2018. Uzyskane wyniki pokazują, że oczyszczalnie ścieków zmniejszają nawet o 92% szary ślad wodny, tj. ilość wody po-

trzebnej do rozcieńczenia zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiornika w czeskiej części dorzecza Odry.

Summary

Effect of wastewater treatment plants to the reduction of pollution discharged in the Czech part of the Odra river basin. Surface water pollution is referred to be a problem in the entire Odra river basin. In sub-basins, an insufficient degree of wastewater treatment has been identified as a major problem – in relation to the best available technologies and environmental objectives of Directive 2000/60/EC. The grey water footprint indicator was used to express the influence of point sources of pollution (industrial and municipal wastewater treatment plants) on discharged pollution reduction in the Czech part of the international Odra river basin. The number of 391 records of wastewater treatment plants for the period 2004–2018 was analysed. The results show that the wastewater treatment plants reduce by up to 92% the potential water needs for dilution of pollution discharged into waters in the Czech part of the Odra river basin.

Authors' address:

Libor Ansorge
<https://orcid.org/0000-0003-3963-8290>
Lada Stejskalová
<https://orcid.org/0000-0003-2271-7574>
Jiří Dlabal
<https://orcid.org/0000-0002-2401-2917>
Elžbieta Čejka
Výzkumný ústav vodohospodářský
T. G. Masaryka, v. v. i.
Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6, Česká republika
e-mail: libor.ansorge@vuv.cz
lada.stejskalova@vuv.cz
jiri.dlabal@vuv.cz
alzbieta.cejka@vuv.cz