



# **Ocena wielkości emisji gazów cieplarnianych ze źródeł rolniczych na poziomie lokalnym w Polsce**

*Paweł Wiśniewski*  
*Uniwersytet Gdański*

## **1. Wprowadzenie**

Ślad węglowy stał się w ostatnich latach popularnym i obiecującym narzędziem do szacowania emisji gazów cieplarnianych (GHG) wywołanej działalnością człowieka, a także ważnym instrumentem w podnoszeniu świadomości i kreowaniu zachowań proekologicznych. Znalazł także zastosowanie w kształtowaniu i zarządzaniu gospodarką niskoemisyjną oraz planowaniu działań na rzecz ochrony klimatu i adaptacji do jego zmian (Finkbeiner 2009, Ercin i Hoekstra 2012, Pandey i Agrawal 2014, Fantozzi i Bartocci 2016, Ibidhi i in. 2017). Mimo powszechnego zastosowania, brak jest jednak jednolitej, obowiązującej na całym świecie definicji śladu węglowego, różne są także metody jego szacowania (Patel 2006, Grubb i Ellis 2007, Hammond 2007, Wiedmann i Minx 2008, Pandey i in. 2011, Wang i in. 2013, Fang i in. 2014). Utrudnia to skuteczne stosowanie tego narzędzia w analizach ilościowych emisji GHG, łagodzeniu skutków globalnego ocieplenia i adaptacji poszczególnych sektorów oraz obszarów wrażliwych na zmiany.

Polska, realizując cele polityki klimatycznej Unii Europejskiej, a także chcąc sprostać nowym wyzwaniom, musi być przygotowana na konieczność przejścia na gospodarkę opartą na integracji jej wszystkich aspektów wokół niskoemisyjnych technologii i działań, wydajnych rozwiązań energetycznych, wykorzystania czystej i odnawialnej energii oraz proekologicznych innowacji technologicznych. Rozwój takiej gospodarki stał się głównym celem – przyjętego przez Ministerstwo Gospodarki w 2015 r. – projektu Narodowego Programu Rozwoju Gospodarki Ni-

skoemisyjnej (NPRGN). Niestety, prace nad ostatecznym przyjęciem tego projektu zostały w 2016 r. zahamowane i obecnie jego status nie jest do końca jasny, a część zawartych w nim obszarów działań i ustaleń została przeniesiona do Strategii na rzecz odpowiedzialnego rozwoju (Bach i in. 2016, Ministerstwo Rozwoju 2016).

Skuteczna transformacja gospodarki wymaga planowania i wdrażania odpowiednich działań na poziomie lokalnym. W tym celu tworzone są plany gospodarki niskoemisyjnej (PGN), stanowiące dokumenty strategiczne, mające określić wizję rozwoju gminy w kierunku gospodarki niskoemisyjnej, a także zwiększyć szansę samorządów w ubieganiu się o środki unijne. Są one odpowiednikiem planów działań na rzecz zrównoważonej energii (SEAP) – kluczowych dokumentów opracowywanych przez sygnatariuszy Porozumienia Burmistrzów w sprawie Klimatu i Energii, stanowiącego inicjatywę Komisji Europejskiej, angażującą władze lokalne i obywateli w działania na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej i wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Z dotychczasowych badań autora (Wiśniewski 2017, Wiśniewski i Kistowski 2017a, 2017b) nad rolą i skutecznością planów gospodarki niskoemisyjnej, przyjmowanych przez lokalne samorządy w celu programowania i koordynacji działań na rzecz niskoemisyjnego rozwoju w Polsce, wynika, że stosowane w tych dokumentach metody obliczania śladu węglowego są mało skuteczne i nie pozwalają na określenie rzeczywistego poziomu emisji GHG. Potwierdzają to także w swych pracach m.in. Gradziuk i Gradziuk (2016) oraz Pietrzyk-Sokulska i in. (2016). Koncentrowanie się niemal wyłącznie na emisji CO<sub>2</sub> bez uwzględniania innych gazów oraz pomijanie w inwentaryzacji rolnictwa – co w przypadku gmin wiejskich i miejsko-wiejskich jest szczególnie nieuzasadnione – sprawia, że wielkości śladu węglowego obliczone na potrzeby planów gospodarki niskoemisyjnej są z reguły niedoszacowane. Problem ten zaobserwowano także w innych krajach europejskich (Larsen i Hertwich 2010, Heinonen i Junnila 2011, Angelakoglou i in. 2015, Zdeb 2015).

W pracy podjęto próbę oceny wielkości śladu węglowego ze źródeł rolniczych na poziomie lokalnym w Polsce. Opracowane dotychczas kalkulatory emisji GHG z rolnictwa są w dużej części zbyt skomplikowane i często wymagają wprowadzenia danych trudno dostępnych na poziomie lokalnych samorządów (Wu 2011, Colomb i in. 2012, Tuomisto i in. 2014). Zaproponowane w pracy uproszczone rozwiązanie może

być z powodzeniem stosowane – przy wykorzystaniu niemal wyłącznie danych statystyki publicznej – przez jednostki samorządu terytorialnego do samodzielnego wykonania obliczeń śladu węglowego oraz monitorowania wpływu podejmowanych działań na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

## **2. Materiał i metody**

Obliczeń śladu węglowego z rolnictwa dokonano dla wszystkich gmin w Polsce. Zastosowano w tym celu uproszczoną metodykę, wdrożoną wcześniej w Pilotażowym programie niskowęglowego rozwoju powiatu starogardzkiego w województwie pomorskim, zrealizowanym w latach 2014-2015 w ramach projektu „Dobry Klimat dla Powiatów” przez Instytut na rzecz Ekorozwoju, Związek Powiatów Polskich oraz Community Energy Plus we współpracy ze społeczeństwem, władzami i instytucjami powiatu starogardzkiego. Jest to pierwszy tego typu dokument poświęcony gospodarce niskoemisyjnej, sporządzony w skali powiatu w Polsce, opracowany przy udziale autora niniejszej pracy (Instytut na rzecz Ekorozwoju 2015). Zaproponowane rozwiązanie jest zgodne z metodyką i standardowymi wskaźnikami Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC 2000, 2006), a także – w celu uzyskania dokładniejszych danych o emisji – uwzględnia elementy metodyki krajowej oraz wskaźniki emisji opracowane przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) na potrzeby sporządzania corocznych raportów inwentaryzacyjnych.

Obliczając ślad węglowy z rolnictwa w poszczególnych gminach skupiono się na trzech głównych źródłach emisji gazów cieplarnianych z tego sektora w Polsce. Należą do nich: fermentacja jelitowa zwierząt gospodarskich (główne źródło emisji metanu), odchody zwierzęce (źródło emisji metanu i podtlenku azotu) oraz użytkowanie gleb rolnych (źródło emisji podtlenku azotu). Uwzględniono również spalanie resztek roślinnych (jako źródło emisji metanu i podtlenku azotu), mimo iż jego udział w ogólnej emisji GHG jest znacznie niższy.

Przy szacowaniu wielkości emisji metanu pochodzącej z fermentacji jelitowej (podobnie jak w przypadku innych źródeł emisji związanych z hodowlą zwierząt gospodarskich) wykorzystano wyniki Powszechnego Spisu Rolnego (PSR) z 2010 r., dostępne w Banku Danych

Lokalnych Głównego Urzędu Statystycznego (BDL GUS), dotyczące pogłównia zwierząt gospodarskich (z rozróżnieniem na krowy mleczne, pozostałe bydło, konie, trzodę chlewną i drób). W przypadku bydła wykorzystano dostępne krajowe wskaźniki emisji CH<sub>4</sub> z fermentacji jelitowej, stosowane przez KOBiZE przy sporządzaniu corocznych raportów inwentaryzacyjnych. Zostały one opracowane w oparciu o dzienne zapotrzebowanie na energię dla wybranych kategorii bydła (IPCC 2006) według wzoru:

$$EF = (GE \cdot \frac{Y_m}{100} \cdot 365) / 55,65 \quad (1)$$

gdzie:

EF – wskaźnik emisji [kg CH<sub>4</sub>/zwierzę/rok],

GE – zapotrzebowanie na energię [MJ/zwierzę/dzień],

Y<sub>m</sub> – współczynnik konwersji do metanu (udział GE w paszy przekształcony w metan) [%].

Z uwagi na brak krajowych wskaźników emisji metanu z fermentacji jelitowej koni oraz trzody chlewnej, obliczenia dla tych zwierząt przeprowadzono w oparciu o bardziej ogólne, domyślne wskaźniki rekomendowane przez IPCC (IPCC 2006). Krajowe (w przypadku bydła i trzody chlewnej) oraz domyślne wskaźniki (dla koni i drobiu) wykorzystano również przy obliczaniu emisji CH<sub>4</sub> z odchodów zwierząt gospodarskich (tabela 1). Obliczeń emisji podtlenku azotu z odchodów zwierzęcych dokonano z uwzględnieniem udziału poszczególnych systemów utrzymania zwierząt w Polsce (bezściołowy, ściółkowy, pastwiskowy) określonego w krajowych raportach inwentaryzacyjnych (KOBiZE 2017), domyślnych wskaźników zawartości azotu w odchodach zwierząt gospodarskich oraz domyślnych współczynników emisji N<sub>2</sub>O-N dla różnych sposobów gospodarowania odchodami zwierzęcymi (IPCC 2006).

Obliczając emisję N<sub>2</sub>O powstałą wskutek użytkowania gleb, uwzględniono:

- masę azotu w użytych nawozach mineralnych, pomniejszoną o ilość wyemitowaną w postaci amoniaku i tlenków azotu NO<sub>x</sub>,
- masę azotu w użytych nawozach organicznych, skorygowaną o emisję amoniaku i tlenków azotu NO<sub>x</sub>, z wyłączeniem ilości azotu zawartego w odchodach wydalanych przez zwierzęta na pastwisku,

- masę azotu wnoszonego do gleb w wyniku wiązania biologicznego przez rośliny motylkowate (bobowate),
- masę azotu wnoszonego do gleb z pozbiorowymi resztkami roślinnymi,
- emisję z upraw gleb organicznych,
- emisję z odchodów zwierząt pozostawionych na pastwiskach,
- emisję pośrednią z depozycji azotu atmosferycznego,
- emisję pośrednią z wymywania azotu z gruntu.

**Tabela 1.** Wskaźniki wykorzystane przy szacowaniu wielkości emisji CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O z fermentacji jelitowej i odchodów zwierząt gospodarskich

**Table 1.** Indicators used to estimate CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from enteric fermentation and livestock manure

Zwierzęta	Wskaźniki emisji [kg/zwierzę/rok]			Udział systemów utrzymania zwierząt gospodarskich* [%]		
	CH <sub>4</sub> z fermentacji jelitowej	CH <sub>4</sub> z odchodów	azot wydalany w odchodach	B	Ś	P
Krowy mleczne	122,0	11,87	70,26	10,5	79,2	10,3
Pozostałe bydło	49,65	2,15	49,95	5,1	82,9	12,0
Trzoda chlewna	1,5	3,07	30,22	24,3	75,7	–
Konie	18,0	1,56	41,28	–	78,0	22,0
Drób	–	0,03	0,54	11,0	89,0	–

\*Systemy utrzymania zwierząt: B – bezściołowy, Ś – ściółkowy, P – pastwiskowy

Źródło: opracowanie własne na podstawie KOBiZE (2017)

Niezbędne do obliczeń dane, dotyczące rocznego zużycia nawozów mineralnych, pogłowia zwierząt gospodarskich oraz powierzchni gleb organicznych pozyskano z BDL GUS. Wielkość rocznych zbiorów głównych roślin uprawnych (pszenicy, żyta, jęczmienia, owsa, pszenżyta, mieszanki zbożowej, ziemniaków, rzepaku, kukurydzy i roślin strączkowych) określono wykorzystując dane dotyczące powierzchni zasiewów

w poszczególnych gminach oraz średniego plonowania tych roślin w województwie (na podstawie wyników PSR z 2010 r.). W obliczeniach wielkości emisji związanej z użytkowaniem gleb wykorzystano ponadto wskaźniki rekomendowane przez IPCC (2000, 2006) i KOBiZE (2017).

Szacując wielkość emisji związanej ze stosowaniem nawozów mineralnych przyjęto domyślny wskaźnik emisji podtlenku azotu na poziomie 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N/kg N (IPCC 2006). Wskaźnik ten zastosowano również przy obliczaniu masy azotu wnoszonego do gleb w wyniku wiązania biologicznego przez rośliny bobowate oraz z resztkami roślinnymi. Masę azotu pochodzącego z użycia nawozów mineralnych skorygowano o ilość wyemitowaną w postaci amoniaku i tlenków azotu NO<sub>x</sub> według wzoru:

$$F_{SN} = N_{FERT} \cdot (1 - \text{Frac}_{GASF}) \quad (2)$$

gdzie:

$F_{SN}$  – masa azotowych nawozów mineralnych zastosowanych na gleby skorygowana emisją w postaci NH<sub>3</sub> i NO<sub>x</sub> [kg N/rok],

$N_{FERT}$  – zużycie nawozów mineralnych [kg/rok],

$\text{Frac}_{GASF}$  – wskaźnik określający udział azotu w nawozach mineralnych wyemitowanego jako NH<sub>3</sub> i NO<sub>x</sub>, wynoszący 0,1 kg NH<sub>3</sub>-N+NO<sub>x</sub>-N/kg nawozów.

W przypadku emisji związanej ze stosowaniem nawozów organicznych, masę azotu skorygowano o emisję amoniaku i tlenków azotu NO<sub>x</sub>, z wyłączeniem ilości azotu zawartego w odchodach wydalanych przez zwierzęta na pastwisku, zgodnie ze wzorem:

$$F_{AM} = \sum_T (N_{(T)} \cdot \text{Nex}_{(T)}) \cdot (1 - \text{Frac}_{GASM}) \cdot (1 - \text{Frac}_{GRAZ}) \quad (3)$$

gdzie:

$F_{AM}$  – masa azotu zawarta w nawozach organicznych skorygowana emisją w postaci NH<sub>3</sub> i NO<sub>x</sub> [kg N/rok],

$\text{Nex}$  – domyślne wskaźniki zawartości azotu w odchodach zwierząt gospodarskich (tabela 1),

$\sum_T (N_{(T)} \cdot \text{Nex}_{(T)})$  – całkowita ilość azotu zawartego w nawozach organicznych, wyprodukowana w ciągu roku [kg N/rok],

$Frac_{GASM}$  – wskaźnik określający udział azotu w odchodach wyemitowanego w postaci  $NH_3$  i  $NO_x$ , wynoszący 0,2 kg  $NH_3-N+NO_x-N/kg$  azotu wydalonego przez zwierzęta,

$Frac_{GRAZ}$  – wskaźnik określający udział azotu w odchodach pozostawionych na glebach przez wypasane zwierzęta, wynoszący 0,077 kg  $N_2O-N/rok$ .

Roczną ilość azotu związanego przez uprawiane w poszczególnych gminach rośliny strączkowe obliczono według wzoru:

$$F_{BN} = Crop_{BF} \cdot (1 + Res / Crop) \cdot Frac_{DM} \cdot Frac_{NCR} \quad (4)$$

gdzie:

$F_{BN}$  – masa azotu związanego przez rośliny strączkowe [kg/rok],

$Crop_{BF}$  – roczna wielkość zbiorów roślin strączkowych [kg],

$Res/Crop$  – stosunek plonu nierolniczego do rolniczego (tabela 2),

$Frac_{DM}$  – udział suchej masy w biomacie nadziemnej (tabela 2),

$Frac_{NCR}$  – zawartość azotu w biomacie roślin strączkowych (tabela 2).

Masę azotu wnoszonego do gleb z pozbiorowymi resztkami roślinnymi obliczono zgodnie ze wzorem:

$$F_{CR} = Crop_{\gamma} \cdot Frac_{DM} \cdot Res / Crop \cdot Frac_{NCR} \cdot (1 - Frac_{BURN} - Frac_R) \quad (5)$$

gdzie:

$F_{CR}$  – masa azotu w resztkach roślinnych pozostałych w glebie [kg],

$Crop_{\gamma}$  – roczna wielkość zbiorów danej uprawy [kg],

$Frac_{DM}$  – udział suchej masy w biomacie nadziemnej (tabela 2),

$Res/Crop$  – stosunek plonu nierolniczego do rolniczego (tabela 2),

$Frac_{NCR}$  – zawartość azotu w biomacie roślin (tabela 2),

$Frac_{BURN}$  – udział spalonej biomasy (tabela 2),

$Frac_R$  – udział biomasy danej uprawy usuniętej z pola (tabela 2).

Emisję bezpośrednią z uprawy gleb organicznych oszacowano w oparciu o ich powierzchnię oraz domyślny współczynnik emisji dla klimatu chłodnego, wynoszący 8 kg  $N_2O-N/rok$  (IPCC 2000). Wielkość emisji pochodzącej z odchodów zwierzęcych pozostawionych na pastwiskach obliczono z kolei biorąc pod uwagę udział poszczególnych syste-

mów utrzymania zwierząt w Polsce oraz domyślne wskaźniki zawartości azotu w odchodach zwierząt gospodarskich (tabela 1), wykorzystując przy tym wzór:

$$N_2O - N_{GR} = Nex_{GR} \cdot EF_{GR} \quad (6)$$

gdzie:

$N_2O - N_{GR}$  – emisja podtlenku azotu z odchodów zwierząt pozostawionych na pastwiskach [kg  $N_2O - N$ ],

$Nex_{GR}$  – masa azotu pozostawionego przez zwierzęta na pastwiskach [kg],

$EF_{GR}$  – wskaźnik emisji podtlenku azotu dla pastwiskowego chowu zwierząt, wynoszący 0,02 kg  $N_2O - N$ /kg N.

Wielkość emisji pośredniej z depozycji azotu atmosferycznego obliczono według wzoru:

$$N_2O_{(G)} - N = \left\{ (N_{FERT} \cdot Frac_{GASF}) + \left[ \sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)}) \right] \cdot Frac_{GASM} \right\} \cdot EF_{AD} \quad (7)$$

gdzie:

$N_2O_{(G)} - N$  – emisja podtlenku azotu w wyniku depozycji związków azotu z atmosfery do gruntu [kg  $N_2O - N$ ],

$N_{FERT}$  – roczne zużycie nawozów mineralnych w gminie w przeliczeniu na czysty azot [kg],

$Frac_{GASF}$  – wskaźnik określający udział azotu w nawozach mineralnych wyemitowany jako  $NH_3$  i  $NO_x$ , wynoszący 0,1 kg  $NH_3 - N + NO_x - N$ /kg zastosowanych nawozów,

$Nex$  – domyślne wskaźniki zawartości azotu w odchodach zwierząt gospodarskich (tabela 1),

$\sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)})$  – całkowita masa azotu wydalanego w odchodach zwierząt [kg],

$Frac_{GASM}$  – wskaźnik określający udział azotu w odchodach wyemitowany w postaci  $NH_3$  i  $NO_x$ , wynoszący 0,2 kg  $NH_3 - N + NO_x - N$ /kg azotu wydalonego przez zwierzęta,

$EF_{AD}$  – domyślny wskaźnik emisji z depozycji związków azotu z atmosfery, wynoszący 0,01 kg  $N_2O - N$ /kg  $NH_4 - N$  i  $NO_x - N$ .

Do oceny emisji pośredniej z wymywania azotu z gruntu zastosowano wzór:

$$N_2O_{(L)} - N = [N_{FERT} + \sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)})] \cdot Frac_{LEACH} \cdot EF_{LR} \quad (8)$$



gdzie:

$N_{2O(L)-N}$  – emisja podtlenku azotu wskutek wymywania związków azotu z gruntu do wód [kg  $N_2O-N$ ],

$N_{FERT}$  – roczne zużycie nawozów mineralnych w gminie w przeliczeniu na czysty azot [kg],

$N_{ex}$  – domyślne wskaźniki zawartości azotu w odchodach zwierząt gospodarskich (tabela 1),

$\Sigma_T(N_{(T)} \cdot N_{ex(T)})$  – całkowita masa azotu wydalanego w odchodach zwierząt [kg],

$Frac_{LEACH}$  – udział azotu wymywanego jako  $NH_3$  i  $NO_x$ , wynoszący 0,3 kg N/kg azotu w zastosowanych nawozach mineralnych,

$E_{FLR}$  – domyślny wskaźnik emisji podtlenku azotu z wymywania azotu z gruntu, wynoszący 0,0075 kg  $N_2O-N$ /kg azotu wymytego.

**Tabela 2.** Wskaźniki wykorzystane do obliczeń emisji  $CH_4$  i  $N_2O$  ze spalania resztek roślinnych oraz użytkowania gleb rolnych

**Table 2.** Coefficients used to estimate  $CH_4$  and  $N_2O$  emissions from plant residue combustion and use of agricultural lands

Uprawa	Res/Crop	Frac <sub>DM</sub>	Frac <sub>BURN</sub>	Ef <sub>BURN</sub>	C	N	Frac <sub>R</sub>
Pszenica	0,90	0,85	0,005	0,90	0,4853	0,0068	0,70
Żyto	1,40	0,86	0,005	0,90	0,4800	0,0053	0,70
Jęczmień	0,80	0,86	0,005	0,90	0,4567	0,0069	0,70
Owies	1,10	0,86	0,004	0,90	0,4700	0,0075	0,70
Pszenżyto	1,10	0,86	0,005	0,90	0,4853	0,0063	0,70
Mieszanki zbożowe	0,90	0,86	0,004	0,90	0,4730	0,0071	0,70
Kukurydza	1,30	0,52	0,002	0,90	0,4709	0,0094	0,10
Ziemniaki	0,10	0,25	0,100	0,85	0,4226	0,0203	0,01
Rzepak	1,20	0,87	0,030	0,90	0,4500	0,0068	0,10
Strączkowe	0,90	0,86	0,001	0,90	0,4500	0,0180	0,10

gdzie:

Res/Crop – stosunek plonu nierolniczego do rolniczego, Frac<sub>DM</sub> – udział suchej masy w biomase nadziemnej, Frac<sub>BURN</sub> – udział spalanej frakcji,

Ef<sub>BURN</sub> – efektywność spalania, C – zawartość węgla w biomase, N – zawartość azotu w biomase, Frac<sub>R</sub> – udział biomasy usuniętej z pola

Źródło: opracowanie własne na podstawie KOBiZE (2017)

Wielkość emisji gazów cieplarnianych pochodzącej ze spalania resztek roślinnych oszacowano na podstawie rocznej wielkości zbiorów danej uprawy oraz współczynników określonych w krajowym raporcie inwentaryzacyjnym (KOBiZE 2017). W tabeli 2 przedstawiono współczynniki odpowiadające roślinom uprawnym uwzględnionym w niniejszych obliczeniach.

W celu ujednoczenia wyników oraz przeprowadzenia analiz statystycznych i porównawczych, oszacowane – na podstawie wyżej wymienionych danych i wskaźników – wielkości emisji GHG z poszczególnych źródeł związanych z działalnością rolniczą, wyrażono w ekwiwalencie dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2\text{eq}$ ), przyjmując wskaźniki globalnego ocieplenia (GWP) określone w piątym raporcie oceny zmiany klimatu IPCC (IPCC 2013). Ich wartości wynoszą: 1 dla  $\text{CO}_2$ , 28 dla  $\text{CH}_4$  i 265 dla  $\text{N}_2\text{O}$ . W celu zaprezentowania rozmieszczenia przestrzennego wielkości emisji GHG ze źródeł rolniczych w polskich gminach wykorzystano oprogramowanie GIS – MapInfo Pro.

### 3. Wyniki i dyskusja

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartości śladu węglowego z rolnictwa w polskich gminach wahają się od 0,01 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  w gminie miejsko-wiejskiej Międzyzdroje do 289,48 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  w gminie wiejskiej Wierzchowo w województwie zachodniopomorskim, przy średniej wartości bezwzględnej 13,85 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  i odchyleniu standardowym 14,96 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  (tabela 3, rysunek 1). W przeliczeniu na jednego mieszkańca, wielkości te kształtują się od 2 kg  $\text{CO}_2\text{eq/rok}$  w Międzyzdrojach do 67,15  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  w Wierchowiu, przy średniej krajowej wynoszącej 2,17  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$  i odchyleniu standardowym 3,18  $\text{Mg CO}_2\text{eq/rok}$ .

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że rolnictwo w Polsce jest źródłem 34280,89 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq}$ , co – w stosunku do danych inwentaryzacyjnych KOBiZE z 2017 r. (KOBiZE 2017) – stanowi 8,9% całkowitej emisji krajowej gazów cieplarnianych. 69,7% łącznej emisji ze źródeł rolniczych pochodzi z gmin wiejskich, 28,4% z gmin miejsko-wiejskich, natomiast z gmin miejskich jedynie 1,9%. Najwyższą średnią roczną emisją bezwzględną z rolnictwa charakteryzują się jednak jednostki miejsko-wiejskie. Wynosi ona 16,32 tys.  $\text{Mg CO}_2\text{eq}$  i jest niemal o 8% wyższa od średniej emisji w gminach wiejskich i prawie ośmiokrotnie

wyższa w stosunku do gmin miejskich (tabela 3). Biorąc pod uwagę średnią wielkość emisji *per capita*, najwyższą wartością cechują się gminy wiejskie (2,64 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok na mieszkańca). W gminach miejsko-wiejskich jest ona o 0,69 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok na mieszkańca niższa, w miejskich zaś wynosi średnio zaledwie 0,17 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok na mieszkańca.

**Tabela 3.** Statystyki opisowe wielkości śladu węglowego z rolnictwa (w ekwiwalencie CO<sub>2</sub>) w polskich gminach

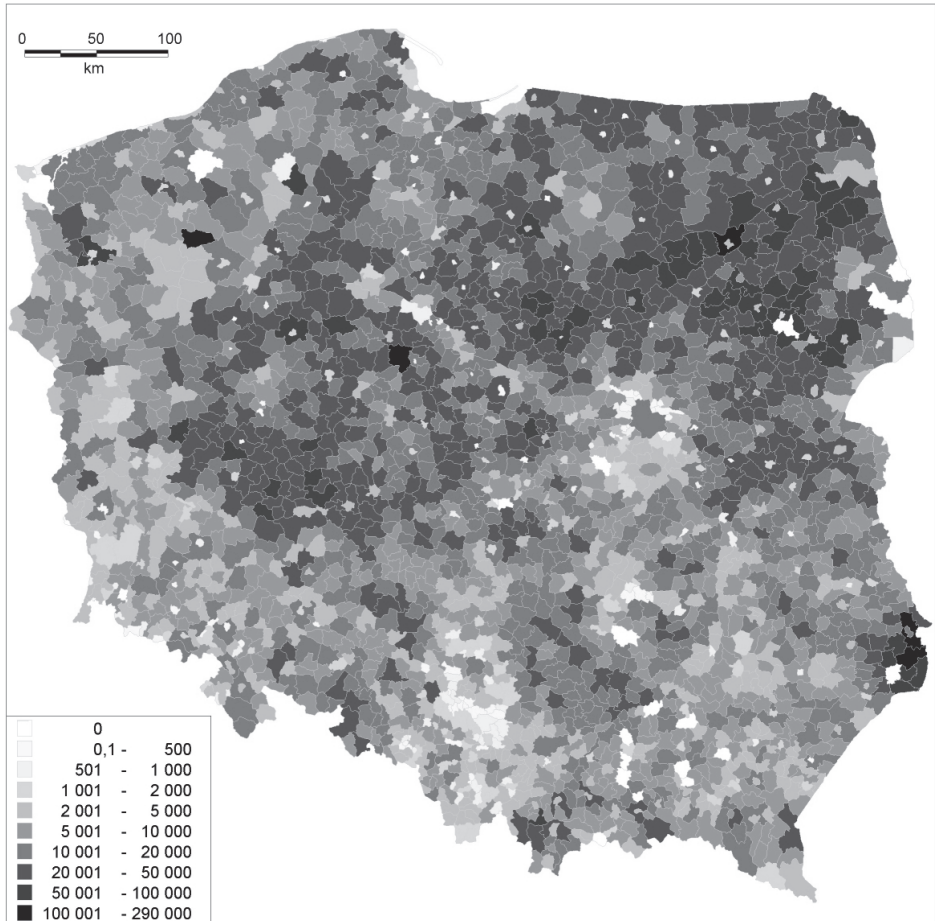
**Table 3.** Descriptive statistics of the carbon footprint from agriculture (in CO<sub>2</sub> equivalent) in Polish communes

Źródło emisji*	Gminy wiejskie				Gminy miejsko-wiejskie			
	tys. Mg CO <sub>2</sub> eq/rok							
	min.	maks.	średnia	σ	min.	maks.	średnia	σ
FJ	0,00	59,22	6,45	7,40	0,00	45,24	6,42	7,16
OZ	0,00	173,79	2,79	5,26	0,00	25,33	3,17	3,65
GR	0,05	116,01	5,93	6,62	0,00	87,91	6,73	6,16
SR	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
R	0,05	289,48	15,17	15,47	0,01	121,55	16,34	14,61
Źródło emisji*	Gminy miejskie				Wszystkie gminy			
	tys. Mg CO <sub>2</sub> eq/rok							
	min.	maks.	średnia	σ	min.	maks.	średnia	σ
FJ	0,00	4,90	0,47	0,71	0,00	59,22	5,72	7,15
OZ	0,00	5,11	0,38	0,61	0,00	173,79	2,59	4,65
GR	0,01	13,14	1,29	1,56	0,00	116,01	5,56	6,33
SR	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
R	0,01	15,04	2,13	2,43	0,01	289,48	13,85	14,96

\*Źródło emisji: FJ – fermentacja jelitowa, OZ – odchody zwierzęce, GR – grunty rolne, SR – spalanie resztek roślinnych, R – razem  
Źródło: opracowanie własne

Z analizy przestrzennego rozmieszczenia gmin i obliczonych dla nich wielkości śladu węglowego z rolnictwa wynika, że wyższym poziomem emisji gazów cieplarnianych z tego sektora charakteryzują się z reguły jednostki położone w północno-wschodniej części Polski i w Wielkopolsce (rysunek 1). Ma to najprawdopodobniej związek z większym udziałem gospodarstw dużych (powyżej 15 ha) na tych obszarach, intensywną

produkcją zwierzęcą oraz funkcjonującym tam nadal – zwłaszcza na gruntach po byłych PGR-ach – systemem gospodarki wielkoobszarowej z monokulturami roślin i uproszczonym płodozmianem, co przyczynia się m.in. do nasilenia procesów erozyjnych, zmniejszenia zawartości glebowej materii organicznej i zbyt słabej sekwestracji węgla w glebie (Józefaciuk i Józefaciuk 1999, Wojtasik i in. 2008, Wysocka-Czubaszek i in. 2018).



**Rys. 1.** Emisja gazów cieplarnianych ze źródeł rolniczych w polskich gminach w Mg CO<sub>2</sub>eq (źródło: opracowanie własne)

**Fig. 1.** Greenhouse gas emissions from agricultural sources in Polish communes in Mg CO<sub>2</sub>eq (source: own study)

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że ponad połowa łącznej emisji z rolnictwa w polskich gminach związana jest z hodowlą zwierząt gospodarskich, z czego 41,2% pochodzi z fermentacji jelitowej, a 18,7% z odchodów zwierzęcych. Jej istotnym źródłem jest również użytkowanie gleb rolnych (40,1%), w szczególności emisja bezpośrednia z uprawy gleb organicznych oraz stosowania nawozów mineralnych, a także emisja pośrednia z wymywania związków azotu z gruntu. Nie-wielki udział w łącznej emisji ze źródeł rolniczych ma spalanie resztek roślinnych (0,02%). Dominujący wpływ hodowli zwierząt gospodarskich na wielkość emisji gazów cieplarnianych zauważalny jest zarówno w gminach wiejskich (42,5% z fermentacji jelitowej i 18,4% z odchodów zwierzęcych przy 39,1% z użytkowania gruntów rolnych), jak i w jednostkach miejsko-wiejskich (39,3% z fermentacji jelitowej i 19,4% z odchodów zwierzęcych, przy 41,2% z gruntów rolnych). W gminach miejskich dominującym źródłem emisji z rolnictwa jest użytkowanie gruntów (60,2%). Hodowla zwierząt gospodarskich w gminach tego typu odpowiada łącznie za 39,8% ogólnej emisji ze źródeł rolniczych.

Przeprowadzone analizy statystyczne wskazują na wysokie i bardzo wysokie korelacje, w szczególności między wielkością emisji gazów cieplarnianych z rolnictwa a pogłowiem bydła i trzody chlewnej, zużyciem nawozów mineralnych i powierzchnią gleb organicznych (tabela 4). Otrzymane współczynniki korelacji liniowej Pearsona między tymi zmiennymi są zbliżone do wyników modelowania emisji podtlenku azotu ze źródeł rolniczych z wykorzystaniem regresji liniowej przeprowadzonego przez Kolasę-Więcek (2013) oraz wyników wcześniejszych badań autora nad wpływem użytkowania gruntów na emisję  $N_2O$ , należącego do głównych gazów cieplarnianych pochodzących z rolnictwa (Wiśniewski i Kistowski 2017c). Zauważalne są jednak różnice w sile związków korelacyjnych w zależności od typu gminy. W przypadku gmin miejsko-wiejskich zaobserwowano prawie pełną zależność między wielkością emisji a pogłowiem bydła. Gminy miejskie natomiast cechują się zdecydowanie wyższymi niż jednostki wiejskie i miejsko-wiejskie zależnościami między wielkością emisji a zużyciem nawozów mineralnych i powierzchnią gleb organicznych.

**Tabela 4.** Współczynniki korelacji liniowej Pearsona między wybranymi zmiennymi a wielkością emisji CO<sub>2</sub>eq z rolnictwa w polskich gminach  
**Table 4.** Pearson's correlation coefficient between selected variables and CO<sub>2</sub>eq emissions from agriculture in Polish communes

Zmienna	Gminy			
	wiejskie	miejsko-wiejskie	miejskie	wszystkie gminy
Pogłowie bydła	0,779	0,911	0,760	0,828
Pogłowie trzody chlewnej	0,575	0,593	0,575	0,567
Pogłowie koni	0,184	0,214	0,529	0,256
Pogłowie drobiu	0,138	0,265	0,460	0,190
Zużycie nawozów mineralnych	0,537	0,548	0,779	0,576
Zbiory pszenicy	0,154	0,236	0,693	0,229
Zbiory żyta	0,292	0,291	0,483	0,343
Zbiory jęczmienia	0,255	0,382	0,621	0,345
Zbiory owsa	0,226	0,165	0,552	0,270
Zbiory pszenżyta	0,442	0,542	0,593	0,513
Zbiory mieszanek zbożowych	0,503	0,572	0,509	0,556
Zbiory kukurydzy	0,114	0,180	0,525	0,168
Zbiory ziemniaków	0,113	0,126	0,555	0,164
Zbiory rzepaku	0,087	0,199	0,579	0,170
Zbiory roślin strączkowych	0,328	0,268	0,410	0,314
Powierzchnia gleb organicznych	0,505	0,559	0,694	0,544

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Wnioski

Oszacowana na podstawie obliczeń własnych wielkość emisji ze źródeł rolniczych w polskich gminach wynosi łącznie 34280,89 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq, co stanowi 8,9% całkowitej emisji krajowej gazów cieplarnianych. Niemal 70% emisji z sektora rolniczego w Polsce pochodzi z gmin wiejskich, a nieco ponad 28% z gmin miejsko-wiejskich. Gminy miejskie są źródłem 1,9% rolniczej emisji gazów cieplarnianych.

Wielkości bezwzględnej emisji gazów cieplarnianych ze źródeł rolniczych w polskich gminach wahają się od 0,01 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok w gminie miejsko-wiejskiej Międzyzdroje do 289,48 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok w gminie wiejskiej Wierzchowo, przy średniej wartości bezwzględnej 13,85 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok i odchyleniu standardowym 14,96 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok. W przeliczeniu na jednego mieszkańca, wielkości te kształtują się od 2 kg CO<sub>2</sub>eq/rok w Międzyzdrojach do 67,15 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok w Wierzchowie, przy średniej krajowej wynoszącej 2,17 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok i odchyleniu standardowym 3,18 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok.

W gminach wiejskich i miejsko-wiejskich zauważalny jest dominujący wpływ hodowli zwierząt gospodarskich na wielkość emisji z rolnictwa. Odpowiada ona w tych jednostkach za ponad 50% łącznej emisji z tego sektora. W gminach miejskich natomiast dominującym źródłem emisji z rolnictwa jest użytkowanie gruntów, odpowiadające za nieco ponad 60% emisji rolniczych.

Uzyskane rezultaty potwierdzają celowość uwzględniania w planach gospodarki niskoemisyjnej emisji gazów cieplarnianych pochodzących z sektora rolniczego i źródeł pokrewnych. Bez ich rozpoznania nie jest możliwe poprawne zaplanowanie działań, które mają prowadzić do ograniczenia tych emisji oraz ich negatywnych skutków dla atmosfery, klimatu oraz innych elementów ekosystemów. Potrzeba ta dotyczy szczególnie gmin wiejskich i miejsko-wiejskich, ale również wymaga rozważenia w gminach miejskich, gdzie znaczny jest udział użytków rolnych i innych terenów o wysokiej aktywności biologicznej.

Przedstawiona w pracy uproszczona metodyka, zgodna z wytycznymi i wskaźnikami IPCC oraz KOBiZE, umożliwi lokalnym samorządom samodzielne wykonanie obliczeń śladu węglowego z rolnictwa na podstawie ogólnodostępnych danych statystyki publicznej.

## Literatura

- Angelakoglou, K., Gaidajis, G., Lympelopoulos, K., Botsaris, P.N. (2015). Carbon Footprint Analysis of Municipalities – Evidence from Greece. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 8(4), 15-23.
- Bach, I., Evans, N., Karaczun, Z., Riedel, A., Skajewska, A. (2016). *Budowa gospodarki niskoemisyjnej. Praktyka na poziomie lokalnym w Polsce i Niemczech*. Warszawa: Polski Klub Ekologiczny Okręg Mazowiecki.

- Colomb, V., Bernoux, M., Bockel, L., Chotte, J. L., Martin, S., Martin-Phipps, C., Mousset, J., Tinlot, M., & Touchemoulin, O. (2012). *Review of GHG calculators in agriculture and forestry sectors: A guideline for appropriate choice and use of landscape based tools*. Rome: FAO.
- Ercin, A.E., & Hoekstra, A.Y. (2012). *Carbon and Water Footprints. Concepts, Methodologies and Policy Responses*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Fang, K., Heijungs, R., de Snoo, G.R. (2014). Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecological Indicators*, 36, 508-518.
- Fantozzi, F., & Bartocci, P. (2016). *Carbon Footprint as a Tool to Limit Greenhouse Gas Emissions*. Rijeka: InTech.
- Finkbeiner, M. (2009). Carbon footprinting – opportunities and threats. *Int J Life Cycle Assess*, 14, 91-94.
- Gradziuk, P., i Gradziuk, B. (2016). Gospodarka niskoemisyjna – nowe wyzwanie dla gmin wiejskich. *Więś i Rolnictwo*, 1(170), 105-126.
- Grubb, E., & Ellis, C. (2007). *Meeting the Carbon Challenge: The Role of Commercial Real Estate Owners*. Chicago: Users & Managers.
- Hammond, G. (2007). Time to give due weight to the ‘carbon footprint’ issue. *Nature*, 445(18), 256.
- Heinonen, J., & Junnila, S. (2011). A Carbon Consumption Comparison of Rural and Urban Lifestyles. *Sustainability*, 3, 1234-1249.
- Ibidhi, R., Hoekstra, A.Y., Gerbens-Leenes, P.W., Chouchane, H. (2017). Water, land and carbon footprints of sheep and chicken meat produced in Tunisia under different farming systems. *Ecological Indicators*, 77, 304-313.
- Instytut na rzecz Ekorozwoju (2015). *Pilotażowy program niskowęglowego rozwoju powiatu starogardzkiego*. Warszawa: Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju.
- IPCC (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Kanagawa: IPCC.
- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Kanagawa: IPCC.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: IPCC.
- Józefaciuk A., i Józefaciuk Cz. (1999). *Ochrona gruntów przed erozją*. Puławy: IUNG.
- KOBiZE (2017). *Krajowy raport inwentaryzacyjny 2017. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2015*. Warszawa: IOŚ-PIB.



- Kolasa-Więcek, A. (2013). Modelowanie emisji podtlenku azotu ze źródeł rolniczych z wykorzystaniem regresji liniowej. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 58(1), 86-89.
- Larsen, H.N., & Hertwich, E.G. (2010). Implementing Carbon-Footprint-Based Calculation Tools in Municipal Greenhouse Gas Inventories: The Case of Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 14, 965-977.
- Ministerstwo Gospodarki (2015). *Narodowy Program Rozwoju Gospodarki Niskoemisyjnej (projekt)*. Warszawa: Ministerstwo Gospodarki.
- Ministerstwo Rozwoju (2016). *Strategia na rzecz odpowiedzialnego rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)*. Warszawa: Ministerstwo Rozwoju.
- Pandey, D., & Agrawal, M. (2014). *Carbon Footprint Estimation in the Agriculture Sector*. Singapore: Springer.
- Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J.S. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178, 135-160.
- Patel, J. (2006). Green sky thinking. *Environment Business*, 122, 32.
- Pietrzyk-Sokulska, E., Smol, M., Lelek, Ł., i Cholewa, M. (2016). Plan gospodarki niskoemisyjnej jako element zrównoważonego rozwoju gmin. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 92, 225-242.
- Tuomisto, H. L., Camillis, C., Leip, A., Pelletier, N., Nisini, L., & Hastrup, P. (2014). *Carbon footprint calculator for European farms: Preliminary results of the testing phase*. In R. Schenck & D. Huizenga (Eds.), *Proceedings of the 9th international conference on life cycle assessment in the agri-food sector (LCA Food 2014)* (pp. 1352-1359). San Francisco, CA: ACLCA.
- Wang, Y., Zhang, H., Wang, T.Y. (2013). Structure Decomposition Analysis of the Carbon Footprint Differences between Beijing and Tianjin. *Advanced Materials Research*, 734-737, 1960-1963.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). *A Definition of 'Carbon Footprint'*. New York: Nova Science Publishers.
- Wiśniewski P. (2017). Ślad węglowy w planowaniu gospodarki niskoemisyjnej na obszarach wiejskich. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(1), 58-64.
- Wiśniewski, P., & Kistowski, M. (2017a). Carbon Footprint as a Tool for Local Planning of Low Carbon Economy in Poland. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 19, 335-354.
- Wiśniewski, P., i Kistowski, M. (2017b). *Niskowęglowy rozwój obszarów wiejskich w Polsce a plany gospodarki niskoemisyjnej*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- Wiśniewski, P., & Kistowski, M. (2017c). The use of agricultural soils as a source of nitrous oxide emission in selected communes of Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 13, 39-49.

- Wojtasik, M., Wiśniewski, P., Loranc, L. (2008). Problemy erozji gleb na przykładzie kilku gmin w województwach kujawsko-pomorskim i wielkopolskim. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 3(41), 41-49.
- Wysocka-Czubaszek, A., Czubaszek, R., Roj-Rojewski, S., Banaszuk, P. (2018). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture on a Regional Scale. *Journal of Ecological Engineering*, 19(3), 206-2017.
- Wu, W. (2011). *Carbon footprint – A case study on the municipality of Haninge*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
- Zdeb, M. (2015). Minimization of Methane and Selected Aromatic Hydrocarbons Emissions from Municipal Landfill in Biofilters – a Field Study. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 1053-1073.

## **Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Sources at Local Level in Poland**

### **Abstract**

Agriculture is often not included in the baseline greenhouse gas (GHG) emission inventories created for local low carbon economy plans in Poland and other European countries. Therefore, the article was estimated the size of the carbon footprint from agricultural sources and indicate the share of agriculture in the total GHG emissions in Polish communes. A simplified solution has been proposed for this purpose, which can be applied by local government units to, on their own, estimate the carbon footprint and to, further on, monitor the impact of actions taken to reduce greenhouse gas emissions. The value of the carbon footprint from agriculture in the Polish communes varies from 0.01 to 289.48 thousand Mg CO<sub>2</sub>eq/year, with a mean value of 13.85 thousand Mg CO<sub>2</sub>eq/year and a standard deviation of 14.96 thousand Mg CO<sub>2</sub>eq/year. Per capita, these values range from 2 kg CO<sub>2</sub>eq/year to 67.15 Mg CO<sub>2</sub>eq/year, with a mean of 2.17 Mg CO<sub>2</sub>eq/year and a standard deviation of 3.18 Mg CO<sub>2</sub>eq/year. Over half of total agricultural emissions in Polish communes are related to animal breeding, of which 41.2% come from enteric fermentation and 18.7% from livestock manure. Its important source is also use of agricultural lands (40.1%). In all Polish communes, the contribution of agriculture to total emissions is at an average of 8.9%. The obtained results confirm the appropriateness of including emissions from the agricultural sector and other related sources in low-carbon economy plans.

## Streszczenie

Pomijanie rolnictwa w bazowej inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych (GHG), sporządzanej na potrzeby lokalnych planów gospodarki niskoemisyjnej, było impulsem do podjęcia próby oszacowania wielkości śladu węglowego ze źródeł rolniczych oraz wskazania udziału rolnictwa w ogólnej emisji GHG w polskich gminach. Zaproponowano w tym celu uproszczone rozwiązanie, które może być z powodzeniem stosowane przez jednostki samorządu terytorialnego do samodzielnego wykonania obliczeń śladu węglowego oraz monitorowania wpływu podejmowanych działań na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Wartości śladu węglowego z rolnictwa w polskich gminach wahają się od 0,01 do 289,48 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok, przy średniej wartości bezwzględnej 13,85 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok i odchyleniu standardowym 14,96 tys. Mg CO<sub>2</sub>eq/rok. W przeliczeniu na jednego mieszkańca, wielkości te kształtują się od 2 kg CO<sub>2</sub>eq/rok do 67,15 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok, przy średniej 2,17 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok i odchyleniu standardowym 3,18 Mg CO<sub>2</sub>eq/rok. Ponad połowa łącznej emisji z rolnictwa w polskich gminach związana jest z hodowlą zwierząt gospodarskich, z czego 41,2% pochodzi z fermentacji jelitowej, a 18,7% z odchodów zwierzęcych. Jej istotnym źródłem jest również użytkowanie gleb rolnych (40,1%). We wszystkich polskich gminach udział rolnictwa w ogólnej emisji wynosi średnio 8,9%. Uzyskane rezultaty potwierdzają celowość uwzględniania w planach gospodarki niskoemisyjnej emisji pochodzących z sektora rolniczego i źródeł pokrewnych.

### Słowa kluczowe:

ślad węglowy, emisja gazów cieplarnianych, ekwiwalent dwutlenku węgla, rolnictwo, gminy, lokalne plany gospodarki niskoemisyjnej

### Keywords:

carbon footprint, greenhouse gas emissions, carbon dioxide equivalent, agriculture, communes, local low carbon economy plans