



Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
Państwowy Instytut Badawczy w Puławach, ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, Polska
* e-mail: zjarosz@iung.pulawy.pl

ZUZANNA JAROSZ *, ANTONI FABER 

Praktyki rolnictwa węglowego. Praca przeglądowa

Carbon farming practices. A review

Abstrakt. Dynamicznie postępujące zmiany klimatu oraz konieczność zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego dla rosnącej populacji ludności skłaniają do podejmowania intensywnych działań w zakresie redukcji emisji i pochłaniania CO₂. Nowych możliwości upatruje się we wdrażaniu praktyk rolnictwa węglowego. Celem opracowania było przedstawienie rekomendowanych w ramach rolnictwa węglowego aktywności, które przyczyniają się do zwiększenia urodzajności gleby i sekwestracji węgla organicznego w glebie. Źródło informacji stanowiły akty prawne, raporty i dokumenty instytucji międzynarodowych oraz literatura przedmiotu. Wskazano, iż praktyki rolnictwa węglowego zapewniają korzyści w zakresie produktywności, ochrony środowiska (bioróżnorodność), zdolności zatrzymywania i stabilności wody w glebie, ograniczania erozji gleby oraz pozytywnie wpływają na funkcjonowanie całych agroekosystemów, a tym samym zwiększają odporność rolnictwa na zmiany klimatu. Wdrażanie praktyk rolnictwa węglowego może stanowić także dodatkowe źródło dochodów rolników poprzez sprzedaż kredytów węglowych.

Słowa kluczowe: emisja gazów cieplarnianych, praktyki rolnictwa węglowego, sekwestracja węgla

WSTĘP

Wzrost emisji gazów cieplarnianych istotnie wpływa na globalne ocieplenie i dynamicznie postępujące zmiany klimatu, które są coraz bardziej odczuwalne (susze, nawalne burze, fale upałów). Przewiduje się, że już w 2050 r. wzrost średniej globalnej temperatury może wynieść 2°C w stosunku do poziomu przedindustrialnego [Core Writing Team 2023]. Aby utrzymać stabilizację wzrostu globalnej temperatury na poziomie

1,5°C, Unia Europejska przyjęła Europejski Zielony Ład [2019]. W Europejskim prawie o klimacie [Regulation 2021/1119] przyjęto, że do 2030 r. ograniczenie emisji netto gazów cieplarnianych (emisje po odliczeniu pochłaniania) wyniesie co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z 1990 r., a do 2050 r. zostanie osiągnięta neutralność klimatyczna. Realizacja tego ambitnego celu wymaga podejmowania działań przyczyniających się do zatrzymania globalnego ocieplenia i stabilizacji klimatu. Jednym z działań w zakresie ograniczania emisji i pochłaniania CO₂ jest wdrażanie rolnictwa węglowego [European Commission 2021]. W ramach rolnictwa węglowego rekomenduje się: nawadnianie i odtwarzanie torfowisk, zakładanie i utrzymywanie systemów rolno-leśnych, utrzymywanie i zwiększanie zawartości węgla organicznego w glebie, właściwe gospodarowanie inwentarzem żywym i obornikiem oraz gospodarowanie składnikami odżywczymi na gruntach rolnych i użytkach zielonych. Podejmowanie aktywności w ramach rolnictwa węglowego z jednej strony przyczynia się do ograniczenia negatywnych skutków zmian klimatu, z drugiej zaś do zwiększenia żyzności gleby, a tym samym produktywności rolnictwa.

Celem opracowania było przedstawienie praktyk rolnictwa węglowego. Wskazano możliwości w zakresie redukcji emisji i pochłaniania dwutlenku węgla w wyniku stosowania rekomendowanych działań.

PRAKTYKI ROLNICTWA WĘGLOWEGO

Ochrona i renaturyzacja mokradel

Konwencja Ramsarska definiuje mokradła jako „tereny bagien, błot i torfowisk lub zbiorniki wodne zarówno naturalne jak i sztuczne, stałe i okresowe, o wodach stojących lub płynących, słodkich, słonawych lub słonych (łącznie z wodami morskimi, których głębokość podczas odpływu nie przekracza 6 m)” [Ramsar Convention on Wetlands 2018].

Mokradła odgrywają istotną rolę w stabilizowaniu emisji gazów cieplarnianych i ograniczaniu skutków zmiany klimatu. Przybrzeżne tereny podmokłe, takie jak słone bagna, namorzyny i skupiska trawy morskiej redukują nasilenie fal i wzebrań sztormowych, chroniąc ludność, która żyje wzdłuż wybrzeży, przed powodzią i zniszczeniem mienia. W skali lokalnej i regionalnej mokradła są ważnym czynnikiem regulującym krążenie wody między atmosferą a lądem. Coraz częściej odczuwalna wyższa temperatura powietrza powoduje, że powietrze może zatrzymać więcej pary wodnej i szybciej wysychają ekosystemy lądowe, zwłaszcza grunty rolne o słabej zdolności retencji wody. Wówczas bliskość terenów podmokłych zwiększa wilgotność powietrza i ogranicza wysychanie terenów otaczających. Ponadto mokradła generują opady. Wyparowana woda wraca w postaci deszczu lub mgieł czy rosy. Naturalne rzeki wraz z nadrzecznymi mokradłami i roślinnością oczyszczają wodę. Żyjące w nich rośliny i mikroorganizmy zatrzymują m.in. związki azotu i fosforu, których zbyt duża ilość skutkuje eutrofizacją, a w konsekwencji zakwitem glonów i sinic, co stanowi potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzi. Natomiast mokradła okresowe (np. tereny zalewowe rzek) dysponują wodą tylko przez część sezonu. Takie mokradła odgrywają ważną rolę w ochronie przeciwpowodziowej.

Ochrona mokradel może ograniczyć globalne ocieplenie i powinna być nierozłącznym elementem polityki klimatycznej. Skutkiem utraty mokradel jest wyczerpywanie się zasobów wody użytkowej oraz wymieranie populacji ryb. Istotnym jest więc utrzymywanie

i przywracanie warunków bagiennych i rezygnacja z rolniczego użytkowania tych naturalnych ekosystemów. W 2011 r. nieobligatoryjne działanie obejmujące „osuszenie i powtórne nawadnianie mokradeł” zostało włączone do protokołu z Kioto, a od 2018 r. emisje związane z mokradłami i zobowiązania do ich redukcji powinny być uwzględnione w tzw. planowanych wkładach krajowych w redukcje emisji [Kotowski i in. 2019].

W ostatnich latach coraz większego znaczenia w zakresie pochłaniania CO₂, a tym samym łagodzenia zmian klimatu, nabierają bagna, czyli ten typ mokradeł, w których następuje akumulacja torfu. Gleby torfowe powstają w warunkach bagiennych poprzez rozkład biomasy roślinnej, której część nie ulega rozkładowi z powodu pełnego wysycenia gruntu wodą (warunki beztlenowe) i zostaje zachowana w postaci torfu. Torfowiska (obszary z naturalnie zakumulowanym pokładem torfu) pochłaniają dwutlenek węgla z atmosfery i akumulują go w torfie [Kotowski 2021]. Szacuje się, że średnio hektar bagien torfowych akumuluje ok. 300 kg węgla, tj. 1,1 t CO₂ [Frolking i in. 2011]. Według Nichols i Peteet [2019] pochłanianie i wielkość całkowitych zasobów węgla w torfowiskach północnych od ostatniego zlodowacenia do okresu przedindustrialnego wzrosła niemal dwukrotnie (z 545 do 1055 Gt). Jednak przedstawiony wynik o podwojeniu składowania węgla na torfowiskach północnych uznano za przeszacowany [Yu i in. 2021]. Jednym z czynników determinujących stabilność torfowisk jest bezpośredni wpływ człowieka. Jeśli torfowiska zostaną osuszone, stają się źródłem emisji gazów cieplarnianych. W obecności tlenu następuje szybki proces rozkładu torfu, a zgromadzony w szczątkach roślin węgiel w postaci CO₂ przedostaje się do atmosfery. Według Greifswald Mire Centre [2019] osuszone torfowiska w UE emitują 220 Mt ekw. CO₂ rocznie. Odwodnione torfowiska, a szczególnie te zdegradowane, stają się nieprzydatne dla rolnictwa oraz są źródłem zanieczyszczeń trafiających do rzek i jezior. Natomiast ponowne nawodnienie torfowisk osuszonych może ograniczyć emisję gazów cieplarnianych o ok. 29 t ekw. CO₂ rocznie [Günther i in. 2020]. Nawadnianie osuszonych torfowisk może pomóc w walce z niedożywieniem w miejscach, gdzie lokalne społeczności opierają swoją egzystencję na rybołówstwie czy uprawie roślin na mokradłach. Z tego względu Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) zwróciła uwagę na nawadnianie osuszonych torfowisk jako działanie wspierające walkę z ubóstwem [Joosten i in. 2012]. Ochrona i renaturyzacja torfowisk ma kluczowe znaczenie dla łagodzenia zmian klimatu. Jednak proces przywracania stanu naturalnego zdegradowanych torfowisk może być trudny. Badania przeprowadzone przez Renou-Wilson i in. [2019] dotyczące emisji gazów cieplarnianych z dwóch torfowisk wysokich w Irlandii, które zostały osuszone i wykorzystane na potrzeby domowe oraz na skalę przemysłową, a następnie ponownie nawodnione, wykazały, że na powtórnie nawodnionym torfowisku eksploatowanym przemysłowo nie udało się przywrócić typowej flory torfowiska wysokiego spotykanej w naturalnych, niezdegradowanych ekosystemach. Potrzebę ochrony i odtwarzania torfowisk podkreślają Humpenöder i in. [2020]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzają, że przy przyjętej polityce klimatycznej do 2100 r. możliwe jest całkowite ograniczenie emisji GHG, gdy ok. 60% zdegradowanych torfowisk (głównie w strefie klimatu tropikalnego i borealnego) zostanie ponownie nawodnionych, przy jednoczesnej ochronie torfowisk nienaruszonych.

Poziom degradacji torfowisk w poszczególnych krajach UE jest różny. Zdaniem Kotowskiego [2021] w Polsce zostało odwodnionych 1 255 800 ha, tj. 86% torfowisk, co spowodowało emisje na poziomie 33,9 Mt ekw. CO₂. Jednocześnie autor podkreśla, że oszacowane emisje gazów cieplarnianych są wielokrotnie wyższe niż wynika to z raportów

KOBiZE opracowanych do Konwencji Klimatycznej UNFCCC. Aby zachować pozytywny wpływ torfowisk na łagodzenie zmian klimatu zaleca się: utrzymywanie istniejących torfowisk w stanie wilgotnym, ponowne nawadnianie osuszonych torfowisk lub odpowiednie gospodarowanie na torfowiskach osuszonych, których nie można odtworzyć [Joosten i in. 2015]. Wprawdzie po ponownym nawodnieniu torfowisk ujemnego efektu cieplarnianego można się spodziewać dopiero po upływie kilku lub kilkunastu lat (zwłaszcza z powodu większej emisji metanu w krótkim okresie), to jednak emisje gazów cieplarnianych z torfowisk ponownie nawodnionych są niższe niż z gruntów odwodnionych. Szacunki wykonane przez Kotowskiego [2021] wskazują, że ponowne nawodnienie osuszonych torfowisk w Polsce może zredukować emisję gazów cieplarnianych o ponad 21,7 Mt ekw. $\text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ rocznie, z czego 19,1 Mt ekw. $\text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ to emisje z obszarów rolniczych, a 2,5 Mt ekw. $\text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ z lasów. Zamiast odwadniania torfowisk zaleca się wprowadzanie paludikultury, czyli rolnictwa i leśnictwa bagiennego [Wichtmann i in. 2016]. W jej ramach możliwa jest uprawa takich gatunków roślin jak mchy torfowe, pałka, olcha czarna i trzcina pospolita, a pozyskana biomasa może zostać zagospodarowana w biogospodarce.

Zakładanie i utrzymywanie systemów rolno-leśnych

System rolno-leśny to sposób użytkowania gruntów, w którym drzewa uprawia się w połączeniu z uprawą roli na tym samym gruncie [European Commission 2014]. Według World Agroforestry [2023] agroleśnictwo to zespół praktyk rolniczych, gdzie drzewa lub krzewy są w sposób celowy zintegrowane z uprawą rolną lub chowem zwierząt na tym samym obszarze. Komplementarność pomiędzy drzewami a uprawami lub produkcją paszową i zwierzęcą pozwala na lepsze wykorzystanie zasobów. Systemy te z jednej strony korzystnie oddziałują na środowisko (bioróżnorodność, ograniczenie wymywania biogenów, poprawa bilansu składników pokarmowych), z drugiej zaś zachowują swoje funkcje produkcyjne (produkcja żywności i drewna) [Burgess i Rosati 2018, Kay i in. 2019]. Przyczyniają się do wzrostu materii organicznej w glebie poprawiając jej strukturę, zdolności retencyjne oraz ograniczając erozję gleb [Drexler i in. 2021].

W Unii Europejskiej agroleśnictwo obejmuje ok. 8,8% użytków rolnych i skupione jest głównie w regionie Morza Śródziemnego i w Europie Południowo-Wschodniej [Burgess i Rosati 2018]. Większość tych systemów to tradycyjne, przystosowane lokalnie systemy leśno-pastwiskowe, łączące wypas zwierząt z drzewami lub krzewami. Natomiast obecnie systemy rolno-leśne obejmują [Borek i in. 2022]:

- system drzewno-orny (alejowy) – łączący uprawę gruntów z drzewami nasadzonymi w znacznych odstępach,
- system leśno-pastwiskowy – wypas zwierząt na obszarze zadrzewienia, pastwiska z żywopłotami,
- rolnictwo leśne – wykorzystanie obszaru leśnego do uprawy roślin specjalistycznych (do celów kulinarnych, leczniczych),
- ogrody przydomowe z drzewami (ogród leśny) – łączący drzewa/krzewy z produkcją warzyw na terenie ogrodów działkowych.

Szacuje się, że agroleśnictwo może zredukować na terenie UE-27 od 0,3 do 27,0 t ekw. $\text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ rocznie [Kay i in. 2019]. Oczywiście potencjał ten zależy od rodzaju wdrażanego systemu [Drexler i in. 2021].

Pomimo licznych walorów jakie niesie za sobą wdrożenie agroleśnictwa, nie jest ono powszechnie stosowane. Istnieją obawy, że uprawa gruntów z obecnością drzew może powodować konkurencję o dostęp do światła, wody oraz wykorzystanie składników pokarmowych i może skutkować zmniejszeniem uzyskiwanych plonów. Projektowanie i założenie systemów rolno-leśnych wymaga szczególnej wiedzy [Borek i in. 2022]. Jednak, biorąc pod uwagę wyzwania, jakie postawiła UE przed nadejściem 2050 r. w zakresie neutralności klimatycznej (ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, zwiększenie pochłaniania CO₂, zwiększenie bioróżnorodności), systemy rolno-leśne są coraz bardziej doceniane i promowane. W Europejskim Zielonym Ładzie [European Commission 2019] systemy rolno-leśne zaliczono do zrównoważonych praktyk, które powinny być promowane w ramach krajowych Planów Strategicznych Wspólnej Polityki Rolnej.

Utrzymywanie i zwiększanie zawartości węgla organicznego w glebie

Materia organiczna gleb jest podstawowym wskaźnikiem jakości gleb decydującym o ich właściwościach fizykochemicznych (zdolności sorpcyjne i buforowe) oraz procesach biologicznych, warunkujących wiele przemian, określanych mianem aktywności biologicznej. Wysoka zawartość próchnicy w glebach jest czynnikiem stabilizującym ich strukturę, zmniejszającym podatność na zagęszczenie oraz degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej. Zachowanie zasobów próchnicy glebowej jest istotne nie tylko ze względu na utrzymanie produkcyjnych funkcji gleb, ale również z punktu widzenia roli gleb w sekwestracji węgla z atmosfery.

Zdolność do utrzymania węgla w glebach ściśle zależy od sposobu uprawy, typu gleby, klimatu, ilości substancji organicznych w glebie, zasobów wody, gatunku uprawianych roślin i sposobu ich nawożenia. Istnieje wiele metod zwiększających sekwestrację węgla w glebie [Faber i Jarosz 2018, Pikuła 2019, Sikander i in. 2019]. Jedną z najbardziej skutecznych metod jest stosowanie zmianowania. Zmianowanie jest celowo zaplanowanym następstwem roślin różnych gatunków na tym samym polu, które uwzględniają uwarunkowania przyrodnicze uprawy kolejnych roślin po sobie. Częstotliwość powrotu każdego gatunku na danym polu informuje o liczbie uprawianych w płodozmianie roślin [Pikuła 2022]. Dobór odpowiedniego zmianowania do warunków glebowych i środowiskowych może być pomocny w sekwestracji węgla, co nie tylko poprawi żyzność gleby, ale także zmniejszy emisję CO₂ do atmosfery i zwiększy dochód rolnika. Zwarta pokrywa roślinna zwiększa aktywność biologiczną gleby, dzięki czemu przyczynia się do tworzenia związków próchnicznych i stabilizacji struktury gleby. Do szacowania wskaźnikowego wzrostu glebowej materii organicznej w Polsce wykorzystuje się współczynniki reprodukcji glebowej materii organicznej według Körschens i in. [2004]. Uwzględnienie w zmianowaniu roślin charakteryzujących się wysokimi współczynnikami reprodukcji glebowej materii organicznej zapewni wzrost próchnicy w glebie. Z tego powodu uprawa roślin bobowatych i traw oraz ich mieszanek (współczynnik reprodukcji glebowej materii organicznej od 250 do 400 kg · ha⁻¹ · r⁻¹ w zależności od plonu zielonej masy) sprzyja akumulacji węgla organicznego w glebie. Poprawne następstwo roślin wzbogaca glebę w składniki pokarmowe. Głęboko korzeniące się rośliny uprawiane w zmianowaniu penetrują profil gleby, wykorzystując efektywnie składniki pokarmowe, co umożliwia zmniejszenie poziomu nawożenia mineralnego. Literatura podaje, że 100 kg azotu związanego przez rośliny bobowate uprawiane w zmianowaniu jest ekwiwalentem 200 kg azotu zastosowanego w formie nawozu mineralnego [Prusiń-

ski i Kotecki 2006]. Rośliny bobowate optymalizują dopływ azotu przez biologiczne wiązanie i umożliwiają jego wykorzystanie przez roślinę następczą, ograniczając straty azotu na drodze wymywania. Biologiczne wiązanie azotu przez rośliny bobowate ma zastosowanie we wszystkich systemach rolniczych, a zwłaszcza tam gdzie stosuje się niewielkie ilości nawozów oraz na gruntach z niedoborem organicznych składników pokarmowych. Na gruntach najbardziej podatnych na zmiany warunków pogodowych zaleca się uwzględnienie w płodozmianie roślin wcześniej dojrzewających. Wówczas można przeprowadzić zbiory przed porą mokrą i ułatwić wprowadzenie upraw okrywowych, które zapobiegają erozji oraz pomagają w budowie i utrzymaniu humusu w glebie. Według Prażan i in. [2019] poprawa efektywności wykorzystania azotu przez rośliny we wzbogaconym płodozmianie umożliwia redukcję emisji średnio o $0,033\text{--}0,159\text{ t CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Praktyką sprzyjającą tworzeniu materii organicznej i poprawiającą strukturę gleb jest stosowanie międzyplonów [Oleś 2021, Pieszka i in. 2022, Pikuła 2022]. Międzyplony to rośliny uprawiane w siewie czystym lub w mieszankach, w zmianowaniu pomiędzy dwoma plonami głównymi. W międzyplonie uprawia się głównie rośliny o krótkim okresie wegetacji. Międzyplony uprawiane są przede wszystkim w celu przerywania częstego następstwa roślin np. zbóż oraz poprawy żyzności gleby poprzez zwiększenie zawartości próchnicy i utrzymanie gruzelkowatej struktury. Kształtowanie ilości oraz jakości trafiających do gleby resztek roślinnych, oddziałuje na bilans materii organicznej i ilość azotu w glebie. Rośliny uprawne, z uwagi na swoje właściwości (wielkość biomasy, sposób korzenienia, potrzeby pokarmowe, długość wegetacji) różnią się wpływem na urodzajność gleby. W sytuacji gdy dobór roślin uprawianych w plonie głównym nie gwarantuje utrzymania żyzności gleby zaleca się uprawę odpowiednio dobranych roślin poplonowych. Szczególnie polecane są tutaj rośliny bobowate lub mieszanki z nimi. Uprawa roślin bobowatych grubonasiennych zwiększa zasobność w substancję organiczną o około $0,35\text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i pozostawia po zbiorze około $50\text{--}60\text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ [Oleś 2021]. Wysiewanie międzyplonów pozwala zapewnić przykrycie gleby i nie narażać jej na działanie wysokiej temperatury. W wyższych temperaturach materia organiczna ulega szybszej mineralizacji w glebie, co z kolei prowadzi do zwiększonej emisji CO_2 z gleby. Dodatkową zaletą uprawy międzyplonów, jest zdolność ograniczania strat wody i ochrona przed erozją wodną i wietrzną [Pikuła 2022]. Stosowanie międzyplonów jest bardzo dobrą metodą na odzyskiwanie składników pokarmowych. Rośliny poplonowe przechwycają dostępny azot, wbudują w swoją masę, która po rozłożeniu odda zgromadzone składniki roślinom następczym. Pokrycie gleby międzyplonami ogranicza emisję podtlenku azotu i wymywanie składników pokarmowych, zwłaszcza azotu w postaci azotanów. Nieokryta gleba podczas okresu jesienno-zimowego może stracić do 60 kg azotu na 1 ha [Oleś 2021]. Uprawa międzyplonów ma szczególne znaczenie na terenach nachylonych. Intensywne opady czy spływy powierzchniowe na tych terenach powodują wypłukiwanie cząstek gleby, co prowadzi do zubożenia w składniki pokarmowe i pogorszenia właściwości gleb (mniejsza infiltracja wody i napowietrzenie gleby). Z drugiej zaś strony wymywanie biogenów powoduje zanieczyszczenie wód powierzchniowych i gruntowych. Włączanie międzyplonów do zmianowania oznacza inwestowanie w jakość gleby i dbałość o środowisko.

Produkcyjność międzyplonów zależy od warunków klimatycznych i glebowych. Istotnym jest więc określenie, które gatunki są najlepiej dostosowane do konkretnego rejonu kraju [Kwiatkowski i in. 2020]. Badania przeprowadzone na Lubelszczyźnie wykazały, że rozbieżność w plonach poszczególnych gatunków międzyplonów jest bardzo duża. Należy przy tym zauważyć, że to nadziemna część biomasy międzyplonów

w przeważającym stopniu determinuje skalę sekwestracji CO₂. Biomasa międzyplonów ścierniskowych (gorczyca biała, facelia błękitna, mieszanka wyka jara + groch polny) oraz niektórych międzyplonów ozimych (żyto ozime) była istotnie wyższa niż biomasa pozostałych gatunków międzyplonów uwzględnionych w badaniach (życica westerwoldzka, łubin wąskolistny, łubin żółty, koniczyna czerwona, wyka ozima, saradela, mieszanka życica trwała + wyka ozima, mieszanka owies + wyka jara + groch polny). Wymienione międzyplony charakteryzowały się wysoką sekwestracją CO₂ wahającą się od 5,39 do 6,64 t CO₂ · ha⁻¹ · rok⁻¹. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że uprawa międzyplonów w płodozmianie: zboże – międzyplon – zboże pozwala na osiągnięcie o ok. 30% większej sekwestracji CO₂ w skali roku w porównaniu z uprawą zbóż bez międzyplonów [Kwiatkowski i in. 2020].

Sekwestrację węgla w glebie zwiększa także przyorywanie resztek poźniwnych. Praktyka jest zalecana głównie w gospodarstwach bezinwentarzowych nieposiadających nawozów naturalnych. Wprawdzie przyorywanie słomy znacznie słabiej oddziałuje na bilans glebowej materii organicznej w porównaniu z nawozami organicznymi czy uprawą roślin bobowatych, to przyczynia się do poprawy struktury gleby i wykorzystania składników pokarmowych. Wraz z resztkami poźniwnymi wprowadza się do gleby znaczne ilości składników pokarmowych (zwłaszcza azotu) dla roślin następczych. Wniesienie do gleby dodatkowej ilości azotu z resztkami poźniwnymi zwiększa emisję podtlenku azotu, a jej wielkość zależy od systemu uprawy. Badania własne wykazały, że w systemie płuźnym przyoranie słomy powodowało wzrost średniej emisji N₂O o 104 kg CO₂ · ha⁻¹ · r⁻¹. Jednak w znacznie większym stopniu przyczyniło się do sekwestracji węgla w glebie. Wypadkową tych dwóch procesów była redukcja emisji dwutlenku węgla o 400–600 kg CO₂ · ha⁻¹ · r⁻¹ [Faber i Jarosz 2018]. Znacznie wyższe ograniczenie emisji dwutlenku węgla uzyskano w wyniku stosowania uprawy konserwującej z przyorywaniem resztek poźniwnych. Efekt redukcji oszacowano na poziomie 0,05 do 2,2 t CO₂ · ha⁻¹ · rok⁻¹ [Freluh-Larsen i in. 2016].

Tradycyjna uprawa roli przyspiesza mineralizację materii organicznej, prowadząc do jej strat. Ubytek glebowej materii organicznej wywiera negatywny wpływ na strukturę gleby, pojemność wodną i jej biologiczną aktywność. Dlatego też w coraz większym stopniu rekomenduje się stosowanie takich technik bezpłużnej uprawy roli (tzw. konserwującej), które mają wpływ na zwiększenie zasobów węgla w glebie [Smagacz 2018]. Do takich systemów należy uprawa uproszczona, która polega na ograniczeniu głębokości uprawy i zmniejszeniu intensywności zabiegów oraz pozostawianiu co najmniej 30% resztek poźniwnych na powierzchni gleby. W uprawie tej nie wykorzystuje się pługa (nie następuje odwracanie gleby). Innym rodzajem uprawy konserwującej jest uprawa pasowa (strip-till), czyli spulchnianie wąskich pasów w rzędach siewu. Między nimi pozostają pasy gleby nienaruszonej, nieuprawionej i stanowią one co najmniej 2/3 całkowitej powierzchni przeznaczonej pod uprawę wybranej rośliny. Uprawa konserwująca jest koncepcją produkcji rolniczej, której celem jest zachowanie naturalnych zasobów przyrody przy równoczesnym osiągnięciu wysokich plonów.

Przydatność rolnicza gleb przede wszystkim zależy od zawartości materii organicznej, która wpływa na właściwości biologiczne, chemiczne i fizyczne gleby. Upraszczając uprawę, można poprawić parametry struktury gleby, zwiększyć infiltrację wody i usprawnić jej przewietrzanie. Gleby zasobniejsze w próchnicę charakteryzują się większą aktywnością mikrobiologiczną. Uzyskane przez Gajdę [2015] wyniki badań wskazują na istotny wpływ systemów uprawy roli na liczebność mikroorganizmów w glebie. Najwyż-

szą ich liczbę odnotowano w uprawie konserwującej. Mikroorganizmy glebowe uczestniczące w procesie mineralizacji i humifikacji materii organicznej, wraz z substancjami humusowymi, przyczyniają się do tworzenia struktury gruzełkowej gleby [Czyż i in. 2010]. Gleba o zróżnicowanej wielkości gruzełek stwarza optymalne warunki wodno-powietrzne i wpływa korzystnie na prawidłowy rozwój korzeni, co przekłada się na wyższe plony roślin uprawnych. Przewidywania o zróżnicowanej wielkości powstałe wewnątrz gruzełków oraz pomiędzy nimi zapewniają optymalną areację, dzięki temu gleba może akumulować i zatrzymywać większe ilości wody. Uprawy konserwujące z pozostawianiem resztek poźniowych zapewniają większą ochronę powierzchni gleby przed spływem powierzchniowym i wymywaniem.

Uprawę konserwującą uważa się za potencjalnie efektywną technikę zwiększania sekwestracji węgla organicznego i ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Zdaniem Luo i in. [2010] gleby wykorzystywane rolniczo przez wprowadzanie upraw bezplużnych mogą sekwestrować od 0,4 do 0,8 Gt C · r⁻¹ i przyczynić się do ograniczenia emisji CO₂ w zakresie 0,4-0,6 Gt CO₂ · r⁻¹. Istotny wpływ na zawartość węgla organicznego w glebie i ograniczenie emisji GHG ma pozostawianie resztek poźniowych. Według badań Fabera i Jarosz [2018] w uprawie uproszczonej z mineralnym nawożeniem azotem oraz pozostawieniem 100% resztek poźniowych, ilości sekwestrowanego węgla w województwach wahały się w granicach od 0,277 do 0,761, przy medianie dla Polski wynoszącej 0,533 t C · ha⁻¹ · r⁻¹. Ograniczenie emisji z tego działania oszacowano na poziomie 1,225 t CO₂ · ha⁻¹ · r⁻¹. Również badania Holki i Bieńkowskiego [2020] wykazały, że stosowanie uprawy uproszczonej lub siewu bezpośredniego z pozostawianiem dużej ilości resztek poźniowych na polu znacząco przyczynia się do redukcji emisji GHG w produkcji pszenicy. Największy potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych (o 58%) uzyskano w przypadku stosowania uprawy uproszczonej, bez zbioru słomy i z poplonami na całej powierzchni uprawy pszenicy. Według Prażan i in. [2019] stosowanie uprawy konserwującej pozwala ograniczyć 0,0059–0,018 t CO₂ · ha⁻¹ · rok⁻¹.

Gospodarowanie inwentarzem żywym i obornikiem

Zarządzanie zwierzętami gospodarskimi i odchodami odnosi się do wszelkich działań podejmowanych w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Wielkość emisji z hodowli jest uzależniona od szeregu różnych czynników: żywienia zwierząt, systemu utrzymania, ilości zużywanej ściółki, poziomu produkcji, gospodarki odchodami i wielu innych. Najistotniejszym źródłem GHG w produkcji hodowlanej są procesy trawienne i wydalnicze zwierząt. Według raportu KOBiZE [2023] rolnictwo odpowiadało za 37,5% udziału w całkowitej emisji metanu w 2021 r. Dominującym źródłem była fermentacja jelitowa z udziałem ok. 34,2%. Natomiast największy udział w całkowitej emisji N₂O w 2021 r. z rolnictwa miały: gleby rolne – 68,0% i odchody zwierzęce – 12,5%. W raporcie stwierdzono także znaczący spadek (32%) emisji gazów cieplarnianych z sektora rolnego w stosunku do 1988 r., który spowodowany był zmniejszeniem produkcji roślinnej i zwierzęcej (spadek pogłowia bydła i owiec). Jednak przy dynamicznie wzrastającej populacji ludzkiej i zapotrzebowaniu na żywność, obniżenie produkcji nie jest dobrym sposobem na ograniczenie emisji GHG. Działaniem, które może istotnie wpłynąć na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych jest zmiana praktyk żywieniowych. Naukowcy wskazują na dodatki paszowe, które mają zdolność zmniejszania emisji metanu u przeżuwaczy, stosowanie pasz o wysokiej strawności, zwiększanie energetyczności dawki pokarmowej

przez zmniejszenie udziału pasz włóknistych na rzecz pasz treściwych czy dodatek olejów i nasion roślin oleistych [Hristov i in. 2022]. Do praktyk mitygujących zaliczamy także zmiany w sposobie hodowli i utrzymania zwierząt gospodarskich, np. częste usuwanie odchodów, zastosowanie podłóg separujących oddzielających kał od moczu oraz stosowanie biofiltrów w budynkach inwentarskich. Również zarządzanie nawozami naturalnymi może istotnie wpłynąć na ograniczenie emisji GHG i zwiększenie sekwestracji węgla. Nawozy naturalne są bogate w materię organiczną, a więc ich stosowanie zwiększa zasoby węgla organicznego w glebie. Według Bolinder i in. [2020] nawozy naturalne z gospodarstw rolnych mogą zwiększyć potencjał sekwestracji węgla w wierzchniej warstwie gleby rolniczej (0–20/30 cm) o $409 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$. Natomiast Tiefenbacher i in. [2021] stwierdzają, że średni potencjał sekwestracji węgla w wyniku zagospodarowania nawozów naturalnych wynosi $292 \text{ } 132 \text{ kg C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$.

Prowadzenie racjonalnej gospodarki nawozami naturalnymi nie jest łatwe z uwagi na ryzyko strat azotu (wmywanie, emisja amoniaku, N_2O). Najbardziej newralicznym momentem jest aplikacja nawozów naturalnych. Straty azotu w formie amoniaku mogą sięgać nawet 90% jeśli nawozy rozprowadzone na polu są pozostawione na powierzchni gleby przez długi okres czasu. Najbardziej efektywną metodą ograniczania emisji amoniaku jest skrócenie czasu przebywania nawozu naturalnego na powierzchni gleby. Najlepsze efekty ograniczenia strat można osiągnąć, wprowadzając obornik do gleby niezwłocznie, co umożliwi uzyskanie redukcji emisji na poziomie 60% (w przypadku bezorkowej uprawy) do 90% (w przypadku orki). Zaleca się przykrycie obornika glebą nie później niż w ciągu 12 h po jego rozprowadzeniu na powierzchni pola, co skutkuje redukcją emisji amoniaku rzędu 50%. W przypadku płynnych nawozów naturalnych zaleca się stosowanie innymi metodami niż rozbryzgowo (np. iniekcja bezpośrednio do gleby, zastosowanie węży wleczonych lub redlic). Szacuje się, że ograniczenie emisji amoniaku w zależności od metody aplikacji wynosi 50–90% [Jarosz i Faber 2022].

Gospodarowanie składnikami odżywczymi na gruntach rolnych i użytkach zielonych

Nawożenie jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o plonowaniu roślin i żyzności gleby. Zarządzanie składnikami nawozowymi pozwala na ograniczenie ich strat, a tym samym umożliwia ochronę środowiska (ogranicza straty azotu w postaci produktów gazowych: amoniaku NH_3 , azotu N_2 , podtlenku azotu N_2O i tlenków azotu NO_x oraz w formie azotanów wmywanych do wód). Zrównoważone, zgodne z potrzebami roślin nawożenie (zwłaszcza azotem) może zapewnić efektywność wykorzystania azotu i opłacalność produkcji oraz zminimalizować rozpraszanie biogenów do środowiska naturalnego. Dlatego istotnym jest badanie zawartości składników pokarmowych w glebie i stosowanie nawozów zgodnie z planem nawożenia uwzględniającym zasobność gleby i dostępność składników pokarmowych ze źródeł innych niż nawozy mineralne [Pieszka i in. 2022, Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 stycznia 2023]. Głównym zagrożeniem dla żyzności gleb jest zakwaszenie. Rośliny najlepiej rosną i rozwijają się na glebach o odczynie obojętnym. Natomiast kwaśny odczyn gleby ogranicza pobieranie składników pokarmowych przez rośliny. Niedobór składników pokarmowych wpływa na wielkość plonowania, a niewykorzystane składniki nawozowe mogą przedostawać się do środowiska. Ważne jest więc wapnowanie i utrzymanie odczynu gleby słabo kwaśnego lub obojętnego. Wapnowanie poprawia stosunki powietrzno-wodne

w glebie, zwiększa pojemność wodną gleby, zwiększa aktywność mikrobiologiczną środowiska glebowego oraz przyswajalność składników pokarmowych, a tym samym wpływa na zmniejszenie stosowanych dawek nawozów mineralnych (mniejsze koszty środków produkcji).

PODSUMOWANIE

Rolnictwo to sektor gospodarki, który z jednej strony przyczynia się do emisji gazów cieplarnianych mających wpływ na środowisko przyrodnicze i globalne ocieplenie, z drugiej zaś istotnie zależy od tego środowiska i najbardziej odczuwa skutki zmiany klimatu. Niezbędnym jest więc wdrażanie aktywności, które zwiększą redukcję emisji i pochłaniania CO₂.

Działania podejmowane w ramach rolnictwa węglowego zapewniają korzyści w zakresie produktywności, ochrony środowiska (bioróżnorodność), zdolności zatrzymywania i stabilności wody w glebie, ograniczania erozji gleby oraz pozytywnie wpływają na funkcjonowanie całych agroekosystemów, a tym samym zwiększają odporność rolnictwa na zmiany klimatu. Wdrażanie praktyk rolnictwa węglowego może stanowić także dodatkowe źródło dochodów rolników poprzez sprzedaż kredytów węglowych (certyfikaty).

Rekomendując powyższe praktyki, założono, że skłoni to zainteresowane osoby do zaangażowania i wdrażania aktywności, a w efekcie do poprawy stanu środowiska przyrodniczego oraz stabilizacji klimatu.

PIŚMIENNICTWO

- Bolinder M.A., Crotty F., Elsen A., Frac M., Kismányoky T., Lipiec J., Tits M., Tóth Z., Kätterer T., 2020. The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: A synthesis of reviews. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 25, 929–952. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>
- Borek R., Zajączkowski J., Wójcik M., Malusa E., Tartanus M., Furmańczyk E., Jędrejek A., Kozyra J., Kozak M., 2022. Agroleśnictwo (systemy rolno-leśne). *Poradnik dla rolników i doradców rolnych*. IUNG-PIB, Puławy, ss. 80.
- Burgess P.J., Rosati A., 2018. Advances in European agroforestry: results from the AGFORWARD project. *Agrofor. Syst.* 92, 801–810. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0261-3>
- Core Writing Team, Lee H., Romero J. (eds.), 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Czyż E., Dexter A.R., Gajda A., 2010. Wpływ uproszczonej uprawy roli na właściwości fizyczne i mikrobiologiczne wybranych gleb. *Zesz. Nauk. Połud.-Wschod. Oddz. PTIE i PTG, Rzeszów* 13, 33–35.
- Drexler S., Gensior A., Don A., 2021. Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Reg. Environ. Change* 21(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>
- European Commission, 2014. Commission Regulation (EU) No 702/2014 of 25 June 2014 declaring certain categories of aid in the agricultural and forestry sectors and in rural areas compatible with the internal market in application of Article 107 and 108 of the Treaty on the Functioning of the European Union. *O.J. EU*, L193/1, 01.07.2014.

- European Commission, 2019. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A European Green Deal. Brussels, COM(2019) 640 final.
- European Commission, 2021. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Sustainable Carbon Cycles. Brussels, COM(2021) 800 final.
- Faber A., Jarosz Z., 2018. Modelowanie bilansu węgla organicznego w glebie oraz emisji gazów cieplarnianych w skali regionalnej oraz w Polsce. *Probl. Rol. Światowego* 3, 102–112. <https://doi.org/10.22630/PRS.2018.18.3.70>
- Freluh-Larsen A., Bowyer C., Albrecht S., Keenleyside C., Kemper M., Nanni S., Naumann S., Mottershead D., Landgrebe R., Andersen E., Banfi P., Bell S., Bremere I., Cools J., Herbert S., Iles A., Kampa E., Kettunen M., Lukacova Z., Moreira G., Kiresiewa Z., Rouillard J., Okx J., Pantzar M., Paquel K., Pederson R., Peepson A., Pelsy F., Petrovic D., Psaila E., Šarapatka B., Sobocka J., Stan A. C., Tarpey J., Vidaurre R., 2016. Updated inventory and assessment of soil protection policy instruments in EU Member States. Final Report to DG Environment, Berlin: Ecologic Institute.
- Frolking S., Talbot J., Jones M.C., Treat C.C., Kauffman J.B., Tuittila E.S., Roulet N., 2011. Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environ. Rev.* 19, 371–396. <https://doi.org/10.1139/a11-014>
- Gajda A.M., 2015. Mikrobiologiczne i biochemiczne wskaźniki jakości gleb pod pszenicą ozimą w zależności od system uprawy roli. *Mon. Rozpr. Nauk. IUNG-PIB* 46, 145.
- Greifswald Mire Centre, National University of Ireland (Galway) and Wetlands International Europe Association, 2019. Peatlands in the EU – Common Agriculture Policy (CAP): After 2020. https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/Infopapiere_Briefings/202003_CAP%20Policy%20Brief%20Peatlands%20in%20the%20new%20EU%20Version%204.8.pdf [dostęp: 19.10.2023].
- Günther A., Barthelmes A., Huth V., Joosten H., Jurasieński G., Koebsch F., Couwenberg J., 2020. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nat. Commun.* 11, 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Holka M., Bieńkowski J., 2020. Ocena emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia produkcji pszenicy ozimej w różnych systemach uprawy roli. *Agron. Sci.* 73(3), 69–79. <https://doi.org/10.24326/as.2020.3.5>
- Hristov A.N., Melgar A., Wasson D., Arndt C., 2022. Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 105(10), 8543–8557. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>
- Humpenöder F., Karstens K., Lotze-Campen H., Leifeld J., Menichetti L., Barthelmes A., Popp A., 2020. Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation. *Environ. Res. Lett.* 15, 104093. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae2a>
- Jarosz Z., Faber A., 2022. Regionalne zróżnicowanie i projekcja emisji amoniaku z gospodarowania nawozami naturalnymi. *St. Rap. IUNG-PIB*, 67(21), 131–141. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2022.67.10>
- Joosten H., Brust K., Couwenberg J., Gerner A., Holsten B., Permien T., Schäfer A., Tanneberger F., Trepel M., Wahren A., 2015. MoorFutures: Integration of additional ecosystem services (including biodiversity): into carbon credits – standard, methodology and transferability to other regions. BfN-Skripten 407. Federal Agency for Nature Conservation, 119 pp.
- Joosten H., Tapio-Bistrom M.L., Tol S., 2012. Peatlands – guidance for climate changes mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use. Mitigation of Climate in Agriculture, Series 5. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Wetlands International. <http://www.fao.org/docrep/015/an762e/an762e.pdf> [dostęp: 19.10.2023].
- Kay S., Rega C., Moreno G., den Herder M., Palma J., Borek R., Crous-Duran J., Freese D., Gianitsopoulos M., Graves A., Jäger M., Lamersdorf N., Memedemin D., Mosquera-Losada R., Pantera A., Paracchini M.L., Paris P., Roces-Díaz J.V., Rolo V., Rosati A., Sandor M., Smith J., Szerencsits E., Varga A., Viaud V., Wawer R., Burgess P.J., Herzog F., 2019. Agroforestry

- Creates Carbon Sinks Whilst Enhancing the Environment in Agricultural Landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83, 581–593, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- KOBiZE, 2023. Krajowy raport inwentaryzacyjny 2023. Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2021. Raport syntetyczny. Instytut Ochrony Środowiska – PIB, Warszawa.
- Körschens M., Rogasik J., Schulz E., Böning H., Eich D., Ellerbrock R.H., Franko U., Hülsbergen K.J., Köppen D., Kolbe H., Leithold G., Merbach I., Peschke H., Prystav W., Reinhold J., Zimmer J., 2004. Humusbilanzierung: Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland: Standpunkt / VDLUFA. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Darmstadt. https://www.openagrar.de/receive/timport_mods_00002261 [dostęp: 03.06.2024].
- Kotowski W., 2021. Oszacowanie emisji gazów cieplarnianych z użytkowania gleb organicznych w Polsce oraz potencjału ich redukcji. Fundacja WWF Polska, 20.
- Kotowski W., Jabłońska E., Kozub Ł., Jaszczuk I., Panek P., 2019. Mokradła a zmiany klimatu. Materiały dla mediów – Światowy Dzień Mokradeł 2019. https://bagna.pl/images/WWD/WWD_2019_press_pack_final.pdf [dostęp: 19.10.2023].
- Kwiatkowski C.A., Harasim E., Pawłowski L., 2020. Can catch crops be an important factor in carbon dioxide sequestration? *Int. J. Conserv. Sci.* 11, 1005–1018. http://ijcs.ro/public/IJCS-20-74_Kwiatkowski.pdf [dostęp: 03.06.2024].
- Luo Z., Wang E., Sun O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agr. Ecosyst. Environ.* 139(1), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.006>
- Nichols J.E., Peteet D.M., 2019. Rapid expansion of northern peatlands and doubled estimate of carbon storage. *Nat. Geosci.* 12(11), 917–921. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0454-z>.
- Oleś I., 2021. Uprawa międzyplonów korzyścią dla rolnika i środowiska. Kujawsko-Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Minikowie, 28.
- Pieszka M., Krawczyk W., Jadczyzyn T., Jarosz Z., Dziubanek G., Domagalska J., Rusin M., 2022. Gospodarka nawozowa a ochrona wód. FDPA, Warszawa, 93.
- Pikuła D., 2019. Praktyki zapobiegające stratom węgla organicznego z gleby. *St. Rap. IUNG-PIB* 59(13), 77–91. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2019.59.06>
- Pikuła D., 2022. Znaczenie materii organicznej w ograniczaniu strat biogenów. *St. Rap. IUNG-PIB* 69(23), 129–143. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2022.69.08>
- Pražan J., Nanni S., Redman M., Vedrenne M., Martin I., Panarin M., Allen B., Gerritsen E., Milliard P., Menadue H., Brenner V., Bresson C., Lórant A., Daydé Ch., Bowyer C., Coulon A., Mottershead D., Karoglan Todorovic S., Keenleyside C., Maréchal A., Frelih-Larsen A., Toma I., Itner S., Wiltshire J., Znaor D., Martineau H., Zemeckis R., 2019. Evaluation study of the impact of the CAP on climate change and greenhouse gas emissions. Final Report. Publication Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2762/54044>
- Prusiński J., Kotecki A., 2006. Współczesne problemy produkcji roślin motylkowatych. *Fragm. Agron.* 3(91), 94–126.
- Ramsar Convention on Wetlands, 2018. Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat. https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_english_web.pdf [dostęp: 19.10.2023].
- Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). *O.J. EU*, L 243/1, 09.07.2021.
- Renou-Wilson F., Moser G., Fallon D., Farrell C.A., Müller C., Wilson D., 2019. Rewetting degraded peatlands for climate and biodiversity benefits: Results from two raised bogs. *Ecol. Eng.* 127, 547–560. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.014>
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 stycznia 2023 r. w sprawie „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu” (Dz. U. z 2023 r., poz. 244. Z 07.02.2023).

- Smagacz J., 2018. Konserwująca uprawa roli – tendencje rozwoju i znaczenie we współczesnym rolnictwie. *Mon. Rozpr. Nauk. IUNG-PIB* 59, 126.
- Sikander K.T., Lu X., Shah Shamim-Ul-Sibtain, Hussain I., Sohail M., 2019. Soil Carbon Sequestration through Agronomic Management Practices. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87107>
- Tiefenbacher A., Sandén T., Haslmayr H.P., Miloczki J., Wenzel W., Spiegel H., 2021. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. *Agronomy* 11, 882, <https://doi.org/10.3390/agronomy11050882>
- Wichtmann W., Schröder C., Joosten H. (eds.), 2016. Paludiculture-productive use of wet peatlands. Climate protection – biodiversity – regional economic benefits. Schweizerbart Science Publishers, 272.
- World Agroforestry (CIFOR-ICRAF), 2023. <https://www.worldagroforestry.org> [dostęp: 19.10.2023].
- Yu Z., Joss F., Bauska T.K., Stocker B.D., Fischer H., Loisel J., Brovkin V., Hugelius G., Nehrbass-Ahles C., Kleinen T., Schmitt J., 2021. No support for carbon storage of >1,000 GtC in northern peatlands. *Nat. Geosci.* 14, 470–472. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00769-2>

Źródło finansowania: Dotacja celowa nr 6.1 IUNG-PIB 2024 „Analiza potencjału podaży biomasy w 2024 r. na poziomie krajowym i regionalnym – ze szczególnym uwzględnieniem upraw kukurydzy i rzepaku”, finansowana przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

Abstract. Dynamically progressing climate changes and the need to ensure food security for a growing population prompt us to take intensive actions to reduce emissions and increase sequestration of CO₂. New opportunities are seen in the implementation of carbon farming practices. The aim of the study was to present activities recommended within carbon farming that contribute to soil fertility and increased sequestration of organic carbon in the soil. The source of information were legal acts, reports and documents of international institutions and literature on the subject. It was indicated that carbon farming practices provide benefits in terms of productivity, environmental protection (biodiversity), water retention and stability in the soil, limiting soil erosion, and have a positive impact on the functioning of entire agroecosystems, thus increasing the resilience of agriculture to climate change. Implementing carbon farming practices can also provide an additional source of income for farmers through the sale of carbon credits.

Keywords: greenhouse gas emissions, carbon farming practices, carbon sequestration

Otrzymano/Received: 26.02.2024
Zaakceptowano/Accepted: 25.09.2024
Online first: 19.11.2024
Opublikowano/Published: 13.01.2025