

ISSN 2544-4476
e-ISSN 2544-798X

AGRONOMY SCIENCE

wcześniej – formerly

Annales UMCS sectio E Agricultura

VOL. LXXIX (3)

2024

UNIwersytet Przyrodniczy w Lublinie

RADA NAUKOWA – SCIENTIFIC BOARD

Alessandra Carrubba (Palermo, Włochy), Honorata Danilčenko (Kaunas, Litwa),
Krzysztof Jankowski (Olsztyn, Polska), Mohsen Janmohammadi (Maragheh, Iran),
Barbara Kołodziej (Lublin, Polska), Leszek Rachoń (Lublin, Polska),
Gabriela Růžicková (Brno, Czechy), Naser Sabaghnia (Maragheh, Iran),
Ivan Salamon (Presov, Słowacja), Ivan Shuvar (Dublany, Ukraina),
Danuta Urban (Lublin, Polska), Barbara Wiśniowska-Kielian (Kraków, Polska),
Zdzisław Wyszynski (Warszawa, Polska), Alena Yakimovich (Mińsk, Białoruś)

REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF

Danuta Sugier

REDAKTOR WYDAWNICZY – PUBLISHING EDITOR

Renata Zelik

SKŁAD I ŁAMANIE – TYPESETTING TEXT

Małgorzata Lużyńska

Małgorzata Grzesiak

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie – Wydawnictwo, Lublin 2024

ISSN 2544-4476
e-ISSN 2544-798X

Czasopismo jest indeksowane przez – Covered by:

AGRO, Arianta, EBSCO, CAB Abstracts, DOAJ, EBSCO, EuroPub,
Index Copernicus – ICI Journal Master List, Most Wiedzy, PBN, Sherpa Romeo,
Ulrichsweb Global Serials Directory



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Zadania realizowane w latach 2019–2020 na podstawie umowy nr 371/WCN/2019/1 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu „Wsparcie dla czasopism naukowych”. Zadania realizowane w latach 2018–2019 w ramach umowy 638/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę: tłumaczenie na język angielski oraz specjalistyczna korekta językowa artykułów w czasopiśmie *Agronomy Science*; zapewnienie otwartego dostępu do czasopisma *Agronomy Science* poprzez utworzenie oddzielnej strony internetowej w polskiej i angielskiej wersji językowej wraz z elektronicznym systemem wydawniczo-edytorskim do obsługi czasopisma (<https://czasopisma.up.lublin.pl/index.php/as>).

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO W LUBLINIE

ul. Akademicka 15, 20-950 Lublin, tel. 81-445-66-60,
<https://czasopisma.up.lublin.pl/index.php/as>,
e-mail: agronomy.science@up.lublin.pl

Spis treści Table of contents

ZUZANNA JAROSZ, ANTONI FABER

- Rolnictwo węglowe w łagodzeniu zmian klimatu. Praca przeglądowa..... 5
Carbon farming in mitigating climate change. A review 14

ANTONI FABER, ZUZANNA JAROSZ

- Kontrowersje związane z realizacją strategii „od pola do stołu”. Praca przeglądowa..... 17
Controversy over the implementation of the “Farm to Fork” strategy. A review 30

ZUZANNA JAROSZ, ANTONI FABER

- Praktyki rolnictwa węglowego. Praca przeglądowa..... 31
Carbon farming practices. A review 43

ANNA TROJAK-GOLUCH, MARTA KOZIARA-CIUPA

- Improvement of *Nicotiana tabacum* L. for low conversion of nicotine to nornicotine
and its effect on morphological traits and chemical composition 45
Doskonalenie *Nicotiana tabacum* L. w kierunku obniżenia konwersji nikotyny
do nornikotyny i jego wpływ na cechy morfologiczne i skład chemiczny

HIDIR GÜMÜŞ, EDYTA KOWALCZUK-VASILEV

- Effect of different sowing densities on biomass production and nutritive value of barley
green fodder grown in hydroponic system 65
Wpływ różnej gęstości wysiewu nasion na produkcję biomasy i wartość pokarmową
zielonki jęczmiennej uprawianej w systemie hydroponicznym

ANNA NOWAK, PATRYCJA MAGDALENA KLIMEK

- Comparative assessment of the agricultural production potential and its efficient use
in Poland and Norway..... 73
Ocena porównawcza potencjału produkcyjnego rolnictwa oraz efektywności
jego wykorzystania w Polsce i Norwegii

ANDRZEJ WOŹNIAK

- Effect of reduced tillage practices on yield, total protein content and weed infestation of
winter barley 85
Wpływ uproszczonych metod uprawy roli na plon ziarna, zawartość białka ogólnego
i zachwaszczenie jęczmienia ozimego

CEZARY TRAWCZYŃSKI

Ocena stabilności plonowania ziemniaka w uprawie ekologicznej.....	99
Assessment of potato yield stability in an organic cultivation	112

ANETA ZAKRZEWSKA, ANNA NOWAK

Zmiany produktywności zasobów w polskim rolnictwie na tle sytuacji w pozostałych krajach Unii Europejskiej.....	113
Changes in resource productivity in Polish agriculture in comparison with the situation in other EU countries.....	128

EUGENIA CZERNYSZEWICZ

Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego w świetle globalnych uwarunkowań demograficznych, klimatycznych i społeczno-ekonomicznych	129
Ensure food security is given demographic, climatic, and socio-economic considerations	142



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 

Rolnictwo węglowe w łagodzeniu zmian klimatu. Praca przeglądowa

Carbon farming in mitigating climate change. A review

Abstrakt. Wzrost stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze przyczynia się do globalnego ocieplenia, a tym samym zmian klimatu. Osiągnięcie i utrzymanie w skali globalnej zerowych emisji netto antropogenicznych gazów cieplarnianych stało się podwaliną do kształtowania polityk, programów oraz działań zmierzających do neutralności klimatycznej, która warunkowana jest osiągnięciem zero emisyjności netto do 2050 r. Imperatywem jest podejmowanie działań, które umożliwią pochłanianie i ograniczenie emisji CO₂ oraz będą skutkować poprawą stanu środowiska i przyczyniać się do stabilizacji klimatu. Źródło informacji opracowania stanowiły akty prawne, raporty i dokumenty instytucji międzynarodowych oraz literatura przedmiotu. Przedstawiono rolę rolnictwa w polityce klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej. Istotne znaczenie w łagodzeniu zmian klimatu może odegrać rolnictwo węglowe. Wskazano definicję, praktyki oraz możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez stosowanie działań rolnictwa węglowego.

Słowa kluczowe: zmiany klimatu, emisja gazów cieplarnianych, rolnictwo węglowe

WSTĘP

Od lat międzynarodowa polityka klimatyczna skupiała się na ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmian klimatu. W 1992 r. podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych na temat Środowiska i Rozwoju w Rio de Janeiro podpisana została Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (ang. United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Umowa określała założenia międzynarodowej współpracy dotyczącej ograniczenia emisji gazów

Cytowanie: Jarosz Z., Faber A., 2024. Rolnictwo węglowe w łagodzeniu zmian klimatu. Praca przeglądowa. *Agron. Sci.* 79 (3), 5–15. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5346>

cieplarnianych (ang. greenhouse gases – GHG) odpowiedzialnych za globalne ocieplenie. Początkowo konwencja nie zawierała wiążących nakazów określających poziom ograniczenia emisji GHG, jednak z czasem sygnatariusze konwencji uznali, że redukcja emisji wymaga zaostrzenia przepisów. W 1997 r. zawarto Protokół z Kioto, który po raz pierwszy wprowadził prawnie wiążące cele redukcji emisji przez kraje rozwinięte. Głównym założeniem Protokołu była redukcja emisji gazów cieplarnianych w latach 2008–2012 o 5% w stosunku do poziomu z 1990 r. W 2015 r. światowi przywódcy uzgodnili nowe ambitne cele związane z globalnym ociepleniem przyjmując tzw. porozumienie paryskie, w ramach którego rządy państw członkowskich zgodziły się na ograniczenie wzrostu temperatury na świecie do 1,5°C [Porozumienie paryskie 2015]. Porozumienie zobowiązywało wszystkie kraje do przedstawienia do 2020 r. długoterminowych scenariuszy ograniczenia emisji GHG zgodnie z metodologią przyjętą przez Międzypaństwowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC). Pomimo wysiłków globalny poziom emisji gazów cieplarnianych nadal wzrasta. Jak podkreśla Szpak [2020], jest to spowodowane rosnącymi emisjami w państwach rozwijających się, przede wszystkim w Chinach. Udział Unii Europejskiej w globalnej emisji jest niewielki (10%), a więc nie jest ona w stanie wpływać na światowy wolumen emisji gazów cieplarnianych.

Pomimo tych trudności UE pretenduje do odgrywania przywódczej roli na świecie w zakresie przeciwdziałania zmianom klimatu. Solidną podstawą do podjęcia działań był specjalny raport IPCC [2022], w którym stwierdzono, iż należy jak najszybciej ograniczyć emisje gazów cieplarnianych i powstrzymać przyrost średniej temperatury powietrza do 1,5°C, a tym samym zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia ekstremalnych zdarzeń pogodowych (fale upałów, susze, gwałtowane burze). Globalna roczna temperatura w 2020 r. była o 1,1°C wyższa od średniej z lat 1850–1900. Większość scenariuszy zmian klimatu przewiduje, że już w 2040 r. średnia globalna temperatura powietrza przekroczy próg 1,5°C. Z dużym prawdopodobieństwem szacuje się także, że pod koniec wieku średnia globalna temperatura może osiągnąć zakres 2,2–3,5°C, w zależności od scenariusza emisji GHG [Core Writing Team i in. 2023].

Dążenie do ograniczenia emisji GHG i osiągnięcia neutralności klimatycznej wymagać będzie w UE i krajach członkowskich podejmowania działań takich jak: inwestycje w technologie przyjazne dla środowiska, wspieranie innowacji przemysłowych, wprowadzanie czystszych i tańszych form transportu prywatnego i publicznego, obniżenie emisyjności sektora energii, zapewnienie większej efektywności energetycznej budynków oraz międzynarodowej współpracy w celu poprawy norm środowiskowych [European Commission 2019].

Celem opracowania było przedstawienie znaczenia rolnictwa węglowego w łagodzeniu zmian klimatu. Tak postawione zadanie badawcze znalazło odzwierciedlenie w konstrukcji pracy. Przedstawiono rolę rolnictwa w polityce klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej. Wskazano definicję i praktyki rolnictwa węglowego. Zaprezentowano możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez wdrażanie działań rolnictwa węglowego.

ROLNICTWO W POLITYCE KLIMATYCZNO-ENERGETYCZNEJ UNII EUROPEJSKIEJ

Przyjęcie w 2019 r. Europejskiego Zielonego Ładu zapoczątkowało nową strategię, której celem jest przekształcenie UE w sprawiedliwe, dobrze prosperujące społeczeństwo z nowoczesną i konkurencyjną gospodarką, która w 2050 r. osiągnie zerowy po-

ziom emisji gazów cieplarnianych, a wzrost gospodarczy będzie niezależny od wykorzystania zasobów naturalnych [European Commission 2019]. Podkreślono rolę rolnictwa w łagodzeniu zmian klimatu. Szczególną uwagę zwrócono na ochronę przyrody oraz odbudowę ekosystemów i bioróżnorodności [European Commission 2020a]. Oczekuje się także, że produkcja wysokiej jakości żywności nie będzie szkodliwa dla środowiska naturalnego [European Commission 2020b]. W ramach inicjatywy dotyczącej upraw sprzyjających pochłanianiu ditlenku węgla przez glebę Komisja będzie promować praktyki rolnictwa węglowego i nagradzać zarządzających gruntami za redukcję emisji gazów cieplarnianych i pochłanianie ditlenku węgla [European Commission 2021a]. Dążenie do uczynienia Europy kontynentem neutralnym klimatycznie do 2050 r. wymagało zwiększenia celów klimatycznych.

Rolnictwo wraz z innymi sektorami (transport, budownictwo) nie zostało objęte wprowadzonym w 2003 r. unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji (ang. European Union Emissions Trading System – EU ETS). Sektory te podlegają rozporządzeniu w sprawie wspólnego wysiłku redukcyjnego (ang. Effort Sharing Regulation – ESR). W przyjętych w 2014 r. konkluzjach określających ramy polityki klimatyczno-energetycznej na lata 2021–2030 wyznaczono cel redukcji emisji gazów cieplarnianych przez UE do 2030 r. wynoszący co najmniej 40% w porównaniu z poziomem z 1990 r. Jednocześnie uzgodniono dwa osobne cele: dla EU ETS (–43%) oraz dla non-ETS (–30%) w stosunku do 2005 r. Zgodnie z powyższym, krajowy cel redukcji emisji dla Polski do 2030 r. w obszarze non-ETS określono na –7% w porównaniu do 2005 r. Jednak osiągnięcie neutralności klimatycznej najpóźniej do połowy bieżącego stulecia wymagało aktualizacji wyznaczonych celów. W 2021 r. Rada i Parlament Europejski osiągnęli wstępne porozumienie, ustalając wspólne ograniczenie do 2030 r. emisji netto gazów cieplarnianych (emisje po odliczeniu pochłaniania) o co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z 1990 r., a do 2050 r. osiągnięcie neutralności klimatycznej [Regulation 2021/1119]. Znowelizowano także rozporządzenie ESR [Regulation 2023/857]. Podniesiono cele redukcyjne na 2030 r. dla systemu EU ETS z –43% do –62% oraz w obszarze non-ETS z –30% do –40% w stosunku do 2005 r. Cel redukcyjny dla Polski na 2030 rok wynosi –17,7% w porównaniu z 2005 r.

Uznano także, że wszystkie sektory gospodarki, w tym energetyka, przemysł, transport, sektor ciepłowniczy i chłodniczy, a także budownictwo, rolnictwo, gospodarka odpadami i gruntami, zmiana użytkowania gruntów i leśnictwo powinny odgrywać rolę w dążeniach do osiągnięcia neutralności klimatycznej w Unii do 2050 r. [Regulation 2023/839].

W grudniu 2021 r. Komisja Europejska przyjęła komunikat „Sustainable Carbon Cycles”, w którym zaproponowano kilka kluczowych działań w zakresie pochłaniania CO₂ w rolnictwie i przemyśle [European Commission 2021b]. Jednym z działań jest stosowanie rozwiązań w zakresie usuwania ditlenku węgla pozwalających na wychwytywanie CO₂ z atmosfery i składowanie go przez długi czas w ekosystemach przy zastosowaniu działań z zakresu ochrony przyrody i uprawy sprzyjającej pochłanianiu ditlenku węgla przez glebę albo przy zastosowaniu innych form przechowywania w drodze rozwiązań przemysłowych. W komunikacie skoncentrowano się na działaniach krótkoterminowych ukierunkowanych na zwiększanie skali upraw sprzyjających pochłanianiu ditlenku węgla przez glebę jako modelu biznesowego zachęcającego do stosowania w ekosystemach naturalnych praktyk przyczyniających się do zwiększenia sekwestracji CO₂. W szczególności indywidualnych rolników, właścicieli gruntów i lasów lub zarządców

lasów należy zachęcać do składowania większej ilości ditlenku węgla na ich gruntach i w lasach, z priorytetowym traktowaniem podejść ekosystemowych i praktyk sprzyjających różnorodności biologicznej, takich jak praktyki gospodarki leśnej bliskiej naturze, odłogowanie, odbudowa zasobów węgla pierwiastkowego w lasach, powiększanie powierzchni zajmowanej przez systemy rolno-leśne, sekwestracja ditlenku węgla w glebie i odbudowa terenów podmokłych oraz inne innowacyjne rozwiązania [European Commission 2021b, Regulation 2023/839].

Zgodnie z propozycją do 2028 r. każdy zarządca gruntów powinien mieć dostęp do zweryfikowanych danych dotyczących emisji i pochłaniania, a rolnictwo węglowe powinno wspierać osiągnięcie proponowanego celu w zakresie usuwania netto do 2030 r. wynoszącego 310 Mt ekwiwalentu CO₂ w sektorze gruntów [European Commission 2021b]. Również do 2028 r. każda tona CO₂ wychwyconego, transportowanego, wykorzystywanego i składowanego przez gałęzie przemysłu będzie musiała być zgłaszana i rozliczana począwszy od jej pochodzenia; do 2030 r. co najmniej 20% węgla wykorzystywanego w produktach musi pochodzić ze zrównoważonych źródeł odnawialnych; a do 2030 r. co roku z atmosfery trzeba będzie usunąć 5 mln ton CO₂ i trwale składować za pomocą rozwiązań technologicznych. Aby skłonić sektory do realizacji działań w dziedzinie klimatu, konieczne jest także stworzenie bezpośrednich zachęt do wdrażania praktyk przyjaznych klimatowi. Aktualnie nie ma narzędzia politycznego, które w znaczący sposób zachęcałoby do zwiększania i ochrony pochłaniania. Wsparciem ma być finansowanie działań w ramach Wspólnej Polityki Rolnej. Praktyki rolnictwa węglowego zostały już uwzględnione w opracowanym i przyjętym przez Komisję Europejską nowym Planie Strategicznym dla WPR na lata 2023–2027 [Ustawa z dnia 13 lipca 2023].

Komisja zaproponowała także unijne ramy regulacyjne dotyczące certyfikacji usuwania ditlenku węgla [European Commission 2022]. Ramy certyfikacji pomogą zapewnić przejrzystą identyfikację rozwiązań w zakresie rolnictwa i przemysłu wykorzystującego węgiel. W celu otrzymania certyfikatu, pochłanianie ditlenku węgla będzie musiało zostać prawidłowo określone ilościowo, musi zapewniać dodatkowe korzyści klimatyczne, dążyć do długotrwałego magazynowania CO₂, zapobiegać wyciekom ditlenku węgla i przyczyniać się do zrównoważonego rozwoju [Faber i Jarosz 2023]. W projekcie dotyczącym ustanowienia ram certyfikacji usuwania CO₂ z 2022 r. Komisja Europejska zapowiedziała utworzenie grupy ekspertów, na forum której organy państw członkowskich i zainteresowane strony będą wymieniać swoje doświadczenia w zakresie wdrażania rolnictwa węglowego.

Jednym z zagadnień rozważanych przez ekspertów była konsolidacja wiedzy i dowodów naukowych na temat praktyk zarządzania mających na celu wychwytywanie i magazynowanie węgla w glebie. Określenie, które praktyki powinny być traktowane priorytetowo w UE w zależności od użytkowania gruntów (pola uprawne, agroleśnictwo, lasy, użytki zielone) oraz stref klimatycznych pozwoli na zidentyfikowanie narzędzi i sposobów wspierających rozpowszechnianie tych praktyk. Stwierdzono, iż niezbędne jest zidentyfikowanie mierzalnych wskaźników dotyczących zmian zawartości węgla w glebie, na podstawie których można stwierdzić, że praktyka przyczynia się do sekwestracji węgla i redukcji emisji CO₂. W przypadku sekwestracji węgla w glebie można zastosować cztery podejścia: stosowanie współczynników domyślnych na podstawie literatury (współczynnik zmiany zapasów), modelowanie zawartości węgla w glebie, wykorzystanie teledetekcji do określenia zmian zasobów węgla w glebie oraz pobieranie próbek gleby.

Przegląd i identyfikacja najlepszych praktyk ma na celu dostarczenie danych wejściowych do opracowania metodologii certyfikacji. Bez takiej wiedzy specjalistycznej Komisja napotykałaby poważne trudności w określaniu polityki usuwania CO₂ w różnych sektorach oraz w opracowaniu odpowiednich kryteriów i metodologii monitorowania, raportowania i certyfikacji usuwania ditlenku węgla.

Debata ekspertów skupiała się także na zagadnieniach certyfikacji usuwania ditlenku węgla, w tym kwantyfikacji, monitorowaniu i raportowaniu pochłaniania CO₂ oraz na takich kryteriach jak: dodatkowość, trwałość, integralność środowiskowa i przejrzystość. Preferowanym podejściem w kwantyfikacji jest metoda hybrydowa, w której wykorzystuje się zarówno pobieranie próbek z gleby, jak i modelowanie, w którym teledetekcja mogłaby być wykorzystana do działań monitorujących, a także do zasilania modelu. Aby zapewnić przejrzystość zaproponowano, że jednostki certyfikowane zostaną podzielone na cztery zdefiniowane typy: jednostka trwałego usuwania CO₂, jednostka redukcji emisji z gleby, jednostka sekwestracji w rolnictwie węglowym oraz jednostka składowania CO₂ w produktach. Jednocześnie podkreślono, że działania związane z rolnictwem węglowym muszą być trwałe i przynosić dodatkowe korzyści dla różnorodności biologicznej w ramach celów zrównoważonego rozwoju.

ROLNICTWO WĘGLOWE W ŁAGODZENIU ZMIAN KLIMATU

Dotychczasowe działania w zakresie łagodzenia zmian klimatu są niewystarczające [UNEP 2021]. Apeluje się więc o jak najszybsze wdrażanie działań redukujących dalsze emisje gazów cieplarnianych. Wymaga to jasno określonych zasad oraz monitorowania rzeczywistych postępów. Nowych możliwości upatruje się w pochłanianiu CO₂ przez glebę.

W obliczu szybko postępujących zmian klimatu wdrażanie działań w ramach rolnictwa węglowego jest imperatywem. Dynamika tych zmian, rozległy zakres zagrożeń i siła ich negatywnego oddziaływania na warunki prowadzenia produkcji rolniczej zagrażają produktywności rolnictwa, a tym samym ograniczają zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego [Karaczun i Kozyra 2020]. Z tego względu konieczne jest wdrażanie takich metod, które z jednej strony pozwolą na ograniczenie ryzyka strat plonów spowodowanych czynnikami klimatycznymi i łagodzenie konsekwencji ekstremalnych zjawisk klimatycznych, z drugiej zaś umożliwią pochłanianie i ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz będą skutkować poprawą stanu środowiska i przyczyniać się do stabilizacji klimatu.

Istotną koncepcją w polityce ograniczania zmian klimatu jest rolnictwo węglowe. Rolnictwo węglowe, zw. także rolnictwem regeneracyjnym, koncentruje się na praktykach rolniczych przyczyniających się do pochłaniania CO₂ z atmosfery i jego trwałego składowania w zrównoważony sposób w glebie lub biomase. Praktyki te poprawiają stan gleby, przynosząc jednocześnie dodatkowe korzyści: zwiększoną retencję wody, funkcje hydrologiczne, zwiększenie bioróżnorodności oraz ograniczenie emisji GHG. Rolnictwo węglowe daje także możliwość uzyskania dodatkowego źródła dochodów.

„Uprawę sprzyjającą pochłanianiu ditlenku węgla przez glebę można zdefiniować jako ekologiczny model biznesowy, w którym nagradza się zarządców gruntu za podejmowanie udoskonalonych praktyk z zakresu gospodarowania gruntami, prowadzących do zwiększenia sekwestracji ditlenku węgla w biomase, martwej materii organicznej i glebie przez zwiększenie wychwytywania CO₂ lub ograniczenie uwalniania ditlenku węgla do atmosfery, przy poszanowaniu zasad ekologicznych sprzyjających różnorodności biologicznej i działających na korzyść kapitału naturalnego w ujęciu ogólnym” [European Commission 2021b].

Chociaż komunikat Komisji Europejskiej [European Commission 2021b] skupia się na sposobach zwiększania sekwestracji ditlenku węgla, jednak zgodnie z definicją w działaniach należy też uwzględnić redukcję emisji gazów cieplarnianych. Również Międzynarodowa Grupa Konsultingowa (COWI), Instytut Ekologiczny (ang. Ecologic Institute) i Instytut Europejskiej Polityki Środowiskowej (ang. Institute for European Environmental Policy – IEEP) [2021] wskazują, że rolnictwo węglowe nie tylko koncentruje się na zwiększaniu sekwestracji ditlenku węgla, ale także na ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych (tlenku diazotu, metanu) na poziomie gospodarstwa. Oczekuje się więc, że rezultatem działań podejmowanych w ramach rolnictwa węglowego będzie sekwestracja ditlenku węgla oraz redukcja istniejących i unikanie przyszłych emisji gazów cieplarnianych.

Wiele obecnie proponowanych i wdrażanych działań może przyczynić się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, a tym samym łagodzenia zmian klimatu. Jednak nie wszystkie praktyki zapewniają bezwzględną redukcję emisji [McDonald i in. 2021]. Dlatego też sprecyzowano, jakie praktyki agronomiczne i technologiczne są wspierane i promowane w ramach rolnictwa węglowego. Działania te obejmują [European Commission 2021b]:

- ponowne nawadnianie i odtwarzanie torfowisk,
- zakładanie i utrzymywanie systemów rolno-leśnych,
- utrzymywanie i zwiększanie zawartości węgla organicznego w glebie,
- gospodarowanie inwentarzem żywym i obornikiem,
- gospodarowanie składnikami odżywczymi na gruntach rolnych i użytkach zielonych.

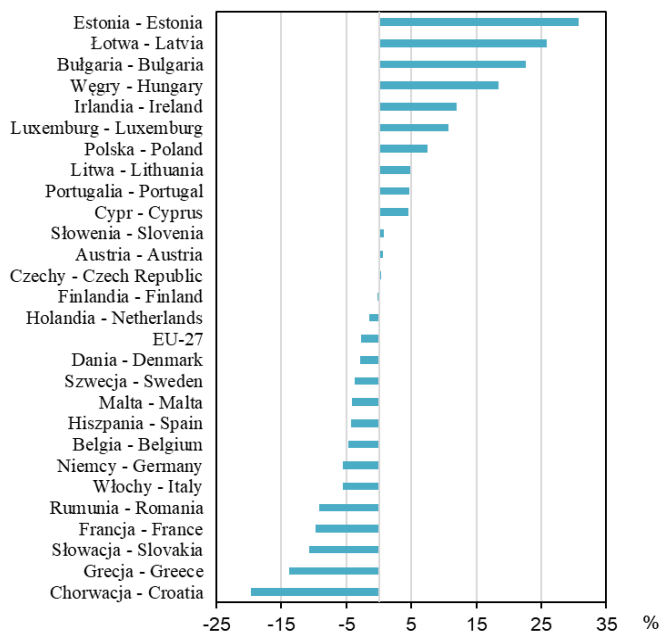
Pierwsze trzy obszary obejmują działania, których celem jest sekwestracja ditlenku węgla w różnych elementach agroekosystemów. Natomiast pozostałe dwa związane są z redukcją emisji, w szczególności poprzez wzrost wydajności i wykorzystanie technologii.

Zmiany klimatu zwiększają ryzyko prowadzenia gospodarstwa. Ważnym czynnikiem produkcji w rolnictwie jest woda. Coraz częstsze występowanie suszy rolniczej i pogłębiający się deficyt wody wpływają na dużą zmienność uzyskiwanych plonów. Powoduje to brak pewności osiągania zaplanowanych wyników produkcyjnych i zagraża bezpieczeństwu żywnościowemu. Istotne znaczenie ma odpowiednie zarządzanie glebą. Utrzymanie jakości i funkcjonalności gleby oraz łagodzenie zagrożeń związanych z jej użytkowaniem znajduje odzwierciedlenie w uzyskiwaniu wyższych plonów. Praktyką rekomendowaną w ramach rolnictwa węglowego, która przyczynia się do poprawy struktury gleby, a tym samym lepszego wykorzystania składników pokarmowych mających wpływ na wielkość plonów i ograniczanie strat składników na drodze wymywania, jest zapewnienie dopływu materii organicznej [Tisdall 2020, Pieszka i in. 2022]. Gleby charakteryzujące się wysokim poziomem węgla organicznego nie wymagają intensywnego nawożenia, zwłaszcza azotem [Pikuła 2019, Reise i in. 2022]. Zwiększenie zasobu substancji organicznej w glebach przyczynia się także do zwiększenia odporności gleb na przesuszenie. Próchnica poprawia stosunki powietrzno-wodne w glebie, zwiększa zdolności sorpcyjne gleby, zmniejsza podatność na zagęszczenie oraz degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej. Związki próchniczne mają wysoką pojemność wodną, a więc rośliny uprawiane na glebach z wysoką zawartością próchnicy są mniej narażone na stres suszy rolniczej [Altieri i in. 2015].

Rekomendowane w ramach rolnictwa węglowego działania zwiększające sekwestrację i ograniczenie emisji CO₂ przeciwdziałają ociepleniu klimatu, przyczyniają się do ochrony środowiska i bioróżnorodności oraz stabilności klimatu, a tym samym minimalizują ryzyko wystąpienia ekstremalnych zjawisk klimatycznych mających istotny wpływ na wielkość uzyskiwanych plonów.

Wdrażanie działań w ramach rolnictwa węglowego, które służą ograniczaniu emisji ditlenku węgla i zwiększaniu stopnia zatrzymania węgla w glebie, oraz poddanie się niezależnej certyfikacji w tym zakresie umożliwia także uzyskanie dodatkowych dochodów poprzez sprzedaż tzw. kredytów węglowych. Temat kredytów i certyfikatów węglowych w Polsce staje się w ostatnim czasie coraz bardziej popularny. Jeśli producent rolny potwierdzi odpowiednim certyfikatem, że ziemia, którą uprawia, ma zdolność wiązania CO₂, wówczas każdą tonę wychwyconego z atmosfery ditlenku węgla będzie mógł sprzedać w postaci papieru wartościowego nazwanego kredytem węglowym. Rolnicy mogą je sprzedawać na dobrowolnych rynkach uprawnień do emisji ditlenku węgla na rzecz firm, które w wyniku swojej działalności emitują do atmosfery CO₂.

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych poprzez wdrażanie praktyk rolnictwa węglowego w UE oszacowano na 101–444 Mt ekw. CO₂ rocznie [McDonald i in. 2021]. Natomiast sekwestrację węgla w glebie określono na poziomie 36–97 Mt ekw. CO₂ rocznie. Oszacowana redukcja emisji GHG odpowiada w przybliżeniu 3–12% całkowitych rocznych emisji gazów cieplarnianych w UE [European Environment Agency 2023]. Szeroki zakres uzyskanych szacunków wskazuje na duże zróżnicowanie możliwości ograniczania emisji GHG z sektora rolnego. Według European Environment Agency [2023] w latach 2005–2021 emisje gazów cieplarnianych z rolnictwa na poziomie UE nie uległy istotnym zmianom, jednak na poziomie krajowym tendencje te były bardzo zróżnicowane, przy czym emisje wzrosły w 13 i spadły w 14 państwach członkowskich (ryc. 1). Na przykład emisje spadły o ponad 10% w Chorwacji, Grecji i na Słowacji oraz wzrosły o ponad 10% w Bułgarii, Estonii, na Węgrzech, w Irlandii, na Łotwie i w Luksemburgu.



Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych European Environment Agency

Ryc. 1. Zmiana emisji z rolnictwa w latach 2005–2021 według krajów członkowskich UE

Fig. 1. Change in emissions from agriculture in 2005–2021 by EU member states

Także Pérez Domínguez i in. [2020] stwierdzają, że potencjał rolnictwa do łagodzenia zmian klimatycznych różni się pomiędzy państwami członkowskimi UE, a także w obrębie każdego z nich. Badania Roe i in. [2021] dotyczące potencjału ograniczania emisji dla różnych praktyk rolnictwa węglowego wykazały znaczne różnice pomiędzy Europą Południową i Wschodnią w porównaniu z Europą Zachodnią i Północną. W zakresie agroleśnictwa większym potencjałem charakteryzuje się Europa Południowa i Wschodnia. Natomiast większe możliwości łagodzenia zmian klimatu poprzez ponowne nawadnianie i odtwarzanie torfowisk koncentrują się w Europie Północnej, a w Europie Południowej są niewielkie. Autorzy wskazują też dużą zmienność pomiędzy poszczególnymi krajami.

Badania dotyczące potencjału sekwestracji i pochłaniania CO₂ przez polskie rolnictwo w perspektywie 2040 r. wykazały, że wdrożenie praktyk rolnictwa węglowego (np. nawozy naturalne, międzyplony, przyorywanie słomy) zwiększających dopływ węgla organicznego do gleby o 20% wpłynie na wzrost sekwestracji średnio dla Polski do wartości $0,117 \pm 0,016 \text{ t C} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$. Oznacza to, że potencjał sekwestracji wyniesie $2,173 \pm 0,965 \text{ mln t C} \cdot \text{r}^{-1}$, co będzie odpowiadać $7,968 \pm 3,538 \text{ mln t} \cdot \text{r}^{-1}$ pochłoniętej emisji CO₂ [Faber i in. 2023]. Potencjał pochłaniania CO₂ w Polsce jest mniejszy niż w krajach sąsiednich. Jednak pochłonięte emisje mogą być znaczne ze względu na areał użytków rolnych przekładający się na efekt skali.

PODSUMOWANIE

Dążenie do osiągnięcia neutralności klimatycznej w 2050 r., a tym samym powstrzymanie globalnego ocieplenia wywierającego istotny wpływ na zmiany klimatu, skłoniło Unię Europejską do zwiększenia ambicji w zakresie ograniczania emisji gazów cieplarnianych. W proces redukcji emisji i pochłaniania CO₂ zostaną włączone wszystkie sektory, w tym rolnictwo. Istotną rolę w łagodzeniu zmian klimatu może odegrać rolnictwo węglowe. Oprócz ograniczania emisji GHG, wdrażanie rolnictwa węglowego poprawia właściwości gleb, pozytywnie wpływa na produktywność rolnictwa i funkcjonowanie całych ekosystemów. Potencjał ograniczenia emisji gazów cieplarnianych poprzez stosowanie rolnictwa węglowego jest znaczący. Jednak jest on mocno zróżnicowany zarówno pomiędzy poszczególnymi państwami UE, jak i w ich obrębie. Dlatego niezbędne są dalsze badania w zakresie stosowania praktyk i szacowania potencjału rolnictwa węglowego.

PIŚMIENNICTWO

- Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 869–890, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- 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>

- COWI, Ecologic Institute and IEEP, 2021. Technical Guidance Handbook – setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. COWI, Kongens Lyngby.
- European Commission, 2019. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Brussels, COM(2019) 640 final.
- European Commission, 2020a. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives. Brussels, COM(2020) 380 final.
- European Commission, 2020b. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels, COM(2020) 381 final.
- European Commission, 2021a. Commission Staff Working Document. Sustainable carbon cycles for a 2050 climate-neutral EU, Technical Assessment, Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, Sustainable Carbon Cycles. Brussels, SWD(2021) 451 final.
- European Commission, 2021b. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Sustainable Carbon Cycles. Brussels, COM(2021) 800 final.
- European Commission, 2022. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for carbon removals. Brussels, COM(2022) 672 final.
- European Environment Agency, 2023. Greenhouse gas emissions from agriculture in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-agriculture> [dostęp: 31.01.2024].
- Faber A., Jarosz Z., 2023. Rolnictwo węglowe. Unijny system certyfikacji pochłaniania ditlenku węgla. *Przem. Chem.* 11, 1116–1117. <https://doi.org/10.15199/62.2023.11.2>
- Faber A., Jarosz Z., Mocny K., 2023. Potencjał sekwestracji węgla i pochłaniania ditlenku węgla przez polskie rolnictwo. *Przem. Chem.* 12, 1187–1189. <https://doi.org/10.15199/62.2023.12.13>
- IPCC, 2022. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3–24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Karaczun Z., Kozyra J., 2020. Wpływ zmian klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe Polski. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- McDonald H., Frelih-Larsen A., Lóránt A., Duin L., Pyndt Andersen S., Costa G., Bradley H., 2021. Carbon farming – Making agriculture fit for 2030. Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg.
- Pérez Domínguez I., Fellmann T., Witzke P., Weiss F., Hristov J., Himics M., Barreiro-Hurle J., Gómez Barbero M., Leip A., 2020. Economic assessment of GHG mitigation policy options for EU agriculture: A closer look at mitigation options and regional mitigation costs (EcAM-PA 3), EUR 30164 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. <https://doi.org/10.2760/4668, JRC120355>
- Pieszka M., Krawczyk W., Jadczyński 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>
- Porozumienie paryskie do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzonej w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r., przyjęte w Paryżu dnia 12 grudnia 2015 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 36).
- 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.
- Regulation (EU) 2023/839 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the reporting and compliance rules, and setting out the targets of the Member States for 2030, and Regulation (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review. O.J. EU, L 107/1, 21.04.2023.
- Regulation (EU) 2023/857 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement, and Regulation (EU) 2018/1999. O.J. EU, L 111/1, 26.04.2023.
- Reise J., Siemons A., Böttcher H., Herold A., Urrutia C., Schneider L., Iwaszuk E., McDonald H., Freluh-Larsen A., Duin L., Davis M., 2022. Nature-based solutions and global climate protection. Assessment of their global mitigation potential and recommendations for international climate policy. German Environment Agency.
- Roe S., Streck C., Beach R., Busch J., Chapman M., Daioglou V., Deppermann A., Doelman J., Emmet-Booth J., Engelmann J., Fricko O., Frischmann C., Funk J., Grassi G., Griscom B., Havlik P., Hanssen S., Humpenöder F., Landholm D., Lomax G., Lehmann J., Mesnildrey L., Nabuurs G.J., Popp A., Rivard C., Sanderman J., Sohngen B., Smith P., Stehfest E., Woolf D., Lawrenc, D., 2021. Land-based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Glo. Chang. Biol.* 27, 6025–6058. <https://doi.org/10.1111/gcb.15873>
- Szpak K., 2020. Polityka klimatyczna Unii Europejskiej w perspektywie 2050 roku. W: J. Gajewski, W. Paprocki (red.), *Polityka klimatyczna i jej realizacja w pierwszej połowie XXI wieku*. Publikacja Europejskiego Kongresu Finansowego. Sopot, 39–50.
- Tisdall J.M., 2020. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In book: *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 57–96. <https://doi.org/10.1201/9781003075561-5>
- UNEP – United Nations Environment Programme, 2021. Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered. UNEP, UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC), <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2021> [dostęp: 31.01.2024].
- Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o zmianie ustawy o Planie Strategicznym dla Wspólnej Polityki Rolnej na lata 2023–2027 (Dz. U. z 2023 r., poz. 1530).

Źródło finansowania: Dotacja celowa nr 6.1 „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. The increase in greenhouse gas concentrations in the atmosphere contributes to global warming and, therefore, climate change. Achieving and maintaining net zero emissions of anthropogenic greenhouse gases on a global scale has become the basis for shaping policies, programs and actions aimed at climate neutrality, which is conditional on achieving net zero emissions by 2050. It is imperative to take actions that will enable the absorption and reduction of CO₂ emissions

and will result in an improvement in the state of the environment and contribute to climate stabilization. The source of information for the study were legal acts, reports and documents of international institutions and literature on the subject. In the paper, the role of agriculture in the European Union's climate and energy policy is presented. It also shows how Carbon farming can make an important contribution to mitigating climate change. The definition, practices and possibilities of reducing greenhouse gas emissions through the use of carbon farming activities are indicated.

Keywords: climate change, greenhouse gas emissions, carbon farming

Otrzymano/Received: 2.12.2023

Zaakceptowano/Accepted: 16.07.2024

Online first: 15.11.2024

Opublikowano/Published: 13.01.2025



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

ANTONI FABER^{}, ZUZANNA JAROSZ^{}*

Kontrowersje związane z realizacją strategii „od pola do stołu” Praca przeglądowa

Controversy over the implementation of the “Farm to Fork” strategy. A review

Abstrakt. Rosnące problemy klimatyczne i środowiskowe obligują do poszukiwania efektywnych rozwiązań w działalności gospodarczej. W grudniu 2019 r. Komisja Europejska wydała komunikat dotyczący strategii Europejskiego Zielonego Ładu, który wyznaczył ambitne cele w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r. W pracy scharakteryzowano krótko cele i priorytety Europejskiego Zielonego Ładu (EZŁ) i strategii „od pola do stołu” oraz dokonano przeglądu badań nad skutkami ich wprowadzenia. Przedstawiono także przyczyny protestów rolników w Polsce i podjęto próbę ich wyjaśnienia. Zaprezentowane wywoły prowadzą do ogólnego wniosku, że niezbędna jest szeroko zakrojona polityka informacyjna na temat EZŁ oraz działania szkoleniowo-doradcze dla rolników i konsumentów żywności. Odpowiedni poziom wiedzy rolników mógłby wpłynąć na zmianę ich postaw i większą akceptację proponowanych rozwiązań.

Słowa kluczowe: Europejski Zielony Ład, strategia „od pola do stołu”, skutki

WSTĘP

Zmiany klimatu to jedno z największych wyzwań XXI w. Dynamika tych zmian się nasila czego wyrazem jest wzrost częstotliwości występowania fal upałów, susz, gwałtownych burz itp. Bezpośrednim czynnikiem powodującym współczesne zmiany klimatyczne jest zwiększona emisja gazów cieplarnianych do atmosfery, będąca wynikiem działalności człowieka. Nadmierne nagromadzenie dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej powoduje podniesienie średniej temperatury powietrza, co wpływa na globalne ocieplenie. Międzyrządowy Zespół do spraw Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on

Cytowanie: Faber A., Jarosz Z., 2024. Kontrowersje związane z realizacją strategii „od pola do stołu”. Praca przeglądowa. Agron. Sci. 79(3), 17–30. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5371>

Climate Change – IPCC) wykazał, że w 2022 r. globalna średnia temperatura była o 1,15°C wyższa od średniej z lat 1850–1900 [Core Writing Team i in. 2023]. Szacuje się, że przekroczenie progu ocieplenia o 1,5°C może nastąpić już około 2030 r., a o 2,0°C w 2045 r. Spowodować to może zmiany długoterminowych trendów w temperaturach, wzorcach opadów, wilgotności powietrza, sile wiatru, a także zwiększenie częstotliwości i intensywności ekstremalnych zjawisk klimatycznych. Przeciwdziałanie temu zagrożeniu i utrzymanie wzrostu temperatury na poziomie 1,5°C do 2100 r. wymaga osiągnięcia zerowej emisji netto gazów cieplarnianych przed 2067 r. oraz zmniejszenia emisji do 27,4 Gt CO₂ eq przed 2030 r. [IPCC 2018].

Podstawą prawną zobowiązań państw członkowskich w zakresie ograniczania emisji gazów cieplarnianych (ang. greenhouse gases – GHG) po 2020 r. jest Porozumienie paryskie [2015], ratyfikowane przez 195 państw. Jest to międzynarodowa umowa zobowiązująca do podejmowania działań redukujących emisje GHG, dążąc do ograniczenia średniej temperatury na świecie w obecnym stuleciu do poziomu 1,5°C w stosunku do okresu przedindustrialnego.

Zmiany klimatu to problem globalny. W ich powstrzymanie powinno być zaangażowanych większość państw. Według Crippa i in. [2022] emisje gazów cieplarnianych nadal rosną. W 2021 r. globalny przyrost emisji CO₂ w stosunku do 2020 r. wyniósł 5,3%. Największymi emitentami były: Chiny, Stany Zjednoczone, Indie, Rosja i Japonia. Również w Unii Europejskiej (UE) stwierdzono wzrost emisji o 6,5% w porównaniu z 2020 r. UE generuje tylko 10% globalnej emisji gazów cieplarnianych. Trudno więc oczekiwać, że będzie miała znaczący wpływ na światowy wolumen emisji. Pomimo to UE kreuje się na lidera w powstrzymywaniu zmian klimatu.

W 2019 r. Komisja Europejska przedstawiła Europejski Zielony Ład (EZŁ, ang. European Green Deal), strategię służącą neutralności klimatycznej zaplanowanej na 2050 r. Jest to plan działań na rzecz wzrostu służącego przekształceniu Unii w nowoczesną, ekologiczną, zasobniejszą i konkurencyjną gospodarkę poprzez:

- osiągnięcie zerowego poziomu emisji gazów cieplarnianych netto w 2050 r.,
- oddzielenie wzrostu gospodarczego od zużywania zasobów,
- niepozostawienie w tych działaniach nikogo w tyle [European Commission 2019].

Dokument ten prezentuje kierunkowe działania odnoszące się do wszystkich sektorów gospodarki, w tym rolnictwa. Rolnictwo odgrywa szczególną rolę w realizacji Europejskiego Zielonego Ładu. Z jednej strony produkcja rolnicza jest zależna od warunków przyrodniczych i klimatycznych. Z drugiej zaś w istotnym stopniu wpływa na środowisko i klimat. Postępujące zmiany klimatu i ich wpływ na zmianę warunków produkcji rolniczej zagrażają produktywności rolnictwa, a tym samym ograniczają zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego [Karaczun i Kozyra 2020]. Istotnym elementem EZŁ, dedykowanym rolnictwu i gospodarce żywnościowej, jest strategia „od pola do stołu” [European Commission 2020].

Strategia EZŁ budzi coraz większe kontrowersje, w szczególności wśród rolników. Krytyka społeczna dała asumpt do przyjrzenia się temu dokumentowi i jego oceny. Celem opracowania była identyfikacja i określenie, jakie będą skutki ekonomiczne wprowadzenia założeń EZŁ i przyjęcia celów strategii „od pola do stołu” w rolnictwie UE i czy wdrożenie wpłynie na produkcję rolną i dochody rolników. Niepewność i obawy dotyczące skutków przyjęcia strategii „od pola do stołu” mogą być powodem fali protestów rolników w niektórych krajach.

Intencją autorów nie jest ocena postaw rolników i stawianie po którejkolwiek stronie konfliktu, ale wskazanie problemów, jakie dotyczą rolników. Tak postawione pytanie badawcze znalazło odzwierciedlenie w konstrukcji pracy. Przedstawiono założenia

Europejskiego Zielonego Ładu i główne postanowienia wynikające z jego wdrożenia dla rolnictwa i sektora rolno-żywnościowego. Szczegółowo omówiono strategię „od pola do stołu”, której priorytetem jest zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego i zrównoważona produkcja żywności. W celu zidentyfikowania i oceny skutków ekonomicznych wdrożenia strategii „od pola do stołu” przeprowadzono systematyczny przegląd literatury poprzez logiczne przeszukiwanie wybranych naukowych baz danych. Analizom poddano bazy: Web of Science, Scopus oraz Google Scholar. Okres badawczy obejmował lata 2019–2024. W badaniach wykorzystano operator logiczny „AND”. Wyszukiwaniem objęto zapis: „farm to fork” AND „effects”. Łącznie zidentyfikowano 547 prac naukowych. Problematyka poruszana w opracowaniach była bardzo różnorodna. W ramach wstępnych badań nad treścią opracowań naukowych stwierdzono, że większość dotyczyła skutków wdrażania konkretnych praktyk rolniczych zalecanych w strategii „od pola do stołu” (np. zmniejszenie stosowania pestycydów, zmniejszenie strat składników pokarmowych) i odnosiła się do konkretnego państwa (Włoch, Węgier, Rumunii). Liczną grupę stanowiły zagadnienia rolnictwa ekologicznego oraz problematyka zdrowego odżywiania i marnowania żywności. Następnie ustalono kryteria włączenia. Uznano, że badania uwzględnione w przeglądzie literatury muszą: opisywać skutki ekonomiczne przyjęcia EZŁ i celów strategii „od pola do stołu” (min. 3); uwzględniać wpływ na produkcję rolną i/lub dochody rolników; obejmować terytorium UE. Natomiast publikacje niespełniające kryteriów włączenia zostaną pominięte. Określono także słowa kluczowe: „F2F”, „economic impacts” oraz „Green Deal targets”. Wykorzystując w wyszukiwaniu wyodrębnione słowa kluczowe uzupełnione swobodnym tekstem „agricultural production in the EU”, „farmers’ incomes in the EU”, uzyskano 26 artykułów. Ostatecznie zidentyfikowano sześć publikacji spełniających kryteria włączenia. Na podstawie przeglądu tych artykułów przedstawiono wyniki badań obejmujące skutki wdrożenia strategii „od pola do stołu”. Wskazano także przyczyny protestów rolników w Polsce i podjęto próbę ich wyjaśnienia.

Niewielka liczba publikacji wskazuje na ciągle niepełne i niewystarczające rozeznanie skutków ekonomicznych wprowadzenia w rolnictwie UE celów strategii „od pola do stołu”. W raporcie Wspólnotowego Centrum Badań Komisji Europejskiej apelowano o szersze podejmowanie badań nad skutkami ekonomicznymi wdrożenia strategii [Barreiro-Hurle i in. 2021]. Zdaniem autorów opracowanie stanowi istotny wkład w uzupełnienie wiedzy na temat konsekwencji gospodarczych wynikających z przyjęcia celów proponowanych w strategii „od pola do stołu”.

EUROPEJSKI ZIELONY ŁAD

Konieczność ograniczania emisji gazów cieplarnianych potęgujących globalne ocieplenie i szybko postępujące zmiany klimatu istotnie wpływające na produkcję rolniczą, skłaniają do podejmowania działań przyczyniających się do stabilizacji klimatu.

Od lat realizowane są strategie i programy zrównoważonego rozwoju, które są ciągle niewystarczające. W 2018 r. ukazał się specjalny raport Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, w którym stwierdzono, że „osiągnięcie i utrzymanie w skali globalnej zerowych emisji netto antropogenicznych gazów cieplarnianych powstrzymałoby globalne ocieplenie na przestrzeni dekad” [IPCC 2018]. Stwierdzenie to stało się podwaliną do kształtowania polityk, programów oraz działań zmierzających do neutralności klimatycznej, która warunkowana jest osiągnięciem zeroemisyjności netto do 2050 r.

Działania mające na celu osiągnięcie przez UE neutralności klimatycznej zostały zapoczątkowane opublikowaniem przez Komisję Europejską w 2018 r. projektu „Czysta planeta dla wszystkich”. Osiągnięcie neutralności klimatycznej będzie wymagało odejścia od wykorzystywania paliw kopalnych i wdrażania nowych niskoemisyjnych technologii. Oczekuje się także zmiany nawyków żywnościowych społeczeństwa.

W grudniu 2019 r. Komisja Europejska (KE) ogłosiła komunikat w sprawie EZŁ. Jego celem jest „przekształcenie UE w sprawiedliwe i prosperujące społeczeństwo żyjące w nowoczesnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarce, która w roku 2050 osiągnie zerowy poziom emisji gazów cieplarnianych netto i w ramach której wzrost gospodarczy będzie oddzielony od wykorzystania zasobów naturalnych” [European Commission 2019]. EZŁ ma na celu wdrożenie dokumentu „Przekształcamy nasz świat: agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju” przyjętego przez Organizację Narodów Zjednoczonych i celów zrównoważonego rozwoju [ONZ 2020]. Oznacza to transformację europejskiej gospodarki w kierunku wyeliminowania ubóstwa we wszystkich jego przejawach, przy równoczesnej realizacji szeregu celów gospodarczych, społecznych i środowiskowych. Chodzi o stworzenie systemu odpornego na postępujące zmiany klimatyczne i degradację środowiskową oraz wyczerpujące się zasoby naturalne. Systemu zapewniającego wzrost gospodarczy przy jednoczesnej ochronie równowagi społecznej i środowiskowej, w którym potrzeby obecnego pokolenia mają być zaspakajane bez uszczerbku dla możliwości spełnienia potrzeb przyszłych pokoleń.

W komunikacie EZŁ zaproponowano plan działania, który ma pomóc w podejmowaniu inicjatyw w celu poprawy stanu środowiska przyrodniczego i stabilizacji klimatu. Obejmuje on:

- zerowy poziom emisji zanieczyszczeń na rzecz nietoksycznego środowiska, ochronę i odbudowę ekosystemów i bioróżnorodności,
 - strategię „od pola do stołu” – sprawiedliwy, zdrowy i przyjazny środowisku system żywnościowy,
 - przejście na zrównoważoną i inteligentną mobilność,
- bardziej ambitne cele klimatyczne,
- zapewnienie czystej, przystępnej cenowo i bezpiecznej energii,
 - zmobilizowanie sektora przemysłu na rzecz czystej gospodarki o obiegu zamkniętym,
 - budowanie i remontowanie oszczędzając energię i zasoby [European Commission 2019].

EZŁ jest więc zapowiedzią bardzo głębokiej transformacji wszystkich sektorów gospodarki. Jego wdrożenie wiąże się z wieloma wyzwaniami, z którymi muszą się zmierzyć zarówno decydenci, jak i społeczeństwo. Wyzwania te dotyczą także sektora rolnego i spożywczo-żywnościowego.

Ambitne cele przedstawione w EZŁ są różnie oceniane. Obawy budzi tempo proponowanych zmian. Jednak w większości przypadków wskazuje się, że kierunek zmian jest prawidłowy i konieczny do osiągnięcia stabilizacji klimatu [van Zeben 2020, Bongart i Torres 2021, Rivas i in. 2021]. Podkreśla się ważność strategii w kontekście znaczenia stanu gleby [Montanarella i Panagos 2021, Fayet i in. 2022, Heuser 2022].

W miarę upływu czasu od ogłoszenia komunikatu EZŁ i przedstawienia ogólnych celów w formie rozwiązań prawnych pojawiły się liczne głosy sprzeciwu różnych środowisk żądających zawieszenia lub opóźnienia wybranych regulacji, a nawet wycofania się z niektórych zapisów. Najliczniejszą grupą zawodową, którą dotyczą przepisy wynikające z EZŁ, są rolnicy. Należy jednak zauważyć, że EZŁ został przedstawiony przed pandemią Covid-19 oraz wojną w Ukrainie. Te dwa wydarzenia mocno wpłynęły na postawę Europejczyków. Z jednej strony, obecna sytuacja wynikająca z agresji Rosji na

Ukrainę uświadamia, jak istotną kwestią jest uniezależnienie się od zmiennego rynku paliw kopalnych. Rezygnacja z eksploatacji zasobów nieodnawialnych i przejście na wykorzystywanie zasobów odnawialnych (oszczędność zasobów, poszanowanie środowiska naturalnego) stwarza także szansę na to, że UE stanie się społeczeństwem zasobooszczędnym. Z drugiej strony, zmiana sytuacji społeczno-gospodarczej i pogorszenie koniunktury powoduje, że rolnicy myślą bardziej o zaspakajaniu bieżących potrzeb niż inwestowaniu w niepewną przyszłość.

STRATEGIA „OD POLA DO STOŁU”

Skutki zmiany klimatu mają szeroki i niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe, oddziałując na nie na każdym etapie procesu produkcji. Bezpieczeństwo żywnościowe to stan, w którym wszyscy ludzie, przez cały czas mają fizyczny i ekonomiczny dostęp do wystarczającej i bezpiecznej żywności o wysokiej jakości, zaspakajającej ich potrzeby i preferencje życiowe do aktywnego i zdrowego trybu życia [Karaczun i Kozyra 2020]. Dlatego też coraz większe znaczenie mają działania zapewniające zdolność do zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w dłuższej perspektywie poprzez ochronę zasobów ziemi, wody i różnorodności biologicznej, a także ograniczanie strat i marnowania żywności. Na bezpieczeństwo żywnościowe wpływają działania podejmowane na każdym etapie łańcucha żywnościowego. Norma ISO 22000 definiuje łańcuch żywnościowy jako sekwencję „etapów produkcji, przetwarzania, dystrybucji, przechowywania i postępowania z żywnością oraz jej składnikami, od produkcji podstawowej do konsumpcji” [PN-EN ISO 22000]. Wszystkie ogniwa łańcucha żywnościowego (produkcja, transport, dystrybucja, marketing i konsumpcja żywności) powinny być zaangażowane w poprawę stanu środowiska [European Commission 2020].

System żywnościowy UE, podobnie jak systemy w innych częściach świata, nie jest wystarczająco dobrze zrównoważony. System żywnościowy jest złożonym, wielowymiarowym układem i obejmuje wszystkie aspekty związane z wytwarzaniem żywności, począwszy od pozyskiwania surowców pochodzących z rolnictwa, przez sposoby ich przetwarzania, pakowania, po dystrybucję żywności, jej sprzedaż detaliczną i konsumpcję [Zalewski i Skawińska 2016]. Powoduje on 30% emisji gazów cieplarnianych w UE [Crippa i in. 2021], jest głównym sprawcą utraty bioróżnorodności [Crenna i in. 2019, European Commission 2021], marnuje znaczne ilości zasobów [Eurostat 2023, O'Connor i in. 2023] i sprzyja niezdrowemu odżywianiu, otyłości i powiązanymi z nimi chorobami [WHO 2022].

Jednym z celów UE jest stworzenie zrównoważonego systemu żywnościowego. Unia Europejska definiuje zrównoważony system żywnościowy jako system, który dostarcza i promuje bezpieczną, pożywną i zdrową żywność o niskim wpływie na środowisko dla wszystkich obecnych i przyszłych obywateli UE w sposób, który chroni środowisko naturalne i jego usługi ekosystemowe, jest solidny i odporny, dynamiczny gospodarczo, sprawiedliwy oraz społecznie akceptowalny. Czyni to bez uszczerbku dla dostępności pożywnej i zdrowej żywności dla osób mieszkających poza UE ani bez szkody dla ich środowiska naturalnego [SAPEA 2020].

W maju 2020 r. KE opublikowała komunikat w sprawie strategii „od pola do stołu” (ang. Farm to Fork – F2F), która jest elementem Europejskiego Zielonego Ładu [European Commission 2020]. Jest ona zapowiedzią działań na rzecz sprawiedliwego, zdrowego i przyjaznego dla środowiska systemu żywnościowego. Uwzględniono w niej w sposób kompleksowy wyzwania związane z lepszym równoważeniem systemów żywnościowych.

nościowych, z uwzględnieniem znaczenia powiązań między zdrowiem społeczeństwa i planety. Dążyć ma ona przy tym do budowania łańcucha żywnościowego, który działa na rzecz konsumentów, producentów, klimatu i środowiska. Ma to być osiąganę poprzez realizację następujących celów:

1. Zapewnienie, by cały łańcuch żywnościowy (produkcja, transport, dystrybucja, marketing, konsumpcja żywności) miał neutralny lub pozytywny wpływ na środowisko.
2. Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego, żywienia i zdrowia publicznego poprzez umożliwienie dostępu do wystarczającej ilości pełnowartościowej i produkowanej w zrównoważony sposób żywności.
3. Zachowanie przystępności cenowej żywności przy jednoczesnym generowaniu sprawiedliwszych zysków ekonomicznych w łańcuchu dostaw, aby docelowo najbardziej zrównoważona żywność stała się także najbardziej przystępna cenowo.

W realizacji wymienionych celów za priorytety uznano: zapewnienie zrównoważonej produkcji żywności, zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego, pobudzenie zrównoważonych praktyk w zakresie przetwórstwa spożywczego, sprzedaży hurtowej i detalicznej, hotelarstwa i gastronomii, promowanie zrównoważonej konsumpcji żywności, ułatwienie przejścia na zdrowe i zrównoważone odżywianie, ograniczenie strat i marnotrawstwa żywności oraz zwalczanie fałszowania żywności w łańcuchu jej dostaw.

W treści strategii F2F wskazano główne cele praktyk rolniczych, które mogłyby zmniejszyć zanieczyszczenie zasobów środowiska, utratę bioróżnorodności i zmiany klimatu:

- zmniejszenie o 50% stosowania pestycydów chemicznych i ryzyka ich dotyczącego oraz stosowania bardziej niebezpiecznych pestycydów o 50% (ograniczenie negatywnego wpływu pestycydów na zanieczyszczenia gleby, wody i powietrza),
- zmniejszenie strat składników pokarmowych o 50% oraz zużycia nawozów co najmniej o 20% (racjonalizacja gospodarki nawozowej),
- zmniejszenie sprzedaży środków przeciwdrobnoustrojowych o 50% (wzrost odporności drobnoustrojów na środki je zwalczające),
- przeznaczenie na użytek rolnictwa ekologicznego 25% gruntów rolnych oraz zwiększenia powierzchni użytków ekologicznych do co najmniej 10% gruntów rolnych (ochrona zasobów środowiska, korzystny wpływ na klimat i bioróżnorodność).

Tworzone będą także warunki do przechodzenia obywateli UE na zdrowe odżywianie. W tym celu żywność będzie obowiązkowo odpowiednio znakowana.

Realizacja strategii będzie ogromnym wyzwaniem dla rolnictwa i sektora rolno-żywnościowego. Pierwszym ogniwem zrównoważonego łańcucha żywnościowego są rolnicy, co przesądza o ich decydującej roli we wdrażaniu strategii. Jednym z wyzwań jest podejmowanie aktywności ograniczających i optymalizujących stosowanie pestycydów i nawozów. Stosowanie środków ochrony roślin i nawożenia ma istotne znaczenie dla ochrony i poziomu uzyskiwanych plonów. Zmniejszenie intensywności nawożenia skutkuje zmniejszeniem produktywności i efektywności wykorzystania użytków rolnych. Należy się więc spodziewać spadku produkcji roślinnej, a tym samym mniejszej podaży produktów rolnych. Oczywiście istnieje wiele rekomendowanych metod ograniczających negatywny wpływ nawożenia na środowisko (plany nawozowe, zwiększenie efektywności wykorzystania składników nawozowych, rolnictwo precyzyjne). Jednak dostosowanie technologii produkcji wymaga nakładów finansowych, co znajdzie odzwierciedlenie w wyższych cenach produktów, które zgodnie z założeniami powinny być oferowane po przystępnych cenach [Jarosz 2023].

Możliwości w ograniczeniu negatywnego wpływu rolnictwa na środowisko upatruje się także w zwiększeniu udziału rolnictwa ekologicznego w całkowitej

powierzchni gruntów. Jednak w Polsce rolnictwo ekologiczne to segment niszowy. Choć wiele gospodarstw (zwłaszcza małych) ma potencjał do produkcji ekologicznych i produkuje metodami ekstensywnymi, to problemem jest uzyskanie stosownych certyfikatów (procesy dostosowawcze, koszty).

Również procesy dostosowawcze do zrównoważonej produkcji w przemyśle spożywczym będą wymagały znacznych nakładów finansowych. W połączeniu z wysokimi i ciągle rosnącymi cenami nośników energii, presją na podnoszenie wynagrodzeń wpłyną na wzrost kosztów produkcji. Oczywiście przełoży się to na wzrost cen oferowanych produktów.

Realizacja strategii F2F wymagać będzie daleko idących zmian strukturalnych i funkcjonalnych całego sektora rolnego. Otwartym jest więc pytanie, czy rolnicy są w pełni przekonani o konieczności tych zmian?

SKUTKI EUROPEJSKIEGO ZIELONEGO ŁADU ORAZ STRATEGII „OD POLA DO STOŁU”

Pierwszą analizę wyników opublikował Beckman i in. [2020]. Przedstawiono w niej szacowane skutki dla UE, USA i świata związane z: ograniczeniem zużycia pestycydów o 50%, zmniejszeniem zużycia nawozów o 20%, zmniejszeniem sprzedaży środków przeciwdrobnoustrojowych o 50% oraz zwiększeniem powierzchni użytków ekologicznych do co najmniej 10% gruntów rolnych (tab. 1).

Tabela 1. Spodziewane skutki przyjęcia w UE niektórych celów strategii „od pola do stołu”
[Beckman i in. 2020]

Table 1. Expected impacts of adopting some of the goals of the Farm to Fork strategy in the EU
[Beckman et al. 2020]

Spodziewane skutki Expected effects	UE EU	USA	Świat World
Zmiany wielkości produkcji (%) Changes in production volumes (%)	-12	0	-1
Zmiany cen (%) Price changes (%)	17	5	9
Zmiany w imporcie (%) Changes in imports (%)	2	-3	-2
Zmiany w eksporcie (%) Changes in exports (%)	-20	6	-
Dochód brutto z gospodarstwa rolnego (%) Gross income from a farm (%)	-16	6	2
Wzrost cen żywności (roczny na mieszkańca w \$) Food price increase (annual per capita in \$)	153	59	51
Zwiększenie niedożywienia (mln ludzi) Increased malnutrition (million people)	-	-	22
Zmiana PKB w mld USD Change in GDP in USD billion	-71	-2	-94

Przedstawione wyniki badań wskazują, że uwzględnione w analizie czynniki wpłynęły na podstawowe parametry ekonomiczne zwłaszcza w UE. Należy spodziewać się spadku wielkości produkcji i dochodów gospodarstw rolnych oraz wzrostu cen żywności. Szczególnie niepokojącym ich skutkiem jest także spodziewany wzrost niedożywienia na świecie.

W badaniach przeprowadzonych we Wspólnotowym Centrum Badawczym KE (ang. Joint Research Centre EC) uwzględniono następujące czynniki: ograniczenie stosowania pestycydów o 50%, zmniejszenie strat azotu o 10%, przeznaczenie 25% gruntów na rolnictwo ekologiczne, ugorowanie 10% gruntów oraz współdzielenie cech krajobrazu o wysokiej bioróżnorodności na poziomie 10% ogółu gruntów [Barreiro-Hurle i in. 2021]. Stwierdzono, że ograniczenie zużycia pestycydów o 50% spowoduje spadki plonów od 10% do 50%. Wprowadzenie rolnictwa ekologicznego może spowodować zmniejszenie plonów nawet o 45% w stosunku do upraw konwencjonalnych. Produkcja wołowiny zmniejszy się o 15%, a jej ceny mogą wzrosnąć o 24%. Zmniejszeniu ulegnie także produkcja mleczna o 10%. Alokacja 10% gruntów na cele poprawy krajobrazu spowoduje zmniejszenie areału zbóż o 4% i obniżenie ich produkcji o 15%, co spowoduje straty w dochodzie gospodarstw roślinnych do 26%. Emisje GHG uległyby zmniejszeniu o 20,1%, ale 14,8% wyciekłoby poza granice UE.

Natomiast w badaniach przeprowadzonych w Wageningen University & Research Centre uwzględniono następujące czynniki: ograniczenie zużycia pestycydów o 50% i niebezpiecznych pestycydów o 50%, zmniejszenie strat składników nawozowych o 50%, zmniejszenie zużycia nawozów co najmniej o 20%, zwiększenie powierzchni ugorowanej do 10% oraz współdzielenie cech krajobrazu o wysokiej bioróżnorodności na poziomie 10% ogółu gruntów [Bremmer i in. 2021]. Realizacja wymienionych celów może przynieść m.in. spadki produkcji ziemniaków o 10–20%. Wolumen produkcji niektórych upraw (np. jabłek) może się zmniejszyć nawet o 30%. Generalnie spadek produkcji upraw wieloletnich będzie większy niż upraw jednorocznych. Wzrosną ceny produktów takich jak wino, oliwki i chmiel. Nie ucierpi produkcja buraka cukrowego. Szacowane straty w produkcji rolnej UE mogą wynieść 56–92 mld euro rocznie. Prognozuje się, że eksport produktów rolnych z UE spadnie, a import może się podwoić. W raporcie tej samej instytucji dotyczącym produkcji zwierzęcej stwierdzono, że osiągnięcie celów EZŁ może prowadzić do zmniejszenia produkcji zwierzęcej rzędu 10–15% [Jongeneel i in. 2021]. Krótkoterminowe wpływy tych spadków na dochody netto gospodarstw trudno oszacować, ponieważ będą zależne od wielu czynników.

Również Henning i in. [2021] badali skutki wprowadzenia ograniczenia zużycia pestycydów o 50%, zmniejszenia strat składników nawozowych o 50%, zmniejszenia zużycia nawozów o 20%, przeznaczenia pod rolnictwo ekologiczne 25% ogółu gruntów oraz współdzielenie cech krajobrazu o wysokiej bioróżnorodności na poziomie 10% ogółu gruntów. Stwierdzili, że wymienione czynniki doprowadziłyby do znacznego spadku produkcji i wzrostu cen w UE. Redukcja strat azotu o 50% wywołałaby najsilniejsze skutki. Wyszacowane spadki produkcji wynosiłyby 20% dla wołowiny, 6,3% dla mleka oraz 21% i 20% odpowiednio dla zbóż i nasion oleistych w całej UE. Pogłowie zwierząt zmniejszyłoby się jeszcze bardziej, o 45% w przypadku bydła mięsnego, a o 13,3% w przypadku krów mlecznych i cielaków. Areał upraw zbóż i roślin oleistych zmniejszyłoby się odpowiednio o 2,6% i 6%. W porównaniu z redukcją strat azotu o 50%, inne cele ilościowe strategii F2F doprowadziłyby do bardziej umiarkowanych korekt produkcji, które generalnie nie przekraczałyby 10%. W porównaniu ze wzrostem cen w UE, wzrost cen w krajach poza UE byłby bardziej umiarkowany i wynosił 7,4% dla wołowiny, 10,2% dla wieprzowiny i 4% dla surowego mleka. W przypadku upraw

wzrost cen wynosiłby 1,5% dla owoców i warzyw oraz o 3,3% dla nasion oleistych i 3,8% dla zbóż. Emisje GHG w rolnictwie zmniejszyłyby się o 29% w stosunku do roku bazowego, w tym emisje podtlenku azotu o 37%, a metanu o 23%.

Noleppa i Cartsburg [2021], uwzględniając w badaniach ograniczenie zużycia pestycydów o 50%, zmniejszenie zużycia nawozów o 20%, przeznaczenie pod rolnictwo ekologiczne 25% gruntów oraz odłogowanie 10% gruntów stwierdzili, że wielkość strat w plonach uzyskiwanych w EU zależęć będzie od uprawy wahając się w granicach 20–26%.

Wszystkie opublikowane wyniki badań nad skutkami wprowadzenia strategii F2F skłonił w swoim przeglądzie literatury Wesseler [2022]. Stwierdził on, że wykonane oceny wskazują, że wdrożenie strategii doprowadzi do spadku produkcji rolnej w UE. Skutkiem tego będzie negatywny wpływ na sytuację ekonomiczną konsumentów, wzrost lub spadek dochodów producentów, co w sumie przełoży się na ogólną utratę dobrobytu netto.

Pewnym mankamentem dotąd omawianych badań jest to, że ze względów ograniczeń metodycznych nie mogły one uwzględnić wszystkich, albo przynajmniej najważniejszych, elementów proponowanych regulacji. Częściowo przynajmniej próbowali temu zaradzić Guyomard i in. [2023]. Uwzględnili oni w swoich badaniach modelowych trzy główne dźwignie EZŁ, które ukierunkowane są na łańcuch żywnościowy: ograniczenie stosowania środków chemicznych w rolnictwie, zmniejszenie strat plonów po zbiorach oraz przejście obywateli UE na zdrowsze odżywianie o mniejszych ilościach produktów pochodzenia zwierzęcego. Stwierdzili, że przy takiej konfiguracji czynników emisja GHG z rolnictwa zmniejszy się o 20%, szkody w różnorodności biologicznej zmniejszą się o 40–50%. Konsumenti zyskają ekonomicznie dzięki niższym wydatkom na żywność. Producenci inwentarza mogą stracić część dochodów ze względu na redukcję pogłowia i spadek cen żywca. Wpływ na przychody producentów ziemiopłodów i pasz będzie korzystny wtedy, gdy wzrost konsumpcji żywności przewyższy spadek konsumpcji pasz.

Zdaniem Clora i in. [2021] ekstensyfikacja rolnictwa oraz zmiana wzorców konsumpcji i przejście na zrównoważoną dietę zmniejszyłaby emisje GHG w 2050 r. o ok. 11% w stosunku do poziomu bazowego. Z innych badań wynika, że ekologiczne systemy produkcji i zdrowe odżywianie mogłyby zmniejszyć emisje GHG w 2050 r. o 40% w stosunku do 2010 r. [Poux i Aubert 2018]. Badania naukowe wskazują, że sprostanie założonym celom wymaga wdrożenia w rolnictwie istotnych zmian technologicznych i instytucjonalnych oraz zastosowania nowoczesnej biotechnologii [Barreiro-Hurle i in. 2021, Henning i in. 2021, Purnhagen i in. 2021].

Wszystkie przytoczone dotąd wyniki badań, oparte na modelach ekonomicznych mają tę słabość, że nie są w stanie wystarczająco dobrze odzwierciedlać funkcjonowania nowo proponowanego systemu żywnościowego [Aubert 2023]. Zwłaszcza zaś nie uwzględniają zmian w: popycie na żywność, metodach produkcji oraz jakości produktów. A te uwarunkowania mogą być zupełnie inne niż te, które obowiązują w obecnym systemie produkcji.

PRZYCZYNY PROTESTÓW ROLNIKÓW W POLSCE

Od grudnia 2023 r. w wielu krajach, a także w Polsce, rozlała się fala protestów. W Polsce głównymi postulatami rolników było embargo na import produktów rolnych z Ukrainy oraz rezygnacja z zapisów EZŁ.

Produkcja rolnicza jest podstawową funkcją obszarów wiejskich i stanowi istotne źródło dochodów rolników. Jednak najważniejszą funkcją rolnictwa jest zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego. Powierzchnia gospodarstwa rolnego w znacznej mierze wpływa na wielkość realizowanej produkcji, a więc także na siłę ekonomiczną gospodarstwa. Słabością polskiego rolnictwa jest rozdrobniona struktura agrarna. Ma to wielorakie skutki ekonomiczne i społeczne: stanowi o niskim dochodzie rolników i ich rodzin, uniemożliwia akumulację kapitału niezbędnego dla podjęcia inwestycji mogących podnieść efektywność gospodarstw. Rolnik wytwarzający niewielkie ilości produktów w dużym asortymencie ma trudności z utrzymaniem wysokiej jakości i zbytem produkcji. Niewielka skala produkcji ogranicza także możliwości realizowania postępu technologicznego zarówno z powodów finansowych, jak i technicznych.

Pandemia Covid-19, europejski kryzys energetyczny i wojna w Ukrainie istotnie pogorszyły sytuację społeczno-gospodarczą gospodarstw rolnych. Dysproporcje między kosztami spowodowanymi wzrostem cen środków produkcji, a cenami zbytu produktów rolnych prowadzą do trudności finansowych i obniżenia stopy życiowej rolników. Tak więc realną przyczyną protestów była pogarszająca się rentowność polskiego rolnictwa.

Podniesienie opłacalności produkcji rolnej można uzyskać dzięki rozwojowi krótkich łańcuchów dostaw. Tworzenie i rozwój organizacji producentów i grup producentów rolnych, spółdzielni czy lokalnych firm przetwórczych ma szczególne znaczenie dla gospodarstw małych. Uczestnictwo w jakiejś formie współpracy stwarza szansę na dostęp do zaawansowanej technologii i przyjaznych środowisku metod produkcji. Problemem jest jednak, że stworzone organizacje producentów rolnych są wspierane w ramach Wspólnej Polityki Rolnej (WPR) przez kilka lat, a potem często przestają funkcjonować. Należy więc stworzyć warunki i wsparcie zachęcające rolników do tworzenia grup producentów rolnych oraz rozwoju lokalnego rolnictwa. Lokalnie sprzedawana żywność ogranicza liczbę pośredników i pozwala zachować wyższy dochód ze sprzedaży.

Niezadowolone rolników pogłębił także kryzys „zbożowy” związany z wojną w Ukrainie. Rolnicy skarżą się na niekontrolowany napływ do Polski zbóż z Ukrainy, który z założenia miał trafić na rynki zewnętrzne. Polska miała być tylko korytarzem tranzytowym dla ukraińskiego eksportu, tymczasem znaczna część zbóż pozostała na rynku krajowym. Zdaniem rolników spowodowało to spadek cen wielu produktów zbożowych. Jednocześnie w 2022 r. w Polsce odnotowano wysokie zbiory zbóż i roślin oleistych. Krajowa nadprodukcja i stan zapasów zbóż wywołały wiele problemów. Z powodu niskich cen część rolników sprzedawało zboże poniżej kosztów opłacalności. Inni zgromadzili zapasy licząc na wzrost cen. Dlatego jednym z postulatów protestujących rolników jest wprowadzenie całkowitego embarga na import produktów rolnych z Ukrainy.

Szczegółowa analiza dotycząca skutków wprowadzenia embarga wykazała, że import produktów z Ukrainy nie jest przyczyną trudnej sytuacji rolnictwa w Polsce i nie ma znaczącego wpływu na zmianę cen produktów rolnych w UE [Czubak i in. 2024]. Saldo handlowe dla produktów rolniczych jest dodatnie, ale import stanowi tylko niewielką część wymiany handlowej. Ceny produktów rolno-spożywczych są bardziej zależne od koniunktury światowej. Istotnym jest stworzenie powszechnie dostępnej bazy informacji rynkowej i przekonanie rolników do korzystania z tej wiedzy. Szczególną rolę mogłyby spełnić ośrodki doradztwa rolniczego, wyższe uczelnie czy instytuty naukowo-badawcze, organizując profesjonalne kursy i szkolenia.

Rolnicy kwestionują także ambitne cele EZŁ. Niestety często błędnie uważają, że wskazane w EZŁ wymagania w wymiarze międzynarodowym dotyczą wszystkich państw członkowskich. Realizacji celów ma służyć Wspólna Polityka Rolna na lata 2023–2027 (WPR). Wszystkie kraje członkowskie zostały zobligowane do opracowania krajowych planów strategicznych. Co prawda, WPR nakreśliła konstrukcję tych planów, jednak to każde państwo indywidualnie opracowało swój plan, kierując się specyfiką krajowego rolnictwa. Polski plan strategiczny został zaakceptowany w sierpniu 2022 r. Krajowe zobowiązania w odniesieniu do celów EZŁ są znacznie niższe od wskaźników przyjętych na poziomie wspólnotowym. Przykładem może być wymóg ograniczenia o 50% stosowania pestycydów. Według szacunków Instytutu Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej – PIB interwencje Planu Strategicznego Wspólnej Polityki Rolnej na lata 2023–2027 mogą przyczynić się do ograniczenia stosowania środków ochrony roślin w Polsce (wyrażone w kilogramach substancji czynnej) o od 3% do 7,5%. Polska określiła wielkość tego wskaźnika na poziomie 5% w stosunku do 2019 r., a więc znacznie niżej niż zaproponowano w EZŁ [Ustawa z dnia 8 lutego 2023 r. 2023]. Skuteczną alternatywą dla pestycydów mogą być środki biologiczne.

Obawy rolników dotyczą też zmiany kierunku WPR i wprowadzenia ekoschematów. Rolnicy często są przekonani, że wdrażanie ekoschematów jest obligatoryjne. Tymczasem nadal za utrzymanie gruntów w dobrej kulturze rolnicy otrzymują dopłaty bezpośrednie. Jeśli natomiast wykonają dodatkowe działania (ekoschematy), otrzymają dodatkową rekompensatę. Prawdopodobnie wiedza rolników na temat EZŁ i WPR jest ograniczona. Rolnicy nie zostali odpowiednio przygotowani i poinformowani o zmianach WPR, a ich niechęć wynika z pogorszenia się sytuacji rynkowej, co błędnie przypisano strategii EZŁ. Mnogość różnego rodzaju wsparcia w ramach funduszy wymaga pomocy kompetentnych usług doradczych.

PODSUMOWANIE

Z całą stanowczością należy podkreślić, że kierunek zmian proponowany przez UE jest słuszny. Co prawda, trudno jest przekonać rolników do zmiany dotychczasowych przyzwyczajeń i stosowania nowych praktyk, ale szeroko zakrojona polityka informacyjna mogłaby wpłynąć na zmianę postaw. Większą rolę mogłyby odegrać ośrodki doradztwa rolniczego, do których zadań należy m.in. działalność informacyjna i szkoleniowa.

Biorąc pod uwagę znaczące rozdrobnienie rolnictwa w Polsce, szczególnie ważne jest wdrażanie właściwych praktyk w jak największej liczbie gospodarstw. Należy więc wzmocnić integrację poziomą i bardziej promować rolników należących do grup producentów.

Zaprezentowane wywody wskazują, że skutki ekonomiczne wprowadzenia założeń EZŁ i przyjęcia strategii „od pola do stołu” mają wpływ na postawę rolników. Do akceptacji proponowanych rozwiązań może przyczynić szersza kampania informacyjna na temat EZŁ oraz działania szkoleniowo-doradcze dla rolników, a także edukacyjno-informacyjne dla konsumentów żywności. Odpowiedni poziom wiedzy rolników ma wpływ na podejmowane przez nich działania i w konsekwencji oddziałuje na sposób korzystania z zasobów, udział we wspólnych przedsięwzięciach czy wprowadzaniu innowacyjnych rozwiązań. Bez tej wiedzy wdrażanie i realizacja EZŁ oraz strategii „od pola do stołu” nadal będzie budzić kontrowersje.

PIŚMIENNICTWO

- Aubert P.M., 2023. The Farm to Fork Strategy: reasons for failure and how to move forward. Note, IDDRI, <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Autre%20Publication/NOTE%20Veblen%20paper%20agri%20EN.pdf> [dostęp: 03.03.2024].
- Barreiro-Hurle J., Bogonos M., Himics M., Hristov J., Pérez-Domínguez I., Sahoo A., Salputra G., Weiss F., Baldoni E., Elleby C., 2021. modeling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI Model. Exploring the potential effects of selected farm to fork and biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 climate targets and the post 2020 common agricultural policy. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/98160, JRC121368>
- Beckman J., Ivanic M., Jelliffe J.L., Baquedano F.G., Scott S.G., 2020. Economic and food security impacts of agricultural input reduction under the European Union Green Deal's Farm to Fork and biodiversity strategies. EB-30, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/99741/eb-30.pdf?v=105> [dostęp: 15.03.2024].
- Bongart A., Torres F., 2021. The European Green Deal: more than an exit strategy to the pandemic crisis, a building block of a sustainable European economic model. *J. Com. Market St.* 60(1), 170–185. <https://doi.org/10.1111/jcms.13264>
- Bremmer J., Gonzalez-Martinez A., Jongeneel R., Huiting H., Stokkers R., 2021. Impact assessment study on EC 2030 Green Deal Targets for Sustainable Food Production. Wageningen, Wageningen Economic Research, Report 2021–150. <https://edepot.wur.nl/555349> [dostęp: 10.03.2024].
- Clora F., Yu W., Baudry G., Costa L., 2021. Impacts of supply-side climate change mitigation practices and trade policy regimes under dietary transition: the case of European agriculture. *Environ. Res. Lett.* 16, 124048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac39bd>
- Crenna E., Sinkko T., Sala S., 2019. Biodiversity impacts due to food consumption in Europe. *J. Clean. Prod.* 227, 378–391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.054>
- Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier J.G.J., Quadrelli R., Risquez Martin A., Taghavi-Moharamli P., Grassi G., Rossi S., Oom D., Branco A., San-Miguel J., Vignati E., 2022. CO2 emissions of all world countries – JRC/IEA/PBL 2022 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://doi.org/10.2760/730164>
- Crippa M.E., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello F.N., Leip A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat, Food* 2, 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Czubak W., Kalinowski S., Pepliński B., 2024. Ziarno niezgody: analiza protestów rolniczych. Instytut Finansów Publicznych, Warszawa, <https://www.ifp.org.pl/ziarno-niezgody-analiza-protestow-rolniczych/> [dostęp: 19.03.2024].
- 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. COM(2019) 640 final.
- European Commission, 2020. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels, COM(2020) 381 final.
- European Commission, 2021. Commission staff working document, Impact assessment, minimising the risk of deforestation and forest degradation associated with products placed on the EU market. Brussels, SWD(2021) 326 final.
- Eurostat, 2023. Food waste and food waste prevention estimates. Eurostat, statistics explained, online publications. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Food_waste_and_food_waste_prevention_-_estimates [dostęp: 03.05.2024].

- Fayet C.M.J., Reilly K.H., Van Ham Ch., Verburg P.H., 2022. The potential of European abandoned agricultural lands to contribute to the Green Deal objectives: Policy perspectives. *Environ. Sci. Pol.* 133, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.007>
- Guyomard H., Soler L.G., Détang-Dessendre C., Réquillart V., 2023. The European Green Deal improves the sustainability of food systems but has uneven economic impacts on consumers and farmers. *Com. Earth Environ.* 4, 358. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01019-6>
- Henning C., Witzke P., Panknin L., Grunenberg M., 2021. *Ökonomische und Ökologische Auswirkungen des Green Deals in der Agrarwirtschaft*. Kiel: Institut für Agrarökonomie, Abteilung Agrarpolitik, Christian-Albrechts-Universität. <https://www.bio-pop.agrarpol.uni-kiel.de/f2fstudie> [dostęp: 10.03.2024].
- Heuser I., 2022. Soil Governance in current European Union Law and in the European Green Deal. *Soil Security*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100053>
- 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>
- IPCC, 2018. Global Warming of 1,5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/> [dostęp: 21.08.2023].
- Jarosz Z., 2023. The European Green Deal – challenges for agriculture and the agri-food sector. *Pol. J. Agron.* 52, 90–96. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.516.2023.52.10>
- Jongeneel R.A., Silvis H.J., Gonzalez Martinez A.R., Jager J., 2021. The Green Deal: An assessment of impacts of the Farm to Fork and Biodiversity Strategies on the EU livestock sector. Wageningen, Wageningen Economic Research, Report 2021–130, 68 pp. <https://edepot.wur.nl/555649> [dostęp: 03.03.2024].
- Karaczun Z.M., Kozyra J., 2020. *Wpływ zmiany klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe Polski*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 119.
- Montanarella L., Panagos P., 2021. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>
- Noleppa S., Carlsburg M., 2021. *The Socio-Economic and Environmental Values of Plant Breeding in the EU and for Selected EU Member States*. Berlin: HFFA Research GmbH. <https://www.plantetp.eu/wp-content/uploads/2021/11/noleppa-and-carlsburg-2021-the-socio-economic-and-environmental-values-of-plant-breeding-in-the-eu.pdf> [dostęp: 08.03.2024].
- O'Connor J., Skeaff S., Bremer P., Lucci G., Miroso M., 2023. A critical review of on-farm food loss and waste: future research and policy recommendations. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38, e24. <https://doi.org/10.1017/S1742170523000169>
- ONZ, 2020. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> [dostęp: 15.03.2024].
- Porozumienie Paryskie do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzonej w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r., przyjęte w Paryżu dnia 12 grudnia 2015 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 36).
- Poux X., Aubert P.M., 2018. An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise. *IDDRI-AScA, Study* 09, 74.
- PN-EN ISO 22000. *Systemy zarządzania bezpieczeństwem żywności. Wymagania dla każdej organizacji należącej do łańcucha żywnościowego*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2020.
- Purnhagen K. P., Clemens S., Eriksson D., Fresco L.O., Tosun J., Qaim M., Visser R.G.F., Weber A.P.M., Wesseler J.H.H., Zilberman D., 2021. Europe's farm to fork strategy and its commitment to biotechnology and organic farming: conflicting or complementary goals?. *Trends Plant Sci.* 26(6), 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.012>
- Rivas S., Urraca R., Bertoldi P., Thiel Ch., 2021. Towards the EU Green Deal: Local key factors to achieve ambitious 2030 climate targets. *J. Cleaner Prod.* 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128878>
- SAPEA – Science Advice for Policy by European Academies, 2020. *A sustainable food system for the European Union*. Berlin: SAPEA. <https://doi.org/10.26356/sustainablefood>

- Ustawa z dnia 8 lutego 2023 r. o Planie Strategicznym dla Wspólnej Polityki Rolnej na lata 2023–2027. (Dz. U. z 2023 r., poz. 412).
- Wessler J., 2022. The EU's farm-to-fork strategy: An assessment from the perspective of agricultural economics. *Appl. Econ. Persp. Pol.* 44(4), 1826–1843. <https://doi.org/10.1002/aapp.13239>
- WHO, 2022. WHO European Regional Obesity Report, 2022. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Zalewski R.I., Skawińska E., 2016. Towards sustainable food system. *Acta Sci. Pol., Oecon.* 15(2), 187–198.
- van Zeven J., 2020. The European Green Deal: The future of a polycentric Europe?. *Eur. Law J.* 26(5–6), 300–318. <https://doi.org/10.1111/eulj.12414>

Źródło finansowania: Dotacja celowa nr 5.0 IUNG-PIB 2024 „Ewaluacja PROW 2014-2020, PS WPR I wsparcie analityczne z zakresu Wspólnej Polityki Rolnej”, finansowana przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

Abstract. Growing climate and environmental problems oblige us to look for effective solutions in business activities. In December 2019, the European Commission issued a communication on the European Green Deal strategy, which set ambitious goals to achieve climate neutrality until 2050. The paper briefly characterizes the aims and priorities of the European Green Deal and the Farm to Fork strategy and reviews research on the impact of their implementation. The causes underlying farmers' protests in Poland and an attempt to explain them were also presented. The arguments lead to the general conclusion that a broad-based information policy on EGD as well as training and advisory activities for farmers and food consumers are necessary. An appropriate level of farmers' knowledge could change their attitudes and increase acceptance of the proposed solutions.

Keywords: European Green Deal, Farm to Fork strategy, impacts

Otrzymano/Received: 09.04.2024

Zaakceptowano/Accepted: 06.09.2024

Online first: 15.11.2024

Opublikowano/Published: 13.01.2025



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 (biodóżnorodność), 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 mokradeł

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 wezbrań 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 mokradeł może ograniczyć globalne ocieplenie i powinna być nierozłącznym elementem polityki klimatycznej. Skutkiem utraty mokradeł 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 „osuszanie 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, Pikula 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 [Pikula 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, Pikula 2022]. Międzyplony to rośliny uprawiane w siewie czystym lub w mieszkach, 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 [Pikula 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 płużnym 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 [Freligh-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 osiąganiu 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 gruzelkowej 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. Przesiewy 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 poźniwnych 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 przyczyniać 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 poźniwnych. Według badań Fabera i Jarosz [2018] w uprawie uproszczonej z mineralnym nawożeniem azotem oraz pozostawieniem 100% resztek poźniwnych, 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 poźniwnych 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 wydalinne 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 (wymywanie, emisja amoniaku, N_2O). Najbardziej newralgicznym 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 umożliwia 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 wymywanych 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>
- Frelüh-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., Jurasinski G., Koebisch 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>
- Humpeöder 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-Biström 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., Rocas-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., Ittner 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



Department of Plant Breeding and Biotechnology, Institute of Soil Science and Plant Cultivation –
State Research Institute, Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, Poland

* e-mail: anngol@iung.pulawy.pl

ANNA TROJAK-GOLUCH^{}, MARTA KOZIARA-CIUPA^{}

Improvement of *Nicotiana tabacum* L. for low conversion of nicotine to nornicotine and its effect on morphological traits and chemical composition

Doskonalenie *Nicotiana tabacum* L. w kierunku obniżenia konwersji nikotyny
do nornikotyny i jego wpływ na cechy morfologiczne i skład chemiczny

Abstract. Nornicotine is a secondary metabolite formed in tobacco leaves by the oxidative N-demethylation (conversion) of nicotine. Its high level is undesirable because this alkaloid is a precursor of N-nitrosornicotine, which has been shown to have carcinogenic properties. The aim of the study was to assess the nicotine and nornicotine content in four successive generations of ten tobacco cultivars/breeding lines. The possibility of reducing potentially harmful compounds in the cultivars/breeding lines was also determined. The study was conducted as field experiments between the years 2014 and 2018. The alkaloid content in the leaves was determined by the gas chromatography/ mass spectrometry (GC/MS) method. The systematic assessment of the alkaloid profile of tobacco and eliminating converter plants in four successive generations, particularly within breeding lines characterized by a wide conversion range, made it possible to reduce the nornicotine content and, thus, the potentially carcinogenic compounds in the leaves. Three lines, ZD2, TNX1, and WGLB with a stable conversion rate of $\leq 3\%$ and low content of nornicotine were obtained. Furthermore, the morphological traits of the isogenic lines ZD2, TNX1 and WGLB, which exhibit markedly different conversion capacity were evaluated. The greenhouse experiment showed that there were significant differences in some morphological traits. The non-converting lines TNX1 and ZD2 produced longer and wider 9th and 15th leaves than the converting analogues. A relationship has been identified between the traits that determine the phenotype of tobacco cultivars/lines and their ability to convert nicotine to nornicotine.

Keywords: tobacco, alkaloid, non-converter genotypes, isogenic lines, morphological traits

Citation: Trojak-Goluch A., Koziara-Ciupa M., 2024. Improvement of *Nicotiana tabacum* L. for low conversion of nicotine to nornicotine and its effect on morphological traits and chemical composition. *Agron. Sci.* 79(3), 45–64. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5380>

INTRODUCTION

The cultivation of tobacco, *Nicotiana tabacum* L., is an important component of crop production in several regions of the world, providing farmers with a satisfactory income even under difficult habitat conditions. However, tobacco consumption remains a major public health challenge [Burns et al. 2008]. The World Health Organization [2015] has been working diligently for years to reduce tobacco consumption. In 2015, the organization published, recommendations to decrease the nicotine concentration in tobacco filler to 0.04%. Therefore, ensuring the high quality of raw tobacco and, above all, its compliance with increasingly stringent addictive content requirements has become a priority task for tobacco growers and breeders.

The quality of raw tobacco is determined by the content of major alkaloids [Shen and Shao 2006]. These compounds have physiological effects on humans and animals and affect the taste of tobacco products [Mishra et al. 2015]. The alkaloid content of tobacco leaves can vary widely due to genetic variation in cultivars, nitrogen fertilization, mechanical damage, air temperature, and sunlight [Tso 1990]. The content of secondary metabolites is also dependent on various factors such as plant density, topping practices, sucker control, the method of leaf curing, and the technological treatment of the raw materials [Zou et al. 2021]. Air-cured Burley tobacco generally contains higher levels of alkaloids than flue-cured Virginia tobacco. The predominant alkaloid in low-converter tobacco, accounting for 90 to 95% of the total alkaloid pool, is nicotine [Wang and Bennetzen 2015]. It is a heterocyclic compound formed by the combination of a six-membered pyridine ring and a five-membered pyrrole ring. It is produced primarily in the roots and is transported to the leaves and flowers as the plants grow. Its presence in raw material and tobacco products within recognized limits is beneficial and expected, as it promotes the release of dopamine in the brain. Nicotine *per se* is not recognized as a carcinogen. Nevertheless, it should be noted that it is primarily responsible for cigarette addiction, which, in turn, promotes cardiovascular disease [Benowitz 2010]. The second most abundant alkaloid in tobacco that strongly affects human health is nornicotine. It is formed by nicotine conversion i.e. oxidative N-demethylation of nicotine into nornicotine mainly during the ripening and curing of tobacco leaves [Siminszky et al. 2005, Chakrabarti et al. 2008]. The content of nornicotine typically ranges from 2% to 5% of the total alkaloids in low-converter tobacco. However, some seed lots in which the conversion of nicotine to nornicotine occurs to a high degree, and the proportion of nornicotine accounts for more than half of the total alkaloid content. They mainly occur in Burley tobacco cultivars, whose leaves are air-cured. The high content of nornicotine is undesirable as it is a precursor of N'-nitrosornicotine (NNN), one of the major tobacco-specific nitrosamines (TSNAs) [Cai et al. 2012]. NNN is formed during tobacco curing, storage and smoking. Nitrosamines have been found to have carcinogenic properties and alter the lipid profile of the blood [Fant et al. 1999, Andra and Marris 2011].

The conversion of nicotine to nornicotine is catalyzed by nicotine N-demethylases, enzymes encoded by a group of cytochrome P450 genes belonging to the *CYP82E* subfamily [Shoji et al. 2009]. There are at least five genes belonging to *CYP82E* in tobacco. These are: *CYP82E4*, *CYP82E5* and *CYP82E10*, which encode functional nicotine N-demethylases [Siminszky et al. 2005, Chakrabarti et al. 2007, Lewis et al. 2010], as well as *CYP83E2* and *CYP82E3* genes encoding inactive enzymes [Chakrabarti et al. 2007]. Lewis et al. [2010] suggest that these genes spontaneously undergo genetic modifications, resulting in the emergence of individuals that convert nicotine to nornicotine. Hence, in

successive generations of many cultivars and breeding lines considered stable for many functional traits, individual variation in normicotine content is recorded. This phenomenon is particularly frequent in Burley, where a change in phenotype from low normicotine to high normicotine affects up to 20% of the population [Gavilano et al. 2006].

There are several methods to reduce the amount of potentially dangerous compounds in tobacco. One of these is the chemical extraction of nicotine from dry leaves, which reduces the content of this alkaloid to a very low level but also contributes to the reduction of aromatic components in the raw material. Some agronomic practices are also used, such as harvesting only part of the leaves from the plant or abandoning topping and sucker control, which reduces the accumulation of nicotine in the leaves. It is also recommended to reduce the N fertilization. However, besides reducing the content of major alkaloids, these practices result in a marked decrease in yield [Henry et al. 2019]. Mutation breeding is an equally helpful tool in controlling N-nitrosonornicotine in tobacco. The public widely accepts the resulting genetic variation. The technique of mutagenesis of the nicotine N-demethylase gene (*NtabCYP82E4*) of the strongly converting Burley cultivar ‘BB16NN’ was used by Julio et al. [2008]. The resulting mutants were crossed with high-quality tobacco cultivars, and breeding lines were obtained. These lines were distinguished by a stable, non-converting phenotype conditioned by the inactivation of *NtabCYP82E4* alleles. In contrast, Lewis et al. [2010] induced knockout mutations in the nicotine demethylase genes (*CYP82E4*, *CYP82E5v2*, and *CYP82E10*) of the breeding line DH98-325-6. The resulting single-point mutants were then crossed to combine three mutations in one genome. Genotypes were obtained in which the conversion of nicotine to normicotine was very low, averaging 0.55%. The oxidative N-demethylation of nicotine to normicotine can be reduced using the RNA interference technique. This involves inserting and activating small interfering double-stranded RNAi fragments [Chintapakorn and Hamill 2003, Gavilano et al. 2006, Kajikawa et al. 2011]. The CRISPR-Cas genome editing technique provides significant opportunities for modifying the alkaloid profile [Schachtsiek and Stehle 2019]. However, modern molecular biology techniques such as RNAi and CRISPR-Cas and the cultivars obtained through these techniques are not yet widely applicable in agriculture due to legal regulations and low public acceptance.

The reduction of N-nitrosonornicotine in tobacco can also be achieved by selecting appropriate parental forms for crossing, followed by selecting individuals with low normicotine content in the progeny. Using rouging is a fairly simple and cost-effective strategy, but it requires systematic control of the alkaloid profile of parental forms and progeny. Any individuals that exhibit more than 3% conversion of nicotine to normicotine should be excluded from seed production. Jung et al. [2005] conducted studies to eliminate converting genotypes from tobacco materials. The initial material consisted of Burley tobacco breeding lines KB 9118, which exhibited a varying proportion of converters in the population, ranging from 25% to 56%. The technique of self-pollination of non-converters was used and the progeny plants were tested to select non-converters in the next generation. In the first year after selection, non-converting lines accounted for 75% (12 out of 16 tested). However, the authors suggest that eliminating converters from subsequent populations should be carried out annually before seed harvesting to ensure the production of pure non-converter lines.

The study aimed to evaluate the content of major alkaloids and the conversion rate of nicotine to normicotine in the leaves of four successive generations obtained through a selection and self-pollination of non-converting and highly converting genotypes in the

tobacco cultivars and breeding lines. Additionally, the possibility of reducing potentially carcinogenic compounds in tobacco cultivars and lines was determined. Moreover, the study also includes a comparison of isogenic lines differing extremely in their ability to convert nicotine in order to assess the correlation between the conversion capacity and tobacco morphological traits.

MATERIALS AND METHODS

Plant material

The initial experimental material included four Polish cultivars and breeding lines of Virginia tobacco: 1) 'WAC120' a black root-rot resistant cultivar, 2) 'WAC121' a newly developed cultivar with recognized high-quality of leaves, 3) 'Sybilla' a cultivar described as nicotine-free, and 4) WGLB breeding line with *N. glauca*-type resistance to black root rot [Trojak-Goluch and Berbeć 2011]. The study also examined Burley tobacco, including the popular American cultivar 'TN90' with good disease resistance, as well as five high-yielding breeding lines ZD2, TNX1, TNX2, TNX3, and TNX4, which have good agronomic characteristics and were derived from a cross between 'TN90' and Polish Burley cultivars. All tobacco cultivars and lines were sourced from the collection maintained in the Institute of Soil Science and Plant Cultivation in Puławy, being the part of the National Centre for Plant Genetic Resources: Polish Genebank, Radzików, Poland.

Field procedure

Field experiments were conducted at the Experimental Station (51°27'N 22°03'E), of the Institute of Soil Science – State Research Institute, Puławy, Poland, from 2014 to 2018. The aim was to select individuals that do not convert and those that convert strongly in subsequent generations. Seedlings were prepared in 160 multicellular trays measuring 60 × 40 cm under greenhouse conditions. Tobacco transplantation was carried out in May. Mineral fertilization (NPK) was completed before planting. A 50 kg⁻¹ of N, 125 kg⁻¹ of K₂O, 100 kg⁻¹ of P₂O₅ and 112 kg⁻¹ of SO₃ per 1 ha dose of minerals was applied. The plot area was 17.82 m² and included 44 plants spaced at 0.9 m × 0.45 m. The plot was formed by four rows, each with 11 plants. Tobacco management practices were appropriate for the type of tobacco used, with the exception of removing the main inflorescence and suckers. Mature leaves were harvested in five rounds from 30 randomly selected plants per plot. The leaves were air-cured independently of the type of tobacco to ensure conditions favorable for oxidative N-demethylation of nicotine. All leaves from individual plants were analyzed using a gas chromatography. The content of nicotine and nornicotine, as well as the rate of conversion of nicotine to nornicotine, were determined for each of the 30 plants. The flowering plants' inflorescences were protected with paper bags to enable self-pollination for seed setting. However, only plants with the most favorable nicotine to nornicotine ratio, i.e. with the highest nicotine content and the lowest nornicotine content, were used for seed collection within each plot. The seeds were then sown, and the resulting plants were evaluated for their alkaloid profile. The same procedure was followed in subsequent years of the study.

Sample preparation for GC/MS analysis

To evaluate the alkaloid profile, plant material consisting of all leaves collected from individual plants was used [Jack et al. 2003]. Dried and ground leaves weighing 1 ± 0.01 g were incubated at room temperature for 15 min in 7 ml of 2 M NaOH. Subsequently, the leaves were extracted in 25 ml of tetr-butyl methyl ether (HPLC purity) with an internal standard (quinoline 0.4 mg ml^{-1}). The extraction process was carried out for 2 h and at 130 rpm. The extracted solution was separated into an organic layer, and 1 ml was transferred into vials. The concentration of the alkaloids was determined using gas chromatography-mass spectrometry.

Analysis of the alkaloid content in tobacco leaves

For the study of alkaloids, an Agilent Technologies GC System 7890A gas chromatograph coupled with an MS 5975C mass detector and an Agilent Technologies 19091S-433UI model HP-5MS polar chromatographic column ($30 \text{ m} \times 0.250 \text{ mm}$, stationary phase film thickness $0.25 \text{ }\mu\text{m}$) was used. We select chromatographic separation conditions to achieve optimal separation of the analyzed substances. The temperature program was as follows: the initial temperature was set at $115 \text{ }^{\circ}\text{C}$ for 10 min, followed by an increase of $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per min until it reached $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, where it was held for 2 min. The temperature was then increased to $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ at a rate of $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per min and held for 10 min. Separation was carried out using helium at a flow rate of 1 ml per min. Samples were injected through an injector heated to $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ onto the chromatography column at a rate of $1 \text{ }\mu\text{l}$ of sample (split, 20 : 1).

The concentration of nicotine and nornicotine were determined by comparing the mass spectrum of the recorded chromatographic peaks and the retention time of the tested compounds with the standards used, namely nicotine (Sigma Aldrich CAS 54-11-5) and nornicotine (Toronto Research Chemicals CAS 5746-86-1). The internal standard method was used for quantitative analysis with quinoline (Sigma-Aldrich CAS 91-22-5) as the constant concentration at 0.4 mg ml^{-1} . Alkaloids were prepared as separate stock solutions in extraction solvent with nicotine at 10 mg ml^{-1} and nornicotine at 10 mg ml^{-1} . Calibration solutions were then created by combining the appropriate amounts of each stock solution in a volumetric flask and diluting to the desired volume, resulting in six different concentrations. The calibration curve solutions covered a concentration range of $0.6\text{--}0.02 \text{ mg ml}^{-1}$ for nicotine and $0.08\text{--}0.002 \text{ mg ml}^{-1}$ for nornicotine. The linear coefficient of determination for nicotine was $R^2=0.999$, while for nornicotine, it was $R^2=0.998$. The total content of nicotine and nornicotine in tobacco leaves was determined using the equation:

$$\text{AC} = \% \text{ chromatogram} / \text{d.w.} \times 10$$

where: AC – alkaloid content (mg g^{-1} d.w.); d.w. – the dry weight of the sample (g); % chromatogram – is a mass of nicotine or nornicotine for each test portion aliquot calculated using the coefficient of the linear regression.

Analysis of the alkaloid content in tobacco leaves

Data on the nicotine and nornicotine content in leaf dry weight were used to calculate the conversion rate. The following equation [Jack et al. 2003] was used for the calculation:

$$\text{conversion rate (\%)} = \frac{\text{nornicotine content}}{\text{nicotine content} + \text{nornicotine content}} \times 100$$

nornicotine content in dry weight (%); nicotine content in dry weight (%).

The percentage of plants with a conversion rate in the range from 0 to 100 was determined. Then, based on the results, the tobacco cultivars and breeding lines were assigned different levels of conversion (Tab. 1).

Table 1. Range of conversion of nicotine to nornicotine and the corresponding conversion levels in cultivars and breeding lines of tobacco

Range of conversion (%)	Level of conversion
≤3	no conversion*
3–10	low
10–30	medium
30–60	strong
60–90	very strong
>90	total

* The term „no conversion” has been established according to the recommendations of tobacco companies while the other levels are an in-house study

Evaluation of the relationship between nicotine conversion capacity and morphological traits of tobacco

In 2018, a pot experiment was conducted in the greenhouse under partially controlled conditions. The experiment included three breeding lines, ZD2, TNX1, and WGLB, which were selected through the roguing process. For each of them, a converting population C (range of conversion >60%) and a non-converting population N (range of conversion ≤3%) were also selected. Six treatments were selected, each represented by 10 plants in 3 replicates. Tobacco seedlings were prepared in the greenhouse at a temperature of 17–25 °C. Then, after 40 days, the plantlets were transferred to 33 cm diameter pots filled with peat substrate (Solvika) at 7 kg each. The soil reaction ranged from 5.5 to 6.0 pH_{KCl}. Each plant received an equal amount of water throughout the experiment. Additionally, the plants were fertilized once with an 8% Yara Tera™ Kristalon Special, NPK 18-18-18 (Yara International ASA) at a rate of 0.5 L per plant pot. Thermal conditions were natural, with a mean daily temperature ranging from 18.9–22.9 °C between May and August. Biometric measurements were taken of all plants, including height (from the base of the plant to the tip of the inflorescence), number of leaves per plant, length, and width of the 7th, 9th, and 15th leaves, and the number of days from planting into pots to the appearance of the first flower. Once the plants reached the generative stage, statistical calculations were made on the basis of the measurements of 10 plants per replication.

Statistical analysis

The plant biometric data and nicotine and nornicotine contents in the leaves were statistically analyzed using Statistica 13.3 StatSoft software. One-way analysis of variance

(ANOVA) was used to test the significance of differences. Tukey's test was used to compare morphological traits and chemical parameters of leaves of the tested cultivars/breeding lines at $P \leq 0.05$. The rate of conversion of nicotine to nornicotine was subjected to an arcsine transformation. The statistical analysis was performed using non-parametric Kruskal-Wallis test.

RESULTS

Analysis of the nicotine and nornicotine content in the tobacco leaves

In 2014, 10 tobacco cultivars and breeding lines belonging to Virginia and Burley tobacco were evaluated for the major alkaloids and the conversion rate of nicotine to nornicotine. The qualitative GC/MS analysis showed that nicotine was the predominant alkaloid in most tested accessions. However, the studied accessions showed significant variation in terms of the content of this alkaloid (Fig. 1).

The nicotine content was particularly high in the cultivars 'WAC121' and 'WAC120' (1.11 and 1.85% d.w., respectively) of Virginia tobacco, as well as in the cultivars/breeding lines 'TN90', TNX2, and ZD2 (1.29, 1.23, 1.00% d.w., respectively) of Burley tobacco 'Sybilla', WGLB (Virginia), and TNX3, TNX4 (Burley) had significantly lower nicotine levels than the others, with nornicotine being the leading alkaloid (Fig. 2). The highest content of nornicotine (0.79%) was found in the TNX4 breeding line.

The study found that the nicotine content of tobacco leaves increased in subsequent years due to the selection and elimination of converting individuals. In most cases, the differences were statistically significant, with the highest alkaloid content recorded after the first year of selection. However, it is important to note that the weather conditions during the 2015 growing season, particularly the high air temperature and low rainfall in August, favored the production and accumulation of alkaloids in tobacco. This resulted in considerable differences in nicotine content between 2015 and 2014 as well as between 2015 and other years. The exception was the cultivar 'TN90', for which the nicotine content in 2017 was significantly lower than that found in the initial plants (Fig. 1).

Analysis of the conversion capacity in the tobacco leaves

The range of conversion and the rate of conversion for individual tobacco cultivars/breeding lines between 2014 and 2018 are shown in Tables 2 and 3. The analysis in the initial populations (2014) revealed individual variability in terms of oxidative N-demethylation of nicotine to nornicotine. High individual variation was observed, particularly in ZD2, TNX1, TNX3 (Burley) – Table 2, and WGLB (Virginia) breeding lines (Tab. 3). In these accessions, there were individuals with strong conversion rates, as well as those with low conversion rates and some who did not convert at all. These lines provide valuable material to breed and select in subsequent generations of stable, non-converting tobacco genotypes. The remaining accessions showed much less individual variation in this regard. TNX2 (Tab. 2) and 'WAC120' (Tab. 3) were homogeneous populations with very low conversion rates. In contrast, TNX3 and TNX4 (Tab. 2) were strong converters, while 'Sybilla' (Tab. 3) exhibited the highest conversion range and rate values in 2014. This suggests that selecting non-converting individuals exhibiting the desired alkaloid profile was challenging.

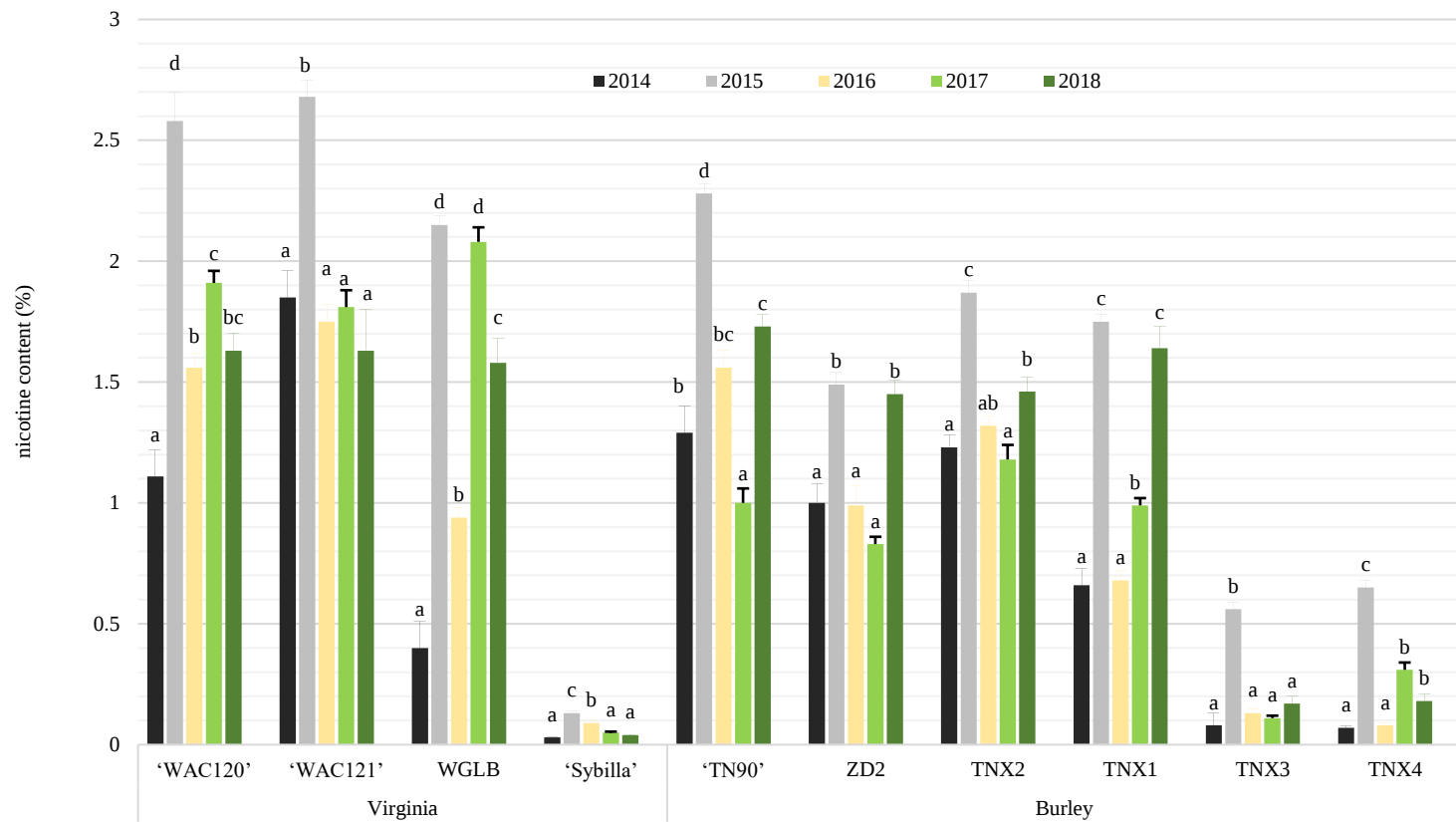


Fig. 1. Nicotine content (mean $\pm$ SE) in cultivars and breeding lines of tobacco in the years 2014–2018; different letters denote significant differences among the years (2014–2018) in the same cultivar/breeding line, according to Tukey's test at $p \leq 0.05$

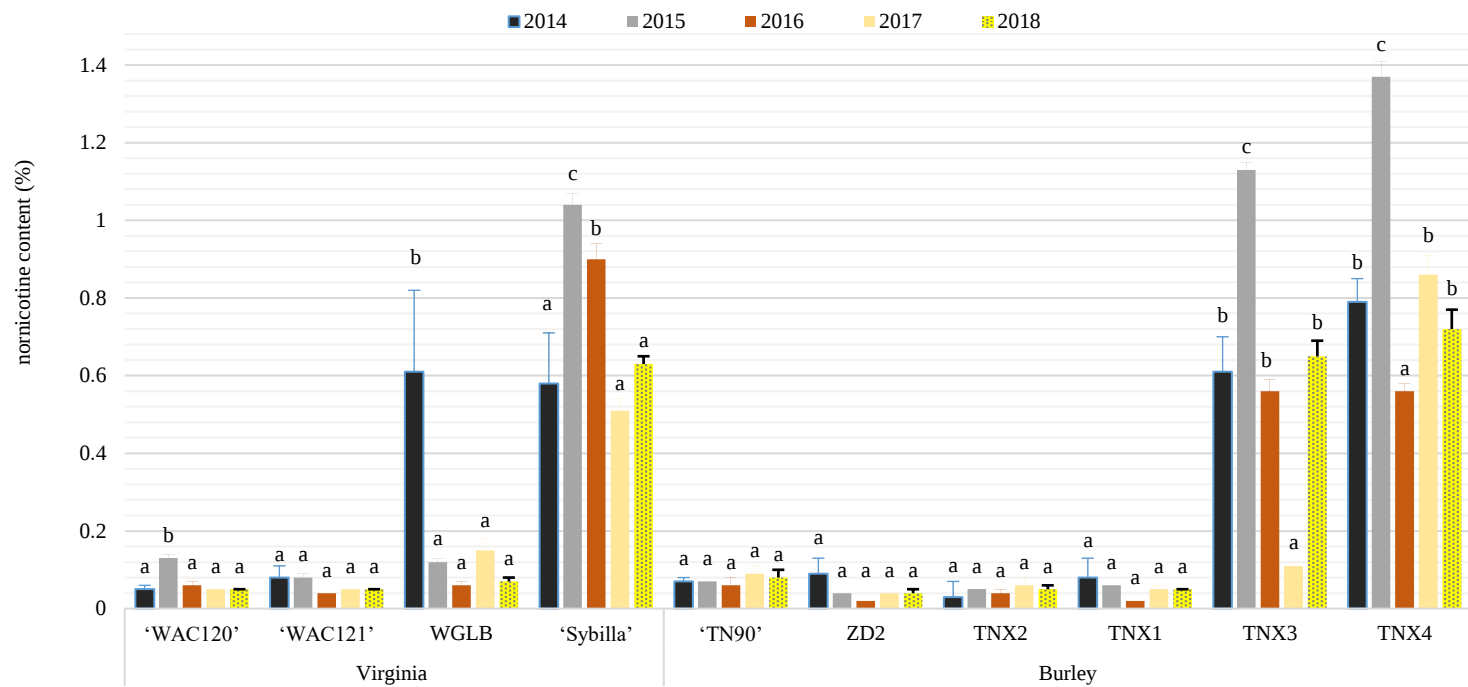


Fig. 2. Normicotine content (mean $\pm$ SE) in cultivars and breeding lines of tobacco in the years 2014–2018; different letters denote significant differences among the years (2014–2018) in the same cultivar/breeding line, according to Tukey's test at $p \leq 0.05$

Table 2. Conversion rate and conversion range in cultivars and breeding lines of Burley tobacco in the years 2014–2018

Con- version	Year	Cultivar/Breeding line – Burley						
		‘TN90’	ZD2	TNX2	TNX1	TNX3	TNX4	$\bar{x}$
Rate (%)	2014	5.3 ^{ab*}	9.9 ^b	2.3 ^a	11.0 ^b	87.0 ^b	92.2 ^d	34.6
	2015	2.8 ^a	2.8 ^a	2.4 ^a	3.4 ^{ab}	67.2 ^a	68.1 ^a	24.4
	2016	4.0 ^a	1.5 ^a	2.4 ^a	2.6 ^a	82.0 ^b	87.5 ^c	30.1
	2017	9.1 ^b	4.4 ^{ab}	4.2 ^a	4.8 ^{ab}	85.1 ^b	74.1 ^b	30.3
	2018	4.8 ^a	2.9 ^a	3.3 ^a	3.2 ^a	80.5 ^b	75.1 ^b	28.3
Range (%)	2014	2.3–21.6	1.4–55.7	1.5–6.2	2.1–85.7	2.2–96.9	83.5–94.6	1.5–96.9
	2015	2.3–4.1	2.2–5.6	2.1–3.4	3.0–3.8	58.3–76.1	60.9–75.7	2.1–76.1
	2016	1.6–22.7	1.1–1.8	1.8–15.9	2.2–3.2	66.9–90.0	82.2–90.9	1.1–90.9
	2017	2.9–49.3	3.0–10.8	2.8–16.3	3.1–14.1	78.7–92.4	63.3–81.4	2.8–92.4
	2018	2.7–23.8	2.4–3.5	3.0–3.8	2.8–3.6	66.2–91.6	66.4–83.2	2.4–91.6

$\bar{x}$ – average;

* mean values not sharing a letter within the column are significantly different between the years (2014–2018), according to the Kruskal-Wallis test at $p \leq 0.05$

Table 3. Conversion rate and conversion range in cultivars and breeding lines of Virginia tobacco in the years 2014–2018

Conversion	Year	Cultivar/Breeding line – Virginia				
		‘WAC120’	‘WAC121’	WGLB	‘Sybilla’	$\bar{x}$
Rate (%)	2014	4.2 ^{bc*}	4.3 ^a	60.7 ^b	93.8 ^{bc}	40.7
	2015	5.0 ^c	3.0 ^a	5.2 ^a	88.8 ^a	25.5
	2016	3.7 ^{abc}	2.4 ^a	4.4 ^a	91.2 ^{ab}	25.4
	2017	2.5 ^a	2.7 ^a	6.5 ^a	91.1 ^{ab}	25.7
	2018	3.3 ^{ab}	3.5 ^a	4.5 ^a	94.2 ^c	26.4
Range (%)	2014	2.6–8.8	1.5–22.5	2.7–97.2	89.9–97.0	1.5–97.2
	2015	4.4–6.1	1.8–5.1	3.4–10.8	84.0–95.4	1.8–95.4
	2016	2.2–7.1	2.2–2.6	2.7–11.5	87.2–93.4	2.2–93.4
	2017	2.2–2.7	2.3–3.0	2.5–15.8	88.6–92.8	2.2–92.8
	2018	2.7–4.8	2.7–8.2	2.6–7.6	91.2–96.2	2.6–96.2

$\bar{x}$ – average;

* mean values not sharing a letter within the column are significantly different between the years (2014–2018), according to the Kruskal-Wallis test at $p \leq 0.05$

Based on the rate of conversion at each accession, the initial population was divided into three main groups (Fig. 3). The first group consisted of the cultivars/lines ‘WAC121’, ‘TN90’, and TNX2, within which mainly non-converting individuals were identified. The

frequency of genotypes showing low to medium conversion (range of conversion 3–30%) was no more than 27%. Most individuals in this group had a rate of conversion only slightly above the threshold value of 3%, including cultivar ‘WAC120’. The second group consisted of ZD2, TNX1, and WGLB breeding lines. The individuals in this group belonged to different conversion levels, ranging from non-conversion ($\leq 3\%$) to those with low and medium conversion, as well as total conversion ($>90\%$). The WGLB line obtained by interspecific hybridization of *N. tabacum* $\times$ *N. glauca*, was of particular interest. This line was represented by individuals belonging to all conversion levels. The data showed that total converters accounted for 46.7% of the total, with very strong converters at 10%, strong converters at 10%, medium converters at 23.3%, low converters at 6.7%, and non-converters at 3.3%.

The third group consisted of strong converters, comprising the breeding lines TNX3, TNX4 and the cultivar ‘Sybilla’, in which most individuals converted very strongly or completely (conversion range 60–100%) – Figure 3.

Selection efficiency of non-converters in the group I

The analysis of the frequency of plants showing different rates of conversion in the initial populations (in 2014) and self-pollinated offspring populations in 2018 revealed a substantial increase in the proportion of non-converters (Figs 3 and 4). ‘WAC120’ showed a 33.3% increase in the proportion of genotypes that do not convert nicotine to normicotine after 4 years of selection. However, the differences in mean conversion rate observed for this cultivar in 2014 and 2018 were not statistically significant (Tab. 3).

In the subsequent cultivar ‘WAC121’, individuals exhibiting medium conversion were eliminated after 4 years of selection. However, the study found an increased frequency of individuals with low conversion (3–10%) compared to that recorded in 2014 (Figs 3 and 4). Nevertheless, a detailed assessment of the conversion ability scores in this population revealed that the majority of individuals classified in this range were converters with conversion level only slightly above the 3% threshold. The selection for reduced conversion ability in the ‘TN90’ cultivar and the TNX2 breeding line was slightly less effective. In 2018, the number of individuals with medium conversion decreased slightly compared to the initial populations. However, there was an increase in the frequency of individuals with low conversion.

Selection efficiency of non-converters in the group II

The selection of stable, non-converting populations gave the best results in group II. For the WGLB line (Virginia), which initially had plants belonging to all conversion ranges, significant changes were observed after the fourth year of selection in the frequency of non-converters as well as individuals showing low and medium conversion. In 2018, 20% of the population were non-converters, while the remaining 80% were low converters (Fig. 4). The differences in the rate of conversion observed in 2014 and 2018 were statistically significant (Tab. 3). Additionally, in the successive generations obtained from self-pollination of the ZD2 (Burley), there was an increase in the number of non-converting plants, with their proportion being very high at 80% (Fig. 4). Based on the analysis of the alkaloid profile, satisfactory results were obtained from the plant selection process and self-pollination of non-converters of the TNX1 breeding line. The conversion rate in the 2018 population was significantly lower than that of the 2014 population (Tab. 2). Furthermore, 60% of the total population were low-converting individuals, while 40% were non-converters. There were no plants that showed a higher rate of conversion (Fig. 4).

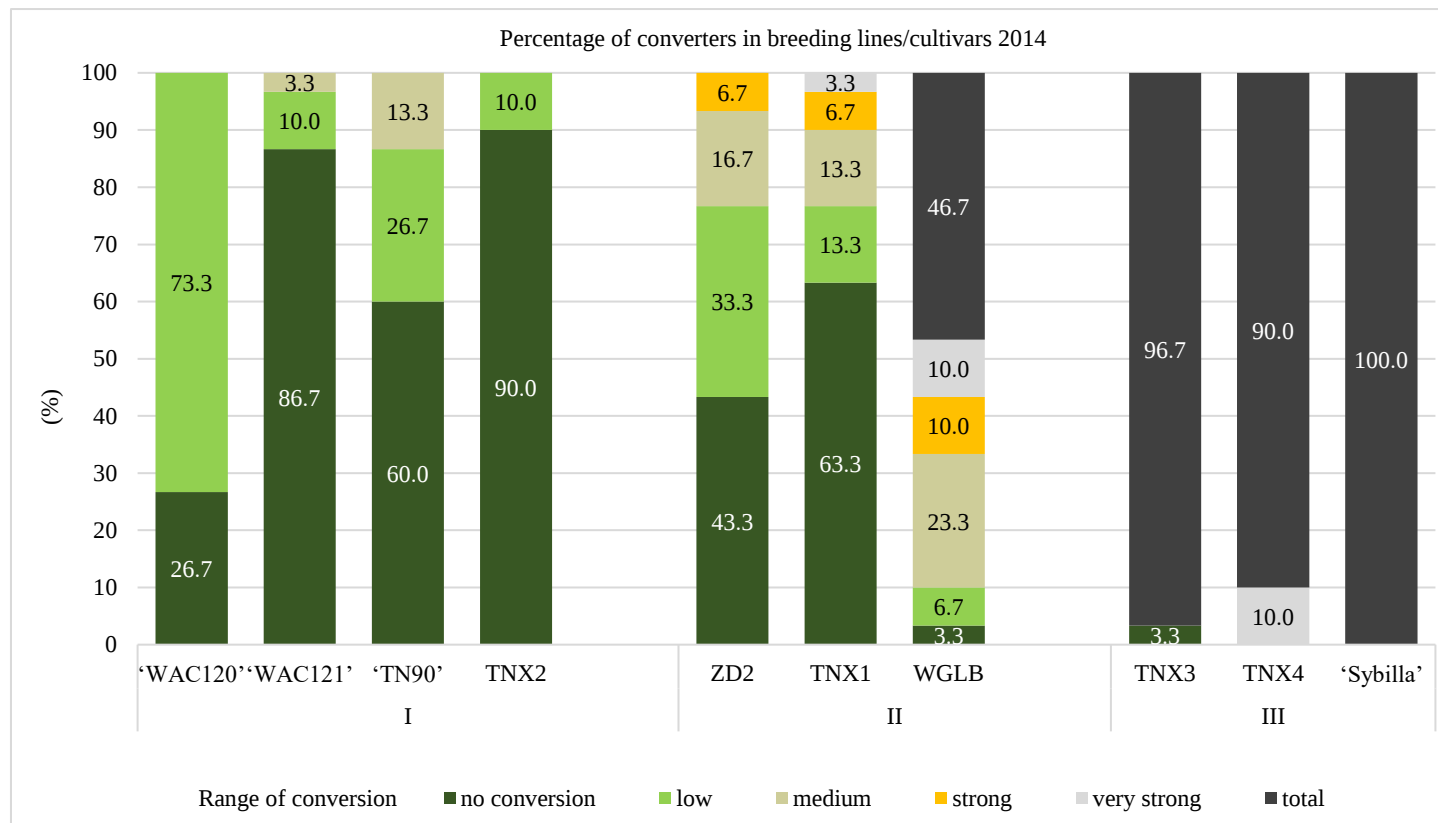


Fig. 3. The percentage of genotypes showing different conversion rates in cultivars and breeding lines of tobacco in 2014

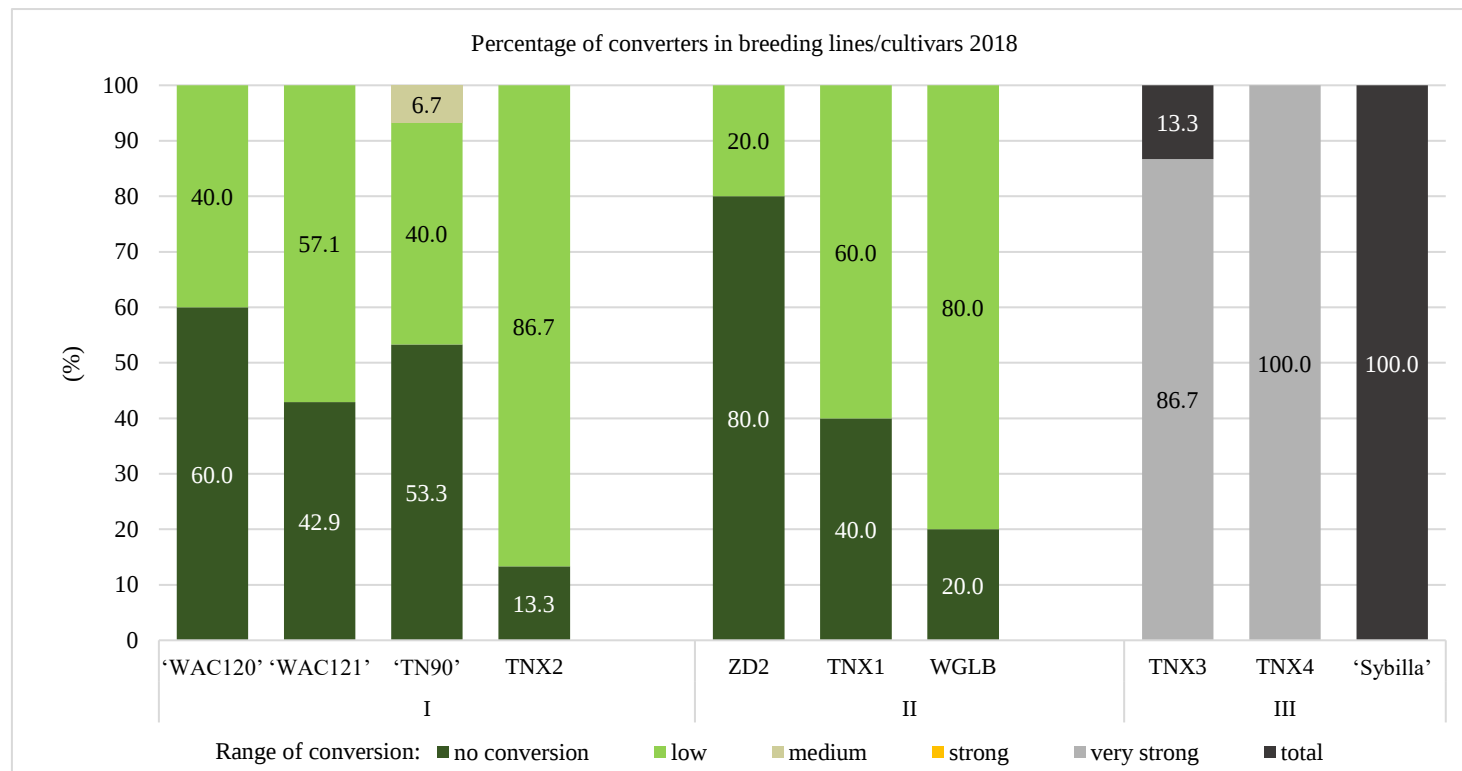


Fig. 4. The percentage of genotypes showing different conversion rates in cultivars and breeding lines of tobacco in 2018

Selection efficiency of non-converters in group III

The initial population of the ‘Sybilla’ had a very low content of nicotine and a high content of nornicotine (Figs 1 and 2). Most of the plants converted nicotine to nornicotine to a very strong or total level. Attempts to select non-converting plants were unsatisfactory. In 2018, the frequency of plants with total conversion was 100% (Fig. 4) and the average conversion rate was 94.2% (Tab. 3). Burley tobacco breeding lines TNX3 and TNX4 exhibited a similar characteristic. No non-converting or low-converting genotypes were found in 2018 (Fig. 4). However, due to lack of suitable breeding material, lines with better chemical parameters could not be obtained in subsequent years of selection. In 2018, 86.7% of the population of the TNX3 breeding line were very strong converters and 13.3% were total converters. In contrast, all plants in the TNX4 line, showed a very strong conversion level.

Evaluation of the relationship between conversion rate and agronomic traits of tobacco breeding lines

A greenhouse experiment was conducted in 2018 to determine the relationship between conversion capacity and morphological traits in tobacco. The study compared the most important phenotype traits, which have a strong influence on yield quantity and quality, of isogenic tobacco breeding lines with different conversion ability. Plant measurements revealed that the progeny of non-converters differed significantly from the progeny of converters in five of the nine studied traits (Tab. 4). It was higher than the progeny obtained from the self-pollination of converters. However, statistically significant differences were observed only for the ZD2 breeding line, and not for the others. The comparison of leaf size showed that the non-converting lines tended to produce wider and longer leaves than the converters. However, the differences were only statistically significant for the length and width of the 9th and 15th leaf of the TNX1 and ZD2 lines.

Table 4. Plant height, number of leaves per plant, dimensions of leaves, and days to flower of the tobacco isogenic lines TNX1, ZD2, WGLB that differ in their conversion capacity

Trait	TNX1		ZD2		WGLB	
	N	C	N	C	N	C
Plant height (cm)	192.1 ±1.3 ^a	198.5 ±4.4 ^a	226.3 ±2.4 ^b	209.9 ±2.2 ^a	208.5 ±1.1 ^a	206.9 ±1.6 ^a
AW 7 (cm)	31.8 ±0.5 ^a	31.1 ±0.6 ^a	35.5 ±0.5 ^a	36.7 ±0.4 ^a	36.2 ±0.4 ^a	35.7 ±0.8 ^a
AL 7 (cm)	50.1 ±1.5 ^a	52.2 ±0.6 ^a	57.0 ±0.7 ^b	55.3 ±0.6 ^a	52.3 ±0.4 ^a	51.5 ±0.6 ^a
AW 9 (cm)	28.7 ±0.6 ^b	26.0 ±0.7 ^a	31.8 ±0.6 ^a	31.4 ±1.2 ^a	34.7 ±0.7 ^a	32.7 ±0.9 ^a
AL 9 (cm)	53.4 ±0.7 ^b	50.9 ±0.8 ^a	53.9 ±0.8 ^a	52.9 ±0.5 ^a	49.6 ±0.9 ^a	48.1 ±1.9 ^a
AW 15 (cm)	20.6 ±0.4 ^b	15.8 ±0.4 ^a	23.8 ±0.4 ^b	21.5 ±0.6 ^a	21.5 ±0.5 ^a	21.0 ±0.7 ^a
AL 15 (cm)	42.9 ±0.9 ^b	38.1 ±0.7 ^a	42.5 ±0.5 ^a	40.7 ±0.8 ^a	34.91.3 ^a	38.3 ±1.2 ^a
Flowering*	58.9 ±0.4 ^a	59.6 ±0.7 ^a	68.2 ±1.1 ^a	65.3 ±2.2 ^a	60.7 ±0.5 ^a	60.6 ±0.3 ^a
Number of leaves	22.0 ±0.3 ^a	22.8 ±0.3 ^a	23.5 ±0.3 ^a	23.9 ±0.3 ^a	19.0 ±0.7 ^a	20.4 ±0.3 ^a

N – non-converter line, C – converter line, AW7 – average width of the 7th leaf on the stalk, AL7 – average length of the 7th leaf on the stalk, * – number of days from planting into pots to beginning of flowering
Data represent mean ± (SD) of three replicates. Different letters in the row denote significant differences between isogenic breeding lines N and C, according to Tukey’s test at $p \leq 0.05$

No similar patterns were found in the other breeding lines. No significant differences were found between the isogenic lines in 7th leaf size, number of leaves and flowering date. Virginia tobacco isogenic lines WGLB N and WGLB C were found to be the most homogeneous in terms of the morphological traits. The progeny of converters were on average 1.6 cm lower than the progeny of non-converter. It also produced slightly smaller leaves but the differences obtained were not statistically significant. The WGLB N and WGLB C lines reached the flowering stage at a similar time indicating similar rates of plant development and reaching maturity.

DISCUSSION

In the present study, the GC-MS technique was used to determine the alkaloid profile in the initial populations of 10 Burley and Virginia tobacco cultivars/breeding lines. On average, Burley tobacco accessions had lower nicotine content than Virginia tobacco. Most literature reports indicate that Burley cultivars generally have higher nicotine levels than Virginia cultivars [Burton et al. 1992, Siminszky et al. 2005]. This difference is likely due to genetic factors, higher nitrogen fertilization and air curing. The observed differences in the main alkaloid content between Burley and Virginia cultivars/breeding lines in our study are likely due to their origin. Burley breeding lines such as ZD2, TNX3 and TNX4 were obtained through breeding programs that did not consider the strict requirements of regulatory agencies, such as the World Health Organization [2015] and tobacco companies. They were produced by crossing ‘TN90’ – a moderately stable converter according to Jack et al. [2004], with local Polish Burley cultivars, unstable converters according to Berbec [2014]. The main alkaloid found in these plants was normicotine, with nicotine accounting for only a small proportion. In contrast, populations of Virginia cultivars and breeding lines were far less diverse in terms of major alkaloid content. Most of the accessions were characterized by a relatively high content of nicotine and a low content of normicotine. This was achieved through a breeding process that involved identifying and removing the cherry-red individuals with high levels of normicotine.

The results of the gas chromatography analysis revealed varying abilities of cultivars/breeding lines to convert nicotine to normicotine. Based on this, the initial plant material was classified into three groups of converters. Four cultivars/lines with predominantly non-converting individuals were classified into group I. This group included Virginia cultivars ‘WAC120’ and ‘WAC121’, as well as Burley ‘TN90’ and TNX2. A comparison of the range of conversion, as well as the rate of conversion of individual plants in the initial populations and in the progeny obtained after the first year of selection, did not reveal the presence of strong or very strong converters. However, the study revealed a high proportion of non-converters in this group, which corresponded with the result previously obtained by Burk and Jeffrey [1958] in the progeny of the stable and non-converting Burley 11A as well as with the proportion of non-converters found in stable, low-converting selections of Burley tobacco cultivars ‘TN90’ and ‘KY9’ [Lewis et al. 2008]. Nevertheless, in the following years of the study, group I exhibited a reduction in the percentage of non-converters and the appearance of individuals with low (range 3–10%) and medium (range 10–30%) conversion. It is important to note that this trend was only observed in Burley accessions, as Virginia cultivars ‘WAC120’ and ‘WAC121’ consisted mostly of non-converting plants. The results are consistent with the data presented by

Gavilano et al. [2006]. They evaluated the conversion capacity of commercial tobacco cultivars and showed that up to 20% of converters may arise in a single generation from parents that are non-converters, in the case of Burley cultivars. The study and results of Jung et al. [2005] clearly demonstrate that Burley cultivars exhibit genetic instability at the nicotine conversion locus and revert to the converter phenotype. In contrast, Virginia cultivars show much greater stability in terms of conversion. Therefore, roguing using self-pollination of low-converting single-plant selections of Virginia is more effective in creating low-converter, stable selections.

The second group consisted of three breeding lines, ZD2, TNX1, and WGLB, which exhibited considerable individual variation in terms of the rate of conversion. The WGLB line showed the greatest variability in this respect. The high content of normicotine and the significant proportion of high-converters in WGLB in 2014 were surprising results. This breeding line was produced by interspecific hybridization of *N. tabacum* 'Wiślica' and *N. glauca* [Trojak-Goluch and Berbec 2011]. None of the parental species used for the production of WGLB showed any tendency toward conversion. The analysis of the leaf alkaloid profile of *N. tabacum* 'Wiślica', places it in the group of low converters [Berbec 2014]. The evaluation of the *Nicotiana glauca* species indicates low normicotine content, with anabasine being the predominant alkaloid (86.7%) [Sisson and Severson 1990]. The probable cause of the high levels of normicotine in the WGLB line can be explained by analyzing the alkaloid biosynthesis pathway in tobacco and its wild relatives of *Nicotiana* [Lewis et al. 2015]. It was found that 3,6-dihydronicotinic acid, one of the quinolinic acid conversion products used for the production of anabasine, can also be used for the production of nicotine. The synthesis of anabasine depends on the activity of the berberine bridge enzyme-like (BBL) genes and the availability of the precursor. In the case of the initial WGLB lines having *N. glauca* in their ancestry [Trojak-Goluch and Berbec 2011], nicotine production takes place instead of anabasine production, most likely due to a high supply of 3,6-dihydronicotinic acid and modification of the alkaloid biosynthetic pathway, which is then converted to normicotine. It is important to note that, the selection of WGLB non-converters and, their self-pollination in the following years of the study resulted in the near-complete elimination of individuals metabolizing nicotine to normicotine. This led to the development of a stable breeding line in terms of its alkaloid profile. Jack et al. [2005] conducted a study on the inheritance of conversion factors and the obtaining of stable non-converting populations. The analysis involved segregation of conversion factors in the F₁ and F₂ generations obtained from crosses between converters and non-converters. The majority of the F₁ population was homogeneous and strongly converting, while two of them were heterogeneous in terms of conversion, containing strongly, moderately, and weakly converting individuals. Segregation of conversion factors in a 3:1 ratio, in the F₂ generation, showed that the process of N-demethylation of nicotine is controlled by a single dominant allele and a corresponding recessive non-converting allele. The authors state that non-conversion is characterized by recessive homozygotes. In this study, almost all selected WGLB plants were classified as non-converters, indicating that the selected population is homozygous and stable.

The ZD2 and TNX1 (Burley) lines used in this study exhibited significant individual variation in their ability to convert nicotine to normicotine. The applied technique of selection and self-pollination of non-converters in heterogeneous populations resulted in a stable generation with very low conversion capacity. The results confirm that this technique can be used to generate Burley tobacco that is almost free of normicotine and has a slightly

reduced risk to human health. Previous studies have investigated the stability of conversion in Burley cultivars. Wernsman et al. [2000] and Jung et al. [2005] reported that selection and self-pollination of Burley non-converters resulted in reduced conversion rates in subsequent generations. The authors point out, however, the possibility of a small number of converters arising spontaneously due to the genetic instability of recessive „converter” alleles in the *Nicotiana tomentosiformis* genome (T) of tobacco. Gavilano et al. [2006] reported that up to 20% of the Burley tobacco population exhibits the metabolic pathway leading to nicotine N-demethylation in non-converter progeny.

During the experiment, a third group was identified, consisting exclusively of individuals with a high conversion rate. This group consisted of the Virginia tobacco cultivar ‘Sybilla’ and the two breeding lines TNX3 and TNX4 (Burley). Data analysis on the proportion of converters among these accessions revealed that ‘Sybilla’ was the strongest converter. In this cultivar, there were almost exclusively individuals manifesting complete conversion, indicating potential problems in minimizing the raw material’s carcinogenic properties. Additionally, it has been shown that inconsistent monitoring of alkaloid levels in the plant materials used for breeding programs results in the selection of converting individuals, ultimately leading to a decrease in the quality of the raw material. Unfortunately, attempts to self-pollinate selected individuals and select non-converting plants did not yield the expected results.

A detailed analysis of the morphological traits of isogenic breeding lines that differed in conversion ability showed statistically significant differences between converting and non-converting lines. The converting ZD2 C line was significantly lower than its non-converting counterpart, ZD2 N. Additionally, the 15th leaf of the converting line was shorter and narrower. The most common response for the converting TNX1 C line was a reduction in leaf size compared to the BPTN N. There is a lack of literature reporting comprehensive characteristics of plants with different conversion capabilities. Jung et al. [2005] identified converting plants among KB9118 Burley breeding lines using a thin-layer chromatographic method. Based on the agronomic characteristics of plants, it can be concluded that converters KB9118-7, KB9118-21, and KB9118-23 had smaller and narrower leaves compared to non-converters KB9118-2 and KB9118-4. In addition, it can be concluded that some converting lines were significantly shorter than low converters. No significant differences were found in the days to flower. In contrast, Chaplin and Burk [1984] studied the agronomic and chemical characteristics of BC₅F₇ generations obtained from the crossing of three flue-cured cultivars ‘Cocker139’, ‘NC95’, ‘SC58’ with a low alkaloid line. They also evaluated DH lines obtained from the BC₅F₁ generation. Their field experiments showed that total alkaloid levels were not associated with days to flower, plant height flower, plant height, and number of leaves per plant. However, they observed that in populations derived from the cultivars ‘NC95’ and ‘SC58’, some lines, especially the non-converting ones (with normicotine levels ranging from 0.02–0.08%), had statistically lower yields than the recurrent parent. Generally, lines with low normicotine had the lowest grade index. They also produced less reducing sugars than the parental forms, but the differences were not statistically significant in this case. The authors concluded that lines with low total alkaloid levels are likely to have lower grade indexes and may be less acceptable to smokers than those with high levels. The relationship between total alkaloid content and agronomic and chemical traits of isogenic lines of flue-cured tobacco was the subject of a study by Chaplin and Weeks [1976]. The study showed that alkaloid level had little association with plant height, number of leaves per

plant, or days to flower. Additionally, the authors found that the low alkaloid lines (approximately 0.20%) had lower yield, grade index, total N, and reducing sugars content than the „normal” flue-cured cultivars. Explaining the association between low alkaloid content and reduced yield is challenging. Chaplin and Weeks [1976] suggest that tobacco leaves from the low alkaloid lines are probably thinner than leaves from the „normal” alkaloid lines. The results of our study suggest that one of the causes of reduced yield in converters may also be a reduction in leaf size. However, considerable variation in cultivar has been observed for this trait.

CONCLUSION

Taking into account the rate of conversion of nicotine to nornicotine in both Burley and Virginia tobacco cultivars/breeding lines and the harmfulness of N-nitrosornicotine to humans, there is a strong need to systematically control the alkaloid profile of tobacco cultivars and breeding lines. By conducting a controlled elimination of converting individuals, especially within breeding lines characterized by a wide conversion range, it was possible to reduce the potentially carcinogenic compounds in tobacco leaves. As a result of the studies, three breeding lines, ZD2, TNX1 (Burley tobacco), and WGLB (Virginia tobacco), exhibiting a stable rate of nicotine conversion of <3% in successive years, were obtained. There is a relationship between the traits determining the phenotype of tobacco cultivars/lines and the content of particular alkaloids. The length and width of the 9th and 15th leaves of the non-converters were longer and wider than those of the non-converting analogues of the TNX1 and ZD2 lines. By conducting selection based on the removing from seed populations of individuals converting nicotine to nornicotine, an improvement in the technological utility of raw tobacco can be expected.

REFERENCES

- Andra S.S., Marris K.C., 2011. Tobacco-specific nitrosamines in water: An unexplored environmental health risk. *Environ. Int.* 37, 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.11.003>
- Benowitz N.L., 2010. Nicotine addiction. *N. Engl. J. Med.* 362(24), 2295–2303. <https://doi.org/10.1056/NEJMra0809890>
- Berbeć A., 2014. Unpublished materials.
- Burk L.G., Jeffrey R.N., 1958. A study of inheritance of alkaloid quality in tobacco. *Tob. Sci.* 2(31), 139–141.
- Burns D.M., Dybing E., Gray N., Hecht S., Anderson C., Sanner T., O'Connor R., Djordjevic M., Dresler C., Hainaut P., Jarvis M., Opperhuizen A., Straif K., 2008. Mandated lowering of toxicants in cigarette smoke: A description of the World Health Organization TobReg proposal. *Tob. Control* 17, 132–141. <https://doi.org/10.1136/tc.2007.024158>
- Burton H.R., Dye N.K., Bush L.P., 1992. Distribution of tobacco constituents in tobacco leaf tissue. 1. Tobacco-specific nitrosamines, nitrate, nitrite and alkaloids. *J. Agric. Food Chem.* 40, 1050–1055.
- Cai B., Siminszky B., Chappell J., Dewey R.E., Bush L.P., 2012. Enantioselective demethylation of nicotine as a mechanism for variable nornicotine composition in tobacco leaf. *J. Biol. Chem.* 287(51), 42804–42811. <https://doi.org/10.1074/jbc.M112.413807>

- Chakrabarti M., Bowen S.W., Coleman N.P., Meekins, K.M., Dewey, R.E., Siminszky B., 2008. CYP82E4-mediated nicotine to nornicotine conversion in tobacco is regulated by a senescence-specific signaling pathway. *Plant Mol. Biol.* 66, 415–427. <https://doi.org/10.1007/s11103-007-9280-6>
- Chakrabarti M., Meekins K.M., Gavilano L.B., Siminszky B., 2007. Inactivation of the cytochrome P450 gene CYP82E2 by degenerative mutations was a key event in the evolution of the alkaloid profile of modern tobacco. *New Phytol.* 175(3), 565–574. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02116.x>
- Chaplin J.F., Burk L.G., 1984. Registration of LMAFC34 tobacco germplasm. *Crop Sci.* 24, 1220–1220.
- Chaplin J.F., Weeks W.W., 1976. Association between percent total alkaloids and other traits in flue-cured tobacco. *Crop Sci.* 16, 416–418.
- Chintapakorn Y., Hamill J.D., 2003. Antisense-mediated down-regulation of putrescine *N*-methyltransferase activity in transgenic *Nicotiana tabacum* L. can lead to elevated levels of anatabine at the expense of nicotine. *Plant Mol. Biol.* 53, 87–105. <https://doi.org/10.1023/B:PLAN.0000009268.45851.95>
- Fant R.V., Henningfield J.E., Nelson R.A., Pickworth W. B., 1999. Pharmacokinetics and pharmacodynamics of moist snuff in humans. *Tob. Control* 8(4), 387–392. <https://doi.org/10.1136/tc.8.4.387>
- Gavilano L.B., Coleman N.P., Burnley L.E., Bowman M.L., Kalengamaliro N.E., Hayes A., Bush L., Siminszky B., 2006. Genetic engineering of *Nicotiana tabacum* for reduced nornicotine content. *J. Agric. Food Chem.* 54(24), 9071–9078. <https://doi.org/10.1021/jf0610458>
- Henry J.B., Vann M.C., Lewis R.S., 2019. Agronomic practices affecting nicotine concentration in flue-cured tobacco: A review. *Agron. J.* 111(6), 3067–3075. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.04.0268>
- Jack A.M., Bush L.P., Fannin F.F., Miller R.D., 2003. Variability in nicotine conversion: site or sampling? Information Bulletin, CORESTA Congress, Bucharest, A02.
- Jack A. M., Bush L.P., Fannin F.F., Li X., 2004. Relative stability of nicotine to nornicotine conversion in three Burley cultivars. Information Bulletin, CORESTA Congress, Kyoto, AP02.
- Jack A.M., Bush L.P., Fannin F.F., Li X., 2005. F1 and F2 populations of converter and non-converter air-cured tobacco plants. Information Bulletin, CORESTA Santa Cruz do Sul, A12.
- Julio E., Laporte F., Reis S., Rothan C., Dorlac de Born F., 2008. Reducing the content of nornicotine in tobacco via targeted mutation breeding. *Mol. Breed.* 21, 369–381. <https://doi.org/10.1007/s11032-007-9138-2>
- Jung S.K., Chung Y.H., Keum W.S., Kang Y.G., Shin S.K., Jo J., Choin S.J., 2005. Identification of nicotine converter plants in burley tobacco KB9118 (KB108). *J. Korean Soc. Tob. Sci.* 27, 11–18.
- Kajikawa M., Shoji T., Kato A., Hashimoto T., 2011. Vacuole-localized berberine bridge enzyme-like proteins are required for a late step of nicotine biosynthesis in tobacco. *Plant Physiol.* 155(4), 2010–2022. <https://doi.org/10.1104/pp.110.170878>
- Lewis R.S., Jack A.M., Morris J.W., Robert V.J., Gavilano L.B., Siminszky B., Bush L.P., Hayes A.J., Dewey R.E., 2008. RNA interference (RNAi)-induced suppression of nicotine demethylase activity reduces levels of a key carcinogen in cured tobacco leaves. *Plant Biotechnol. J.* 6, 346–354. <https://doi.org/10.1111/J.1467-7652.2008.00324.X>
- Lewis R.S., Bowen S.W., Keogh M.R., Dewey R.E., 2010. Three nicotine demethylase genes mediate nornicotine biosynthesis in *Nicotiana tabacum* L.: functional characterization of the CYP82E10 gene. *Phytochem.* 71(17–18), 1988–1998. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.09.011>
- Lewis R.S., Lopez H.O., Bowen S.W., Andres K.R., Steede W.T., Dewey R.E., 2015. Transgenic and mutation-based suppression of a berberine bridge enzyme-like (BBL) gene family reduces alkaloid content in field-grown tobacco. *Plos One*, 10(2), e0117273. <https://doi.org/10.1371/Journal.Pone.0117273>
- Mishra A., Chaturvedi P., Datta S., Sinukumar S., Joshi P., Garg A., 2015. Harmful effects of nicotine. *Indian J. Med. Paediatr. Oncol.* 36(01), 24–31. <https://doi.org/10.4103/0971-5851.151771>

- Schachtsiek J., Stehle F., 2019. Nicotine-free, nontransgenic tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) edited by CRISPR-Cas9. *Plant Biotechnol. J.* 17(12), 2228–2230. <https://doi.org/10.1111/pbi.13193>
- Shen J.-C., Shao X.G., 2006. Determination of tobacco alkaloids by gas chromatography-mass spectrometry using cloud point extraction as a preconcentration step. *Anal. Chim. Acta* 561(1–2), 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.01.002>
- Shoji T., Inai K., Yazaki Y., Sato Y., Takase H., Shitan N., Yazaki K., Goto Y., Toyooka K., Matsuoka K., Hashimoto T., 2009. Multidrug and toxic compound extrusion-type transporters implicated in vacuolar sequestration of nicotine in tobacco roots. *Plant Physiol.* 149(2), 708–718. <https://doi.org/10.1104/pp.108.132811>
- Siminszky B., Gavilano L., Steven W.B., Dewey R.E., 2005. Conversion of nicotine to nornicotine in *Nicotiana tabacum* is mediated by CYP82E4, a cytochrome P450 monooxygenase. *Plant Biol.* 102(41), 14919–14924. <https://doi.org/10.1073/pnas.0506581102>
- Sisson V.A., Severson R.F., 1990. Alkaloid composition of the *Nicotiana* species. *Beit. Tab. Int.* 14, 327–339. <https://doi.org/10.2478/cttr-2013-0610>
- Trojak-Goluch A., Berbeć A., 2011. Growth, development and chemical characteristics of tobacco lines carrying black root rot resistance derived from *Nicotiana glauca* (Grah.). *Plant Breed.* 130(1), 92–95. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2009.01755.x>
- Tso T.C., 1990. Chemical Characteristics Production and Leaf Quality and Usability. In: T.C. Tso (red.), *Production, physiology and biochemistry of tobacco plant*. Bestville Maryland, 595–634.
- Wang X., Bennetzen J.L., 2015. Current status and prospects for the study of *Nicotiana* genomics, genetics and nicotine biosynthesis genes. *Mol. Genet. Genomics* 290, 11–21. <https://doi.org/10.1007/s00438-015-0989-7>
- Wernsman E.A., Davis D.L., Beeson D., Stennis V., 2000. Genetic instability at a nicotine conversion to nornicotine locus in Burley tobacco and its consequences on secondary amine alkaloids and TSNA'S. *Bulletin Special, CORESTA Congress, Lisbon*, 45.
- World Health Organization, 2015. *Advisory Note: Global Nicotine Reduction Strategy*. WHO Study Group on Tobacco Product Regulation. Geneva: WHO Press, 12–14.
- Zou X.D., BK A., Abu-Izneid T., Aziz A., Devnath P., Rauf A., Mitra S., Emran T.B., Mujawah A.A.H., Lorenzo J.M., Mubarak M.S., Wilairatana P., Suleria H.A.R., 2021. Current advances of functional phytochemicals in *Nicotiana* plant and related potential value of tobacco processing waste: a review. *Biomed. Pharmacother.* 143, 112191. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112191>

Source of funding: The study was financed within the framework of the task 1.5 from a targeted grant of the Polish Ministry of Agriculture and Rural Development for 2024.

Received: 9.05.2024

Accepted: 20.10.2024

Published: 13.01.2025



¹ Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, Faculty of Veterinary Medicine,
Burdur Mehmet Akif Ersoy University, 15030, Burdur, Turkey

² Institute of Animal Nutrition and Bromatology, Faculty of Animal Sciences and Bioeconomy,
University of Life Sciences in Lublin, 20-950 Lublin, Poland

* edyta.kowalczuk@up.lublin.pl

HIDIR GÜMÜŞ¹, EDYTA KOWALCZUK-VASILEV²*

Effect of different sowing densities on biomass production and nutritive value of barley green fodder grown in a hydroponic system

Wpływ różnej gęstości wysiewu nasion na produkcję biomasy i wartość
pokarmową zielonki jęczmiennej uprawianej w systemie hydroponicznym

Abstract. We conducted this study to investigate the impact of various seed ratios on the growth rate, performance, nutritive value, and digestibility of fodder grown in a hydroponic system. Seeds were applied at 1000 g for high seed density treatment (HSD: 4.761 kg m⁻²) and 750 g for low seed density treatment in each tray (LSD: 3.571 kg m⁻²). Three harvest times (8th, 9th, and 10th day of germination) were evaluated to measure the shoot height, root length, and fodder yield. Nutritive value and *in vitro* digestibility were determined at 10 days of harvesting. The HSD treatment had higher fresh weight and root length but lower shoot height throughout the harvest time. A higher green fodder yield, dry matter content, dry matter yield, crude protein yield, and lower contents of dry matter and crude protein loss were observed in HSD treatment. The fodder of LSD treatment had a higher content of ether extract, crude ash, crude fibre, and a higher digestibility rate but a lower content of neutral detergent fibre and acid detergent fibre compared to those in the HSD fodder. Taking performance factors into account, the more efficient fodder seems to be barley green fodder with high-density sowing, but considering parameters regarding the nutritive value and feed digestibility such as NDF, ADF, and IVDMD, the more efficient fodder appears to be barley fodder with low-density sowing.

Keywords: barley fodder, digestibility, nutritive value, performance, seed density

Citation: Gümüş H., Kowalczuk-Vasilev E., 2024. Effect of different sowing densities on biomass production and nutritive value of barley green fodder grown in hydroponic system. *Agron. Sci.* 79(3), 65–72. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5400>

INTRODUCTION

Nowadays, livestock production systems face difficulties adapting to climate change's consequences, which negatively affect feed and water supply [Godde et al. 2021]. Under a global warming scenario, the effects of drought are more likely to worsen in the future [Mukherjee et al. 2018]. Drought and water scarcity are concurrently observed in arid and semi-arid regions. Considering climate change and drought, water conservation and sustainable water consumption are critical in agricultural and landscape irrigation [Pereira et al. 2012]. The hydroponic system effectively reduces water wastage by directly applying it to the roots and frequently recycling and reusing it more than once. Hydroponic fodder production requires just 1.5–2 l of water per 1 kg, whereas traditional agricultural conditions need 160 l, 85 l, and 73 l of water to grow 1 kg of green fodder for Rhodes grass, lucerne, and barley, respectively [Shit 2019].

Incubation rooms or hydroponic systems may grow green food without soil or fertilizers. For optimal germination, it is crucial to maintain the appropriate temperature, humidity, and light conditions [Fazaeli et al. 2011]. If these parameters are met, producing green feed becomes considerably more straightforward [Sneath and McIntosh 2003, Hussain et al. 2014]. As the seeds germinate, the roots establish a strong connection and create a dense layer, while the stems grow to 20–23 cm within 7–10 days. Additionally, the stems contain 6–8 times more fresh fodder weight than the seeds. One of the most significant benefits of this kind of production system is that it may be utilized for green fodder production in a sanitary environment without chemicals like herbicides, insecticides, and fungicides [Sneath and McIntosh 2003, Sariçiçek et al. 2018]. The nutritional value of hydroponically grown green fodder has been reported to be higher after 7 days of growth [Akbağ et al. 2014, Saidi and Omar 2015]. Within 7–8 days after planting, energy levels and organic matter contents decreased linearly as structural carbohydrates, including neutral detergent fibre (NDF), acid detergent fibre (ADF), and crude fibre (CF) content increased [Fazaeli et al. 2012, Gebremedhin et al. 2015]. A low dry matter content might be an important limitation for animal nutrition and fodder production. Also, fungal and mould proliferation can occur in fodder because of its high moisture content [Sneath and McIntosh 2003]. On the other hand, using green fodder with low dry matter for animal nutrition might be challenging [Gümüş and Bayir 2020]. A limited number of studies have focused on comparing the green fodder performance of different seed densities of barley grown in a hydroponic system, and not much data is available on their nutritive value. Therefore, this study aimed to compare the growth rate, yield, nutritive value, and digestibility of barley fodder, considering different seed densities during planting and different lengths of the growth period.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in a steel hydroponic chamber in the Center for Agriculture, Livestock and Food Research, Burdur Mehmet Akif Ersoy University (Southern Türkiye, 30°53'E, 36°53'N and 950 m above sea level) in 2021. The intensive hydroponic system was constructed by using a steel stand, size 2.80 m × 9 m × 7 m (H × L × W), equipped with seven shelves having a total capacity of 196 polyethylene trays (70 cm × 30 cm × 5 cm; 0.21 m²). Hydroponic conditions with a temperature of 18–19°C, relative

humidity of 60%, lighting time of 12 h using yellow colour lights, and irrigation time and frequency of 90 s every 2 h were applied during the research period. Before planting, production chambers, trays, irrigation systems, and essential instruments underwent sterilization using a 10% formaldehyde concentration. Every day, 50 ml of sodium hypochlorite was added to the irrigation system water to minimize the potential growth of mould. Tap water was used for irrigation.

The treatments differed in the density of the seed whilst planting and were designed as high-seed density treatments in which 1000 g of seed was applied to each tray (HSD: 4.761 kg m^{-2}) and low-seed density treatments in which 750 g of seed was applied to each tray (LSD: 3.571 kg m^{-2}). All experiments were carried out in 7 replicates. Fourteen trays ($2 \text{ groups} \times 7 \text{ subgroups}$) were used in the steel hydroponic chamber. Seeds were pre-soaked in water separately for 24 h to clean the seeds from wastes, straw, etc., and to accelerate the germination process. The trays were placed on the shelves of the hydroponic chamber and allowed to grow for 10 days. The impact of different plant growth periods (8th, 9th, and 10th day of germination) on the shoot height, root length, and fresh weight were examined in the study. To determine the growth rate, the shoot height and root length of six plants randomly selected from each tray were measured using a tape measure from day 8th until the harvest day (day 10th). From each tray, three samples of fodder (right corner, left corner, and middle of each tray) were weighed to measure the fresh weight (FW). Samples were collected from each tray from the highest to the lowest point. The sampling area was square-shaped with dimensions of $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$.

The collected samples were dried, grounded and analyzed after 4 days of collection. The feed samples were analyzed based on the Association of Official Analytical Chemists [AOAC 2005] methods: the content of dry matter (DM, method 934.01), ash (method 942.05), ether extract (EE, method 920.39) and nitrogen (method 954.01). Crude fibre (CF), neutral detergent fibre (NDF), and acid detergent fibre (ADF) contents were determined following the ANKOM (Ankom²⁰⁰ fibre analyzer, Ankom Technology Corp., Fairport, NY) methods [Van Soest et al. 1991]. Evaluation of the *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD) of fodders was carried out using the Daisy^{II} incubation (Daisy^{II} Incubator, ANKOM Technology, NY, US) method as an *in vitro* technique [Vogel et al. 1999].

The statistical analyses were conducted using the IBM SPSS program, version 21 [IBM 2021]. An independent-sample t-test was used to determine the effects of seed density on the growth rate, performance, nutritive value, and digestibility of fodder. Duncan's multiple comparisons were used to compare differences between groups, and differences are considered significant when $P < 0.05$.

RESULTS

As shown in Table 1, there was no significant difference in the shoot height and root length between the two groups at d 8 and 9 of harvesting. The shoot heights ($P = 0.02$) were significantly higher in the LSD treatment than those in the HSD treatment, but root length ($P = 0.03$) was significantly lower in the LSD treatment on the 10th day of harvesting. FW increased along with the postponement of harvest time. HSD treatment resulted in a significantly higher yield of FW compared to LSD fodder. As shown in Table 2, there were significant differences between groups in terms of the green fodder yield (GFyield; kg m^{-2} ; $P = 0.009$), dry matter yield (DMyield; kg m^{-2} ; $P = 0.001$), and crude protein yield

(CPyield; g m^{-2} ; $P = 0.001$). However, DM content ($P = 0.61$), dry matter losses (DMloss; $P = 0.69$) and crude protein losses (CPloss; $P = 0.30$) were not affected in the current study. As shown in Table 3, there were significant differences between both treatments of barley fodder in terms of their chemical composition. Significantly higher contents of EE ($P = 0.03$), CF ($P = 0.02$), and higher IVDMD coefficient ($P = 0.02$) but lower ADF ($P = 0.02$) were stated in LSD treatment. There was no significant difference in the content of ash ($P = 0.35$) or NDF ($P = 0.29$) between groups.

Table 1. The growth rate of barley green fodders of high- and low-seed density treatments depending on the time of harvesting after germination

Days	Shoot height (cm)			Root length (cm)			Fresh weight (kg/tray)		
	HSD	LSD	P value	HSD	LSD	P value	HSD	LSD	P value
8	5.38	5.54	0.60	1.70	1.40	0.06	4.98	4.10	0.002
9	7.46	7.68	0.51	2.01	1.97	0.78	5.50	4.46	0.001
10	9.76	10.5	0.02	2.24	2.03	0.03	5.94	4.92	0.009

HSD – high-density seed treatment, LSD – low-density seed treatment

Table 2. Performance of barley green fodders of high- and low-seed density treatments

Treatments	GFyield (kg m^{-2})	DM (%)	DMyield (kg m^{-2})	DMloss (%)	CP (%), DM basis	CPyield (g m^{-2}) DM basis	CPloss (%), DM basis
HSD	28.30	9.84	2.77	33.97	16.15	446.94	7.46
LSD	23.43	8.67	2.03	35.50	15.65	305.61	12.45
P value	0.009	0.61	0.001	0.69	0.52	0.001	0.30

GFyield – green fodder yield; DM – dry matter content; DMyield – dry matter yield; DMloss – dry matter loss; CP – crude protein content; CPyield – crude protein yield; CPloss – crude protein loss
HSD – high-density seed; LSD – low-density seed

Table 3. Nutritive value and *in vitro* dry matter digestibility of barley green fodders of high- and low-seed density treatments, DM basis

Treatments	EE (%)	Ash (%)	CF (%)	NDF (%)	ADF (%)	IVDMD (%)
HSD	2.64	3.00	18.15	56.02	26.17	80.64
LSD	2.96	3.22	20.67	54.10	24.39	83.03
P value	0.03	0.35	0.02	0.29	0.02	0.02

EE – ether extract; CF – crude fibre, ADF – acid detergent fibre, NDF – neutral detergent fibre, IVDMD – *in vitro* DM digestibility
HSD – high-seed density treatment, LSD – low-seed density treatment

DISCUSSION

Many factors, such as the type and ratio of seed [Afzalnia and Karimi 2020], harvest time [Akbağ et al. 2014], and fertilizing [Akman et al. 2021] can affect the shoot height and root length of fodder produced by a hydroponic system. Interestingly, in the current study, shoot height was higher in the LSD group than in the HSD group throughout the study. The current findings indicate that LSD exhibited a greater shoot height and shorter root length on days 8th, 9th, and 10th of germination compared to HSD (Tab. 1). The research conducted by [El-Morsy et al. 2013] demonstrated that increasing the density of seeds had a positive effect on the height of shoots and the length of roots. Emam [2016] stated that barley fodder's (Giza 127 variety) shoot height on day 7th of harvesting reached 10.10 cm, which was more significant than our findings. The root length ranged from 1.40 cm to 2.24 cm in the current study, which is aligned with the previous study's findings [Karaşahin 2016]. The author [Paudel et al. 2021] mentioned that the plant height of barley fodder was the highest with a seed rate of 6 kg m^{-2} and the lowest with a seed rate of 4 kg m^{-2} .

Hydroponic systems have offered an alternative to traditional agriculture by enabling year-round production of green fodder, regardless of the climate conditions [Naik et al. 2012, Afzalnia and Karimi 2020]. The higher FW biomass in HSD treatment was recorded at 4.98, 5.50 and 5.94 kg per tray on days 8th, 9th, and 10th of harvesting compared to LSD, respectively. El-Morsy et al. [2013] achieved 3.5 kg and 6.4 kg FW of barley fodder at seed rates of 5 kg m^{-2} and 7 kg m^{-2} , respectively. A previous study by Al-Karaki and Al-Hashimi [2012] showed that the FW of barley fodder ranged from 3.74 to 6.0 kg from one kg of barley seeds. In comparison, the average FW was reported to be 2.71 kg and 3.16 kg per tray on day 10 of harvesting at a planting amount of 450 g seed, equivalent to seed rates of 4.0 kg m^{-2} [Al-Momani and Al-Karaki 2011]. After 8 days of planting, Emam [2016] observed 9.74 kg FW of barley fodder (Giza 128) at a seed rate of 10 kg m^{-2} . It was also found that barley fodder had higher FW at seed rates of 10 kg m^{-2} (FW: 9.5 kg) than at seed rates of 5 kg m^{-2} (FW: 3.5 kg) on d 8 of harvesting [El-Morsy et al. 2013].

After 10 days of planting, HSD treatment showed higher GFyield ($P = 0.009$; 28.30 vs. 23.43 kg m^{-2} ; Tab. 2), DMyield ($P = 0.001$; 2.77 vs. 2.03 kg m^{-2} ; Tab. 2), DM content ($P = 0.61$; 9.84 vs. 8.67% ; Tab. 2) and crude protein yield ($P = 0.001$; 446.94 vs. 305.61 g m^{-2} ; Tab. 2) than LSD fodder. Lower dry matter loss ($P = 0.69$; 33.97 vs. 35.50% ; Tab. 2) in the HSD treatment compared to the LSD treatment was mainly due to higher DM content in HSD cultivars ($P = 0.61$; 9.84 vs. 8.67% ; Tab. 2). The findings line up with the results reported by Assefa et al. [2020] indicating that higher seed rates (42.94 kg m^{-2}) resulted in greater green fodder yield compared to medium (33.41 kg m^{-2}) or low seed rates (24.92 kg m^{-2}). Similar results were previously indicated by Paudel et al. [2021], who found that green fodder yield increased from 16.46 to 28.09 kg m^{-2} along with increasing seed density. The results of the current study indicated that a reduction in seed density from 4.761 to 3.571 kg m^{-2} led to a decline in DM content. The finding contradicts the results reported by El-Morsy et al. [2013], who observed that increasing seed density decreased DM content. In the current study, DM content decreased along with DM loss in the LSD treatment, where the reduction might be attributed to the lower conversion of seeds into fodder due to the slower germination rate of seeds.

The HSD treatment exhibited a greater CP content ($p = 0.52$; 16.15 vs. 15.65% ; Tab. 2) compared to the LSD treatment. Our outcomes were more significant than those

documented by Fazaeli et al. [2011], who found that the CP content of barley fodder ranged from 13.7% to 14.5%. Contrary to the current study, Saadi and Omar [2015] showed that CP was 19.8% in barley fodder. It is worth noting that the findings were inconsistent, possibly due to variations in the research conditions, seed type, seed quality, addition of liquid fertilizer, and harvesting time. Research conducted by Akbağ et al. [2014] reported that the effects of harvesting time on fodder CP with slightly higher crude protein content at day 13 (17.6%) than on day 7 (17.1%) but lower than at day 10 (18.2%). One possible reason for the higher protein content in the fodder might be young sprouts' more remarkable photosynthesis ability and their higher DM losses [Girma and Gebremariam, 2018]. The study conducted by El-Morsy et al. [2013] highlighted that observed improvement in enzyme activity during germination could probably be associated with an elevated concentration of CP in the fodder, resulting in probable changes in the amino acid profile. LSD treatment led to a higher EE ($P = 0.03$; 2.96 vs. 2.64%; Tab. 3) than HSD treatment. EE content increased when the seed rate decreased from 7.6 kg m^{-2} to 5.6 kg m^{-2} [Assefa et al. 2020]. The EE content of hydroponic fodder increases due to increased structural lipids and chlorophyll as the plant grows [Gebremedhin et al. 2015]. The LSD treatment showed a slightly higher ash content compared to the HSD treatment. Compared with the original barley seeds, both treatments had increased ash content. Researchers evaluating barley fodder also found similar results [Peer and Leeson 1985, El-Morsy et al. 2013]. The increase in ash content may be attributed to the enhanced absorption of minerals by the roots [Morgan et al. 1992]. According to Fazaeli et al. [2012], fodder has a notably higher iron, zinc, and calcium concentration than seeds.

LSD treatment had higher CF ($P = 0.02$; 20.67 vs. 18.15%; Tab. 3) and a higher IVDMD coefficient ($P = 0.02$; 83.03 vs. 80.64 %; Tab. 3) but lower NDF ($P = 0.29$; 54.10 vs. 56.02%; Tab. 3) and ADF contents ($P = 0.02$; 24.39 vs. 26.17%; Tab. 3) than HSD treatment. Emam [2016] found that the CF content of barley fodder ranged from 8.13% to 12.4% of DM, which is lower than our results. The mean content of NDF [Akbağ et al. 2014] in barley fodder ranged from 51.01% to 54.05%, similar to the current study's range (54.10–56.02% DM basis). In a previous study [Gümüş and Bayir 2020], we noted that hydroponic barley fodder had 20.89% ADF content, which is lower than current results. The increase in the percentage of NDF and ADF in the HSD treatment could be attributed to an increase in seed density. The ADF content of forage directly influences *in vitro* digestibility. Compared to the HSD treatment, LSD fodder had a higher digestibility rate due to the lower ADF content.

CONCLUSION

HSD treatment had a higher root length and yielded a higher fresh weight mass as compared to those in the LSD treatment. The HSD treatment exhibited increased yields of green fodder, dry matter, and crude protein compared to the LSD treatment. However, the LSD treatment showed a higher content of EE, ash, and CF with a lower NDF and ADF value. It affected the *in vitro* digestibility coefficient, which was significantly higher in the LSD treatment compared to the HSD treatment. Taking performance factors into account, the most efficient fodder seems to be barley green fodder sown at high seed density, but considering parameters regarding the nutritive value and feed digestibility such as NDF, ADF, and IVDMD, the more efficient fodder appears to be barley green fodder with

low sowing density. However, further research is needed to determine the optimal use of seed densities in hydroponic systems to produce green fodder.

REFERENCES

- Afzalnia S., Karimi A., 2020. Barley cultivars and seed rates effects on energy and water productivity of green fodder production under hydroponic condition. *Indian J. Agric. Res.* 54(6), 792–796. <https://doi.org/10.18805/IJArE.A-554>
- Akbağ H.I., Türkmen O.S., Baytekin H., Yurtman İ.Y., 2014. Effects of harvesting time on nutritional value of hydroponic barley production. *Turkish J. Agric. Nat. Sci.* 1, 1761–1765.
- Akman M., Güzel Ş., Gümüş H., 2021. Comparison of the plant heights and relative feed values of triticale and vetch mixtures produced by a hydroponic system. *Kocatepe Vet. J.* 14(1), 77–82. <https://doi.org/10.30607/kvj.860663>
- Al-Karaki G.N., Al-Hashimi M., 2012. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. *ISRN Agron.* 1–5. <https://doi.org/10.5402/2012/924672>
- Al-Momani N., Al-Karaki G.N., 2011. Evaluation of some barley cultivars for green fodder production and water use efficiency under hydroponic conditions. *Jordan J. Agric. Sci.* 7(3), 448–457.
- AOAC, 2005. Official method of Analysis. 18th ed. Association of Official Analytical Chemist., Gaithersburg, Maryland, USA: AOAC International
- Assefa G., Urge M., Animut G., Assefa G., 2020. Effect of variety and seed rate on hydroponic maize fodder biomass yield, chemical composition, and water use efficiency. *Biotechnol. Anim. Husb.* 36, 87–100. <https://doi.org/10.2298/BAH2001087A>
- El-Morsy A.T., Abul-Soud M., Emam M.S.A., 2013. Localized hydroponic green forage technology as a climate change adaptation under Egyptian conditions. *Res. J. Agric. Biol. Sci.* 9(6), 341–350.
- Emam M.S.A., 2016. The sprout production and water use efficiency of some barley cultivars under intensive hydroponic system. *Middle East J. Agric. Res.* 5(2), 161–171.
- Fazaeli H., Golmohammadi H.A., Shoayee A.A., Montajebi N., Mosharraf S., 2011. Performance of feedlot calves fed hydroponics fodder barley. *J. Agric. Sci. Technol.* 13(3), 367–375.
- Fazaeli H., Golmohammadi H.A., Tabatabayee S.N., Asghari-Tabrizi M., 2012. Productivity and nutritive value of barley green fodder yield in hydroponic system. *World Appl. Sci. J.* 16(4), 531–539.
- Gebremedhin W.K., Deasi B.G., Mayekar A.J., 2015. Nutritional evaluation of hydroponically grown barley fodder. *J. Agric. Eng. Food Technol.* 2(2), 86–89.
- Girma F., Gebremariam B., 2018. Review on hydroponic feed value to livestock production. *J. Sci. Innov. Res.* 7(4), 106–109.
- Godde C.M., Mason-D'Croz D., Mayberry D.E., Thornton P.K., Herrero M., 2021. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Glob. Food Sec.* 28, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>
- Gümüş H., Bayir A.M., 2020. Hasılatikte üretilen arpa ve yulaf yeşil hasılımının farklı günlerdeki besin madde değerleri [The nutrient values of barley and oat green fodder produced by hasılatik at different days]. *Mehmet Akif Ersoy Univ. J. Heal. Sci. Inst.* 8(2), 30–36. <https://doi.org/10.24998/maeusabed.725541>
- Hussain A., Iqbal K., Aziem S., Mahato P., Negi A.K., 2014. A review on the science of growing crops without soil (Soilless Culture) – A novel alternative for growing crops. *Int. J. Agric. Crop Sci.* 7(11), 833–842.
- IBM, 2021. IBM Corp. Released 2021. SPSS Statistics for, Windows, 28edt. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Karaşahin M., 2016. Farklı gübreleme uygulamalarının hidroponik mısır (*Zea mays* L. *indentata* S.) çimi üzerine etkileri [The Effects of different fertilization on hydroponic maize (*Zea mays* L. *indentata* S.)]. *Grass. Res. J. Biol. Sci.* 9(1), 29–32.

- Morgan J., Hunter R., O'Haire R., 1992. Limiting factors in hydroponic barley grass production. In: Proceedings of the 8th International Congress on Soilless Culture. Hunter's Rest, South Africa, 241–261.
- Mukherjee S., Mishra A., Trenberth K.E., 2018. Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Curr. Clim. Chang. Reports* 4, 145–163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>
- Naik P.K., Dhuri R.B., Swain B.K., Singh N.P., 2012. Nutrient changes with the growth of hydroponics fodder maize. *Indian J. Anim. Nutr.* 29(2), 161–163.
- Paudel S., Raj B.B., Bhushal K., Hari G.S., Raj P.Y., Prasad A.D., Hamal P., 2021. Study on effects of different seed rates in hydroponic fodder production and its composition in Chitwani. *Int. J. Vet. Sci. Agric. Res.* 3(1), 1–7.
- Peer D.J., Leeson S., 1985. Feeding value of hydroponically sprouted barley for poultry and pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 13(3–4), 183–190. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(85\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0377-8401(85)90021-5)
- Pereira L.S., Cordery I., Iacovides I., 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agric. Water Manag.* 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Saidi A.M.A., Omar J., 2015. The biological and economical feasibility of feeding barley green fodder to lactating Awassi ewes. *Open J. Anim. Sci.* 5(9), 99–105. <https://doi.org/10.4236/ojas.2015.52012>
- Sarıççek B.Z., Yıldırım B., Hanoğlu H., 2018. The comparison of nutrient composition and relative feed value of barley grain, barley green food and silage grown with grounded system of barley grass grown with hydroponic system. *Black Sea J. Agric.* 1, 102–109.
- Shit N., 2019. Hydroponic fodder production: An alternative technology for sustainable livestock production in India. *Explor. Anim. Med. Res.* 9(2), 108–119.
- Sneath R., McIntosh F., 2003. Review of hydroponic fodder production for beef cattle. Department of Primary Industries: Queensland Australia 84. McKeehen, p. 54.
- Van Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A., 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74(10), 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vogel K., Pedersen J., Masterson S., Toy J., 1999. Evaluation of a filter bag system for NDF, ADF, and IVDMD forage analysis. *Crop Sci.* 39(1), 276–279. <https://doi.org/10.2135/crop-sci1999.0011183X003900010042x>

The source of funding: This study was supported within the scope of Regional Development-Oriented Mission, Differentiation and Specialization Program of Burdur Mehmet Akif Ersoy University via project no. 2017K12-41003.

Received: 1.07.2024

Accepted: 3.12.2024

Published: 13.01.2025



Department of Economics and Agribusiness, Faculty of Agrobioengineering,
University of Life Sciences in Lublin, 20-950 Lublin, Poland
Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), Postboks 115, NO-1431 Ås, Norway

* e-mail: anna.nowak@up.lublin.pl

ANNA NOWAK^{}, PATRYCJA MAGDALENA KLIMEK^{}

Comparative assessment of the agricultural production potential and its efficient use in Poland and Norway

Ocena porównawcza potencjału produkcyjnego rolnictwa oraz efektywności jego wykorzystania w Polsce i Norwegii

Abstract. The aim of the paper was a comparative assessment of the agricultural sector of Poland and Norway, in terms of its economic significance, production potential and changes in efficient utilisation, considering the specificity of agricultural policy. The source material was data retrieved from the FAOSTAT database, Statistics Norway (SSB), reports by the Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), and Statistics Poland (GUS). Studies have shown that due to natural conditions, Poland has a much greater potential for agricultural output, and in particular crop output. However, Norwegian agriculture features higher land and labour productivity. Despite the high growth rate of the analysed ratios in Polish agriculture, the difference in their level between these countries remains more than threefold and more than twofold in favour of Norway, respectively for labour and land productivity. Due to its large production potential of agriculture, Poland also has much greater agricultural export opportunities than Norway.

Keywords: agriculture, Norway, Poland, productivity, production potential

INTRODUCTION

An efficient agriculture sector underpins national food security and an important position as an exporter of food to foreign markets [Krasiuk 2018]. The comparison of agriculture in Poland and Norway is interesting since they are countries with different devel-

Citation: Nowak A., Klimek P.M., 2024. Comparative assessment of the agricultural production potential and its efficient use in Poland and Norway. *Agron. Sci.* 79(3), 73–84. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5355>

opment paths, potential and specificity of agricultural production. Norway is the northernmost European country, which – due to natural conditions – has a small utilised agricultural area. It is a country that is not a member of the European Union (EU) and it experienced explicit structural transformations, also affecting agriculture [Forbord et al. 2014]. These transformations were partly due to the fact that Norwegian agriculture is one of the most strongly state-regulated agricultural sectors in Europe [Neuenfeldt et al. 2021]. The OECD [2023] reports a very high level of support for agriculture in Norway. Between 2020 and 2022, it accounted for 83% of its total output in national agriculture. This percentage is considerably above the average of 25% indicated by the OECD. In addition, more than half of the income of agricultural holdings is associated with market price support and subsidies [Neuenfeldt et al. 2021]. Adverse climatic and topographical conditions affect the country's specific structure of farms.

One of the most essential impulses to transformation in the agriculture of Poland was the political transformation, and recently European integration including the implementation of Common Agricultural Policy (CAP) instruments in Polish agriculture. The transformation of Polish agriculture has been the subject of numerous scientific studies [Bański 2018, 2020, Filipiak and Wicki 2022], as has the impact of Poland's accession to the EU on this sector of the economy [Potori et al. 2014, Kapusta 2021]. Integration with the EU gave rise to new conditions for agricultural development in Poland. It provided Polish farmers with access to funds that allowed them to improve the profitability of and conditions for production but also implement structural transformations [Czyżewski et al. 2020]. Among many CAP mechanisms, direct payments to support the agricultural producers' income, play a special role. The funds allocated for Polish agriculture under agricultural policy derive from domestic public revenues and funds transferred to Poland from the European Union budget. In 2021, the aggregate support for the agricultural sector under CAP was PLN 24,669,000,000, accounting for 18.3% of global agricultural output and 24.6% of agricultural commodity production [GUS 2023b, Nowak and Budzyńska 2023].

Although Norway is a non-EU country, it remains an essential business partner for Poland. In 2022, exports of Polish agri-food products to Norway amounted to EUR 296 million, while their imports from Norway reached EUR 1442 million [MRiRW 2023]. Given these relationships, the aim of the paper was a comparative assessment of the agricultural sector of Poland and Norway, in terms of its economic significance, production potential and changes in efficient utilisation, considering the specificity of agricultural policy.

MATERIAL AND METHODS

For purposes of the study, we formulated the following research questions: 1) How significant is agriculture for the economies of both countries? 2) What is the production potential of agriculture in Poland and Norway? 3) What are the production and economic outputs of the sector under review?

To answer these questions, we used several ratios calculated mostly for the period from 2010 to 2022. We evaluated the production potential based on the utilised agricultural area (UAA), UAA per inhabitant, and the number and percentage of agricultural workers. The efficiency with which the production potential is utilised was measured based on the value of agricultural output and land and labour productivity ratios. Land productivity was calculated as agricultural output per utilised agricultural area, and labour

productivity as the value of agricultural output per number of workers employed in this sector and the relationship between gross value added and the number of workers employed in the agricultural sector.

To ensure the comparability of figures, the source data concerning economic categories derived from FAOSTAT. We also leveraged data from Statistics Norway (SSB), reports by the Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), and Statistics Poland (GUS).

RESULTS AND DISCUSSION

Norway has a small utilised agricultural area compared to other European countries, with only 1,121,900 ha in 2022, corresponding to about 3.5% of the country's total area [SSB 2024]. Due to its location and considerable latitudinal extent, Norway's climatic conditions adversely affect the productive capacity of its agriculture. Only about 30% of the UAA is suitable for growing cereals (barley and oats), but in practice up to 90% is used for animal feed crops [Ministry of Agriculture and Food 2024]. Poland has one of the highest UAAs in the European Union (4th place), which accounts for almost 60% of the country's area (Table 1). In addition, it has twice as much UAA per capita as Norway.

Farms in Poland and Norway predominantly have private owners. In 2020, their numbers in Poland and Norway were, respectively, 1,317,400 [GUS 2022] and 38,713 [SSB 2024]. The area of the farms varies greatly. Polish agriculture is characterised by high fragmentation. Accession of Poland to the EU boosted structural transformations, which was also reflected in the changing number and structure of farms [Nowak and Budzyńska 2024]. The latest agricultural census showed that the number of agricultural holdings dropped from 1.8 to 1.3 million, and the farm's average surface area increased from 9.85 ha to 11.35 ha [GUS 2022]. The structure of Norwegian farms according to surface area, the distribution of different groups by area is more even, with the highest percentage of farms between 20 and 49.9 ha in 2020. In 2020, it amounted to about 31.4%. The average size of a Norwegian farm in 2022 was 26.1 ha, i.e. 17.9% more than in 2012 [SSB 2024]. Both countries also differ in terms of the effect of agriculture on gross value added. In Poland, this share is nearly twice as high as in Norway.

The turnover of agricultural land and production methods in Norway are strictly controlled by several legislative acts. We should mention, for example, the obligation to cultivate land classified as agricultural land or the right of first refusal by family members. As regards the production method, the quota system for cow and goat milk production, which in the EU, including Poland, was abolished on 1 April 2015, is still in force. Differences between the two countries also relate to the length of the growing season. In Norway, due to the short growing season of 100 to 240 days [Skaalsveen et al. 2022, Svendgård-Stokke 2022], crop production opportunities are limited. There is no sugar or maize cultivation, and cereal yields are lower than in many European countries. The limited possibility of crop production, combined with the terrain and climate, directly affects animal husbandry [Neuenfeldt et al. 2021]. Predominant are agricultural holdings specialising in sheep farming (13,377), cattle farming (11,700) and pig farming (1,853) [SSB 2024]. As regards the sowing structure, however, barley is the most important, followed by oats and wheat. In addition, natural and climatic conditions are essential determinants of agricultural specialisation in the regions. According to data from the Institute of Soil Science and Plant Cultivation (IUNG), from 2001 to 2020, the average growing season in

Poland was 236 days long [Żyłowska and Kozyra 2022]. In the 2022 sowing structure, 65.6% were cereals (10,977,000 ha), and 12.7% were industrial crops, of which 9.8% were rapeseed and agrimony. In addition, crop production accounted for 53% of the total agricultural output. In the value structure of livestock production, cow's milk production and poultry had the largest share. Pigs for slaughter constitute about 8% of the gross agricultural output, with a downward trend observed from 2019 [GUS 2023a].

Table 1. Selected characteristics of agriculture in Poland and Norway from 2010 to 2022

Indicator	2010	2015	2019	2020	2021	2022
Norway						
Total area of the country in thousands of hectares	31,465	32,375	32,378	32,377	32,378	32,378
Utilised agricultural land (UAA) in thousands of hectares	1,097.2	1,111.4	1,118.9	1,120.5	1,121.4	1,121.9
UAA % of the total area of the country	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5
UAA per capita	0.23	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21
Average grain yield (dt ha ⁻¹)	34.4	48.0	47.1	46.8	41.8	47.3
Milk yield (kg per cow)	7,221	7,706	7,920	8,034	8,166	8,016
Average farm size (ha)	21.6	23.5	25.2	25.5	25.9	26.0
Share of agriculture in GVA (%)	1.5	1.5	1.8	1.8	1.6	1.7
Poland						
Area of the country in thousands of hectares	31,268	31,268	31,270.5	31,270.5	31,270.6	31,272
Utilised agricultural land (UAA) in thousands of hectares	18,931.1	18,682.8	18,759.8	18,741.5	18,719.2	18,696.5
UAA % of the total area of the country	60.5	59.8	60.0	59.9	59.9	59.8
UAA per capita	0.37	0.37	0.38	0.38	0.38	0.38
Average grain yield (dt ha ⁻¹)	35.8	37.3	36.7	47.8	46.5	49.5
Milk yield (kg per cow)	4,487	5,395	5,803	5,946	6,136	6,647
Average farm size (ha)	9.9	10.5	10.9	11.3	11.2	11.3
Share of agriculture in GVA (%)	3.3	2.7	2.7	2.9	2.6	3.2

Source: Authors' elaboration based on data from Statistics Poland [GUS 2023b], World Bank [2024], NIBIO [2024], and SSB [2024]

In Poland, the adoption of EU CAP has created the conditions for increasing agricultural output and, above all, farmers' income. CAP instruments affect both the supply and the demand in Polish agriculture. Fund transfers from the EU budget, including direct subsidies, influence the supply. The development possibilities for Polish agriculture and the whole food economy in the post-accession period largely depend on the dynamic growth of agri-food exports, which affects the demand [Poczta 2020].

Changes in Polish agriculture during EU membership also included employment in the sector. Structural transformations in the economy and progress in agriculture have

contributed to decreasing the number of the sector's workers, simultaneously increasing socio-economic development. Wicki [2012] underlines that, on the one hand, high labour input determines the development potential of agriculture, while on the other hand, it reduces the dynamics of modernisation processes in that sector. In 2004, Polish agriculture employed 2.28 million workers on a full-time basis. By 2021, the figure declined to 1.4 million, meaning a decrease of 37.4% [Nowak and Budzyńska 2023]. In 2021, Norwegian agriculture employed 65,350 people. The percentage working in this sector was 8.4% and 2.3% in Poland and Norway, respectively (Tab. 2).

Table 2. Labour input in the agriculture of Poland and Norway from 2010 to 2021

Years	Employment level (in thousands of workers)		Percentage of agricultural workers	
	Norway	Poland	Norway	Poland
2010	63.69	2018.49	2.5	13.1
2011	60.02	2008.07	2.4	12.9
2012	57.50	1960.23	2.2	12.6
2013	57.26	1866.98	2.2	12.0
2014	58.92	1819.48	2.2	11.5
2015	52.96	1849.35	2.0	11.5
2016	54.95	1707.71	2.1	10.6
2017	54.41	1672.20	2.1	10.2
2018	56.49	1577.72	2.1	9.6
2019	55.30	1498.49	2.0	9.2
2020	57.09	1567.97	2.1	9.6
2021	65.35	1390.53	2.3	8.4
Dynamics (2010 = 100) Change in p.p.	102.61	68.89	-0.2	-4.7

Source: Own elaboration based on FAOSTAT database [2024]

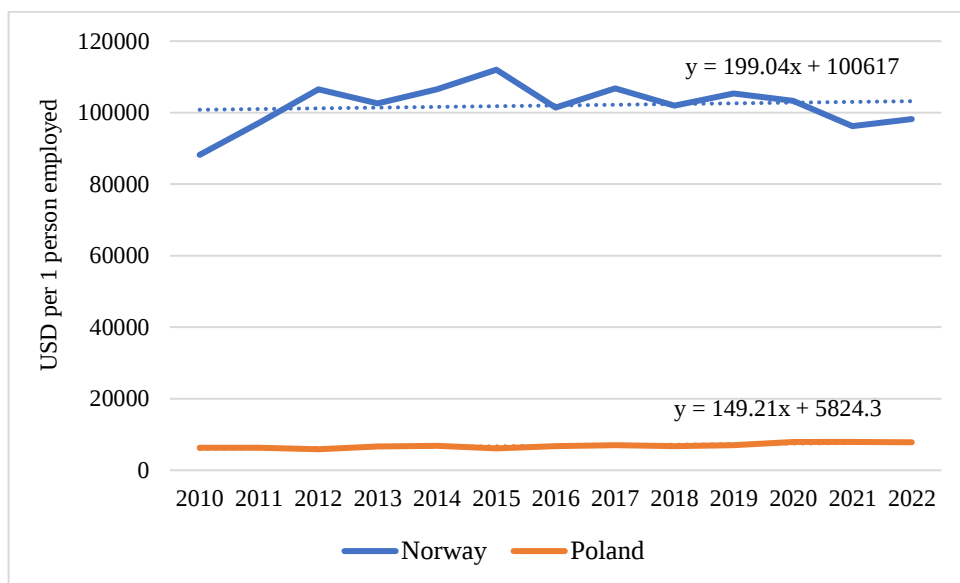
Individual countries have distinctive characteristics (including natural conditions) that stimulate or inhibit the development of specific areas of agriculture, thus shaping the level and structure of production. This also stems from the level of socio-economic development, the structural characteristics of agriculture, agricultural policies and the market situation [Nowak et al. 2019]. The underlying measure for evaluating the level of development in agriculture is the productivity of production factors expressing the economic relationship between outputs and inputs. This relationship is most often reflected by land and labour productivity ratios [Ściubeł 2021]. The values of these ratios for Poland and Norway, along with a change in the value of agricultural production between 2010 and 2021, are summarised in Table 3 (at constant 2014–2016 prices), and Figure 1 shows the labour productivity index measured by gross value added per worker in agriculture (at constant 2015 prices). The land productivity index was calculated as agricultural output per utilised agricultural area, and labour productivity as the value of agricultural output

per worker employed in this sector. Norway's agricultural output between 2010 and 2021 showed low change dynamics (105.2%). In Poland, the value of production increased by 19.4% during the period under review. It should also be noted that the value of agricultural production in Poland in 2021 was more than six times higher than in Norway. However, land and labour productivity ratios show a much higher growth dynamics in Poland. In contrast, the value of the two partial productivity ratios was more than three times and more than two times higher in Norway for labour and land productivity, respectively. These differences are explained, among other things, by Poland's unfavourable agrarian structure and the predominance of crop output over livestock output, which determines lower production intensity.

Table 3. Agricultural production value and labour productivity in the agriculture of Poland and Norway from 2010 to 2021 (constant 2014–2016 prices in thousands of dollars)

Years	Agricultural output value (1000 USD)		Labour productivity (USD per 1 AWU)		Land productivity (USD per 1 ha UAA)	
	Norway	Poland	Norway	Poland	Norway	Poland
2010	3669846	20787397	57620.4	10298.5	3648.3	1438.7
2011	3531193	21030709	58833.6	10473.1	3534.7	1423.0
2012	3582040	21514864	62296.3	10975.7	3608.0	1480.8
2013	3587342	21429905	62650.1	11478.4	3634.1	1487.2
2014	3718296	23043318	63107.5	12664.8	3768.2	1597.6
2015	3773568	22001047	71253.2	11896.6	3827.0	1530.9
2016	3832664	22915502	69748.2	13418.8	3896.3	1594.2
2017	3850896	24170734	70775.5	14454.5	3909.1	1671.3
2018	3679136	23017810	65129.0	14589.3	3730.3	1586.1
2019	3864570	23117339	69883.7	15427.1	3926.4	1591.8
2020	3846416	25196303	67374.6	16069.4	3901.2	1710.2
2021	3861221	24830138	59085.2	17856.6	3920.0	1712.5
Dynamics (2010=100)	105.2	119.4	102.5	173.4	107.4	119.0
Geometric mean	3731255.0	22712321.2	64640.0	13104.4	3772.9	1565.8

Source: Authors' elaboration based on FAOSTAT database [2024]



Source: Authors' elaboration based on FAOSTAT database [2024]

Figure 1. Agricultural gross value added per worker (USD per 1 person, constant 2015 prices)

An analysis of the labour productivity index in the agricultural sector, calculated as the ratio of gross value added to the number of workers, reveals an even greater gap between Norway and Poland in this respect. In 2022, one worker employed in Polish agriculture generated gross value added of USD 7794.8 per capita per year, compared to USD 98,178.7 per capita in Norway. In contrast, from 2010 to 2022, a higher growth rate for the indicator under review was recorded in Poland (124.5%) than in Norway (111.3%). Considering the level of support to agriculture in Poland and Norway, it appears that a very high level of farming subsidies contributes to the high level of labour productivity in Norwegian agriculture. Agricultural input subsidies, as a form of social protection, are often considered to be an important means of improving agricultural productivity. However, their effectiveness and efficiency remain contentious with respect to productivity, economic and consumer welfare measures, and food and nutrition security. Kumbhakar et al. [2023] in their studies confirmed a positive effect of agricultural subsidies in Norway on productivity and profitability. Simultaneously, the OECD report [OECD 2023] shows that much of Norway's productivity growth in recent years came from labour-saving initiatives, but did little to reduce environmental pressures. By contrast, in Poland, the low level of labour productivity is a consequence of, among other things, structural problems, including over-employment in agriculture. Modernisation investments play an important role in the process of improving productivity and profitability in Polish agriculture, as demonstrated, among other authors, by Kusza et al. [2020].

Integration and international trade agreements foster development and innovation, drive new technologies, strengthen competition and provide access to new markets. Nor-

way, together with Iceland, Liechtenstein and Switzerland, negotiates free trade agreements through the European Free Trade Association (EFTA). Since 1994, it has been a member of the European Economic Area (EEA), which has led to undertaking significant liberalisation measures and the country's integration into Europe. The EU Common Agricultural Policy (CAP) and Common Fisheries Policy (CFP) are not part of the EEA Agreement, and, therefore, the free movement of goods within this framework does not apply to all products [OECD 2021]. In addition, to secure a selling base for domestic output, the Norwegian Agricultural Agency [2024] applies a system of tariffs and quotas on imports. The most severe restrictions apply to commodities such as beef and dairy products successfully supplied to the market by domestic producers. In 2020, the highest percentage of imported goods were fruit and vegetables. The total volume of imports of these products exceeds 950,000 t, which accounts for almost 31% of the total volume of imports of agri-food products. Cereals and cereal products were another group with an output of 714,600 t, accounting for 23%. The lowest import volumes were recorded for dairy products and eggs (1%), meat and meat products (1%), and tobacco products (0.2%). In 2020, total imports of agri-food products oscillated at nearly 3.1 million tonnes [Rekdal 2021].

Upon accession to the EU, Poland was incorporated into the Single European Market (SEM), ensuring free movement of goods, persons, capital and provision of services between the member states of the Community. This has significantly improved the foreign trade performance of agri-food products. Poland has also adopted all the instruments and rules of the Common Commercial Policy (CCP) applicable to trade with third countries. Among the commercial policy instruments affecting trade, tariff instruments play a particular role, notably import duties and tariff quotas, which effectively protect the EU market from an influx of cheaper products from other countries [Tereszczuk 2016]. Given its considerable production potential of agriculture, Poland has much more agricultural export opportunities than Norway. In 2021, the value of exports reached 28.4 billion dollars and was 42 times higher than in Norway. It is also worth noting the upward trend in Poland's exports of this product group, which increased by 240.9% between 2010 and 2021. In Norway, the agricultural export value dynamics reached 155.9% over the same period (Table 4).

In 2022, 74% of Polish agri-food products were exported to the EU, mainly to Germany, the Netherlands, and France. The major products exported to the EU were poultry meat, dairy products and beef. The main exports from Poland to non-EU countries were dairy products, poultry meat, and wheat [KOWR 2023]. According to the report titled *The outside world to Norwegian agriculture and food industry 2022* [Norwegian Agriculture Agency 2023], dairy products and meat constituted the highest percentage of Norwegian exports of agri-food products in 2022. The target buyers were neighbouring countries such as Sweden (nearly 20% by value), Denmark (11.5%) and the UK (7.5%), and outside Europe – the USA (7.2%) and Japan (3.3%). When analysing trade between Poland and Norway, it can be concluded that fish, seafood, and seafood preparations form the basis of trade in agricultural products. According to the Norwegian Seafood Council, Poland is the second biggest export market for fish and seafood from Norway. In 2023, fish exports to Poland amounted to 275,250 t, compared with 266,305 t (2022) and 284,652 t (2021) in the preceding years, respectively. The largest share of exported fish consists of salmon, herring and cod. In 2022, agri-food imports from Norway accounted for 4.5% of the total imports of this product group in Poland, according to data provided by the Ministry of Agriculture and Rural Development [MRiRW 2023]. It is worth highlighting that the agri-

food trade balance in Poland was positive in 2022, reaching EUR 15,548,000,000. In contrast, the balance of trade in this product group with Norway was negative for Norway (EUR –1,146,000,000).

Table 4. Agricultural products exports in Poland and Norway from 2010 to 2021

Years	Value of exports (thousands of USD)	
	Norway	Poland
2010	445,058	11,801,664
2011	422,479	10,979,399
2012	481,011	14,888,938
2013	464,447	17,726,411
2014	538,660	20,291,980
2015	562,483	21,971,434
2016	622,334	22,328,280
2017	622,523	21,870,113
2018	643,137	21,208,570
2019	677,297	22,272,954
2020	721,829	27,907,495
2021	694,059	28,427,707
Dynamics (2010=100)	155.9	240.9

Source: Authors' elaboration based on FAOSTAT database [2024]

CONCLUSIONS

This survey was aimed at a comparative assessment of agriculture in Poland and Norway to the extent of their specificity, production potential and efficient utilisation. The sector has been shown to play a much greater role in Poland's economy, as testified, among other things, by its share of over 8% in total employment. This is due to natural conditions and the production potential of agriculture, but also to its structural characteristics. Polish agriculture has considerably more land and labour inputs and twice as big cropland per capita than Norwegian agriculture. In contrast, economic, organisational and structural conditions contribute to the much higher farming efficiency of Norwegian agriculture. Its specificity stemming from natural conditions determines the predominance of livestock production over crop production. On the contrary, in Poland, for many years crop production has constituted a higher percentage of the total agricultural output.

The production performance and structure of agriculture are due not only to the production resources at hand and natural conditions but also to the structural conditions of agriculture and the regulations stemming from agricultural policy. The conditions for the development of agriculture differ between Poland and Norway. This is because Poland is a member state of the European Union and Polish agriculture is governed by the CAP. By

contrast, Norway's agricultural sector remains one of the most strongly supported in Europe. Both agricultural policy and the structure of agriculture (e.g. size distribution of farms, ownership form etc.) are strictly regulated and controlled by the state, through appropriate legal and economic instruments. This is to protect the domestic market and farmers' interests and ensure food security. This determines the direction of production and the opportunities for exports and imports of agricultural products. While agricultural exports do not play a significant role in Norway, they have increased in importance in Poland, particularly after it acceded to the EU. Considering further opportunities to increase the efficiency of agriculture, real chances exist for further development of exports of this product group from Poland. Furthermore, it can be argued that strong interventionism in Norwegian agriculture provides crucial support for agricultural incomes, but also imposes some constraints on spontaneous structural transformation processes. Similar opinions exist regarding certain CAP instruments, and, in particular, direct payments, which restrict the rate of change in the agrarian structure.

REFERENCES

- Bański J., 2018. Phases to the transformation of agriculture in Central Europe – Selected processes and their results. *Agric. Econ.* – Czech. 64, 546–553. <https://doi.org/10.17221/86/2018-AGRICECON>
- Bański J., 2020. Selected aspects of the transformation of agriculture in the CEECs following the fall of the Eastern Bloc. *Studia Obszarów Wiejskich* 56, 5–31. <https://doi.org/10.7163/SOW.56.1>
- Czyżewski A., Kata R., Matuszczak A., 2020. Wpływ wydatków budżetowych na zmiany strukturalne i dochody w rolnictwie w warunkach funkcjonowania w Polsce instrumentów WPR [Impact of budget expenditures on structural changes and income in agriculture under the conditions of CAP instruments operated in Poland]. *Ekonomista* 6, 781–811 [in Polish]. <https://doi.org/10.52335/dvqp.te199>
- FAOSTAT database, 2024. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/MK> [access: 10.01.2024].
- Filipiak T., Wicki L., 2022. Is the structure of Polish agriculture changing? A comparison based on the results of recent general agricultural censuses. *Annals PAAAE* 24(1), 37–53. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7103>
- Forbord M., Bjørkhaug H., Burton R.J.F., 2014. Drivers of change in Norwegian agricultural land control and the emergence of rental farming. *J. Rural Stud.* 33, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2013.10.009>
- GUS, 2022. Powszechny spis rolny 2020. Charakterystyka gospodarstw rolnych w 2020 r. [The agricultural census 2020. Characteristics of agricultural farms in 2020], Warsaw [in Polish].
- GUS, 2023a. Rolnictwo w 2022 r. [Agriculture in 2022]. Warszawa [in Polish].
- GUS, 2023b. Statistical Yearbook of Agriculture 2022, Warsaw.
- Kapusta F., 2021. Fifteen years of Polish agriculture in the European Union. *Probl. Agric. Econ.* 4(369), 5–24. <https://doi.org/10.30858/zer/142839>
- KOWR, 2023. Wyniki polskiego handlu zagranicznego towarami rolno-spożywczymi za cały 2022 r. – rekordowy wzrost wartości polskiego eksportu [Results of Polish foreign trade in agri-food goods for the entire year 2022 – record increase in the value of Polish exports]. Biuro Analiz i Strategii, Warszawa [in Polish].
- Kraciuk J., 2018. Bezpieczeństwo żywnościowe Polski na tle wybranych krajów Europy Wschodniej [Poland's food security compared to selected Eastern European countries]. *Zesz. Nauk. SGGW, Ekon. Organ. Gospod. Żywn.* 121, 41–53 [in Polish]. <https://doi.org/10.22630/EIOGZ.2018.121.3>

- Kumbhakar S.C., Li M., Lien G., 2023. Do subsidies matter in productivity and profitability changes?. *Econ. Modell.* 123, 106264. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2023.106264>
- Kusz D., Zając S., Dziekan R., 2020. Regional diversification of investment outlays and labour profitability in agriculture in Poland. *Annals PAAAE* 22(4), 116–126. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5686>
- Ministry of Agriculture and Food, 2024. <https://www.regjeringen.no/en/topics/food-fisheries-and-agriculture/landbrukseiendommer/innsikt/jordvern/soil-conservation/id2009556/> [access: 21.01.2024].
- MRiRW, 2023. Polski handel zagraniczny artykułami rolno-spożywczymi w 2022 roku [Polish foreign trade in agri-food products in 2022]. Departament Rynków Rolnych i Transformacji Energetycznej Obszarów Wiejskich, Warszawa [in Polish].
- Neuenfeldt S., Gocht A., Heckelei T., Mittenzwei K., Ciaian P., 2021. Using aggregated farm location information to predict the regional structural change of farm specialisation, size and exit/entry in Norway agriculture. *Agriculture* 11, 643. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070643>
- NIBIO, 2024. Account results in agriculture and forestry 2022. Oslo. <https://hdl.handle.net/11250/3120578> [access: 20.05.2024].
- Norwegian Agricultural Agency, 2024. <https://www.landbruksdirektoratet.no> [access: 10.01.2024].
- Nowak A., Budzyńska A., 2023. Impact of the Common Agricultural Policy on the development of the Polish agricultural sector. In: E. Bukalska, T. Kijek, B.S. Sergi (ed.) *Modeling economic growth in contemporary Poland (Entrepreneurship and Global Economic Growth)*, Emerald Publishing Limited, Leeds. 175–188. <https://doi.org/10.1108/978-1-83753-654-220231013>
- Nowak A., Kijek T., Krukowski A., 2019. Polskie rolnictwo wobec wyzwań współczesności. T. 1. Wymiar ekonomiczno-strukturalny [Polish agriculture in the face of modern challenges. Vol. 1. Economic and structural dimension]. Wydawnictwo UP w Lublinie, Lublin [in Polish].
- OECD, 2021. Policies for the future of farming and food in Norway, OECD agriculture and food policy reviews. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/20b14991-en>
- OECD, 2023. Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2023: Adapting Agriculture to Climate Change. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/b14de474-en>.
- Pocza W., 2020. Przemiany w rolnictwie polskim w okresie transformacji ustrojowej i akcesji Polski do UE [Changes in Polish agriculture in the period of political transformation and Poland's accession to the EU]. *Więś i Rolnictwo* 2(187), 57–77. <https://doi.org/10.7366/wir022020/03>
- Potori N., Chmieliński P., Fieldsend A.F. (ed.), 2014. Structural changes in Polish and Hungarian agriculture since EU accession: lessons learned and implications for the design of future agricultural policies. Research Institute of Agricultural Economics, Budapest.
- Rekdal K.E., 2021. Import av matvarer 2014–2020. Virke Statistikk og rapporter [Imports of food products 2014–2020. Virke statistics and reports], <https://www.virke.no/analyse/statistikk-rapporter/import-av-matvarer/> [in Norwegian, access: 21.01.2024].
- Skaalsveen K., Gillund F., Aandahl T.R., 2022. Jordhelse i arktisk grøntproduksjon. Forprosjekt 2021–2022 [Soil health in Arctic vegetable production. Pilot project 2021–2022]. NIBIO Rapport 8(86) [in Norwegian].
- SSB, 2024. <https://www.ssb.no/en> [access: 12.01.2024].
- Svendgård-Stokke S., 2022. Vekstsesongens lengde [Length of the growing season]. NIBIO 20.05.2022 [in Norwegian].
- Ściubeł A., 2021. Productivity of production factors in Polish agriculture and in the selected European Union countries with regard to the Common Agricultural Policy payments. *Probl.f Agric. Econ.* 1, 46–58. <https://doi.org/10.30858/zer/134229>
- Tereszczuk M., 2016. Instrumenty polityki handlowej Unii Europejskiej a polski handel zagraniczny produktami rolno-spożywczymi [European Union trade policy instruments and Polish foreign trade in agri-food products]. *Pr. Nauk. UE Wrocł., Ekon.* 449, 627–638 [in Polish].
- Wicki L., 2012. Convergence of labour productivity in agriculture in the European Union. *Econ. Sci. Rur. Develop.* 27, 279–284.

World Bank, 2024. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS?locations=NO> [access: 24.05.2024].

Żyłowska K., Kozyra J., 2022. Zmiany warunków agroklimatycznych w Polsce [Changes in agro-climatic conditions in Poland]. St. Rap. IUNG-PIB Puławy 67(21), 9–23. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2022.67.01>

Research funding sources: This paper was financed from the grant of the Ministry of Science and Higher Education awarded to the Department of Economics and Agribusiness, grant number RKA.SUBB.WRA.19.022.RiO.2024.

Received: 7.03.2024
Accepted: 8.11.0.2024
Publication: 13.01.2025



Department of Herbology and Plant Cultivation Techniques,
University of Life Sciences in Lublin, Akademicka 13, 20-950 Lublin, Poland
e-mail: andrzej.wozniak@up.lublin.pl

ANDRZEJ WOŹNIAK 

Effect of reduced tillage practices on yield, total protein content and weed infestation of winter barley

Wpływ uproszczonych metod uprawy roli na plon ziarna,
zawartość białka ogólnego i zachwaszczenie jęczmienia ozimego

Abstract. A multi-year field experiment aimed to evaluate grain yield, yield structure elements, total protein content, and weed infestation indices of winter barley cultivated in a conventional tillage system (CT) and two no-tillage variants: (i) reduced without glyphosate (RT) and (ii) reduced with glyphosate (RT + G). Common peas served as the previous crop in each study year on all plots. Shallow ploughing and pre-sowing ploughing were applied in the CT system after previous crop harvest. In turn, cultivating instead of shallow ploughing and a cultivation unit (a cultivator + a string roller) instead of pre-sowing ploughing were used on RT plots. Finally, shallow ploughing was replaced by glyphosate treatment, whereas pre-sowing ploughing – by a cultivation unit in the RT + G system. A higher grain yield was determined on CT plots than RT and RT+G plots, i.e., by 18% and 23.3%, respectively. The grain yield was also observed to differ significantly between study years. Spike number and 1000 grain weight were differentiated by tillage practices, whereas plant number after emergence by study years. There were no differences in the protein content of winter barley grain as affected by the variants of tillage practices and study years. In contrast, the weeds produced a higher air-dry weight on RT plots than on CT and RT + G plots. Weed bio-diversity determined at the tillering stage was greater on RT than CT plots, whereas that assessed at the milk maturity stage on CT than RT + G plots. The weed diversity index was determined by study year in both terms of assessment.

Keywords: grain yield, weed flora species, number of weeds, air-dry weight of weeds, Shannon-Wiener's diversity index

Citation: Woźniak A., 2024. Effect of reduced tillage practices on yield, total protein content and weed infestation of winter barley. *Agron. Sci.* 79(3), 85–97. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5368>

INTRODUCTION

Soil cultivation aims to provide crops with best conditions for producing high grain yield. Such conditions can be achieved in the conventional tillage system by means of a moldboard plow and also in the no-till system and in the direct sowing system. However, tillage cannot be focused only on boosting grain yields but also on protecting the soil from fertility loss [Rühlemann and Schmidtke 2015, King and Blesh 2017]. Conventional tillage coupled with insufficient natural fertilization and removal of post-harvest residues from the field increase losses of organic carbon and nutrients from the soil and adversely affect the soil environment [Zhang et al. 2015, Maillard et al. 2016, Dębska et al. 2020]. According to Woźniak and Rachoń [2022], the quality of soil as well as its fertility improvement are strongly affected by crop rotation, post-harvest residues left on the soil surface, and soil tillage system [Roldán et al. 2005, Pranagal and Woźniak 2021]. Practices recommended in order to preserve soil fertility include those involving its enrichment with post-harvest residues (straw, leaves, and stems) and no-tillage cultivation [Blair et al. 2006, Głab and Kulig 2008, Farooq et al. 2011, Brennan et al. 2014, Ruisi et al. 2014]. Nevertheless, views on the conventional ploughing and no-till systems are inexplicit, whereas results achieved in these systems depend on soil and climate conditions and on the level of agroengineering implemented [Zikeli et al. 2013, Jaskulska et al. 2018]. No-tillage system performed with a cultivator or chisel proves better in semi-arid regions, as it affects the preservation of post-harvest residues on the soil surface, retains soil moisture, but also improves soil bioactivity [Deike et al. 2008, Farooq et al. 2011]. As reported by De Vita et al. [2007], a strong correlation can be noticed between barley grain yield, tillage practice, and the sum of precipitation in the growing season. The no-tillage system performs better on the areas with low sums of precipitation, whereas the conventional tillage system – on those with moderately high sums of precipitation [Ruisi et al. 2014]. According to Josa et al. [2010], this is due to the fact that tillage performed with a plow leads to excessive soil loosening and aeration, as well as increased evaporation of water from this soil, compared to the cultivation performed with other tools acting on soil surface. Excessive loosening of the soil contributes to the rapid mineralization of organic matter and, as a result, to the loss of humus in the soil [Micucci and Taboada 2006].

Soil tillage systems determine the condition and structure of weed infestation on arable fields [Gruber and Claupein 2009, Tracy and Davis 2009, Swanton et al. 2015, Woźniak and Rachoń 2022]. In addition, they influence the species composition of weeds and their distribution in the crop stand. As Woźniak [2020] reports, cereals grown in the no-tillage system are quantitatively dominated by weeds of the upper and middle levels, which mature before the cereals are harvested and are dispersed by the wind. As Hernández Plaza et al. [2015] claim, the tillage system also affects weed seed distribution in the soil. The no-till system promotes species with fine seeds of high fertility, capable of fast germination from soil surface. In turn, crop stands in the conventional tillage system are predominated by large-seeded weed species able to germinate from deeper soil layers. Consequently, the no-till system promotes the growth of grassy weeds and those dispersed by wind, i.e., by anemochory [Feledyn-Szewczyk et al. 2020, MacLaren et al. 2020]. This has also been confirmed in a study by Melander et al. [2008], in which the greatest density of *Apera spica-venti* occurred on plots where winter wheat was sown after itself in the no-till system. At the same time, the results of this study indicate that the abundance of this species was affected to a greater extent by crop rotation than by tillage system. Also in the

study conducted by Woźniak and Soroka [2022] was the weed community in the winter wheat monoculture formed mainly by grassy weeds, including especially *Apera spica-venti* and *Avena fatua*. According to MacLaren et al. [2020], weeds enter into reactions with and are regulated by the agroecosystem.

Based on the cited literature, research hypotheses were formulated which assumed that: (i) higher grain yield of winter barley can be achieved in the conventional than reduced tillage system, and (ii) diversified tillage practices cause various effects on the formation of weed community in winter barley stands. The aim of the present study was, therefore, to assess the grain yield of winter barley in different variants of tillage practices and their impact on the condition and structure of weed infestation of the crop stand.

MATERIALS AND METHODS

Experiment localization and scheme

A field experiment performed in 2007 evaluated various modifications of soil tillage. The experiment was established at the Experimental Farm Uhrusk, belonging to the University of Life Sciences in Lublin and located in the central-eastern Poland (51°18'N, 23°36'E). The results presented in the manuscript were collected in the years 2020–2022 during an experiment established in completely randomized blocks (25 m × 6 m) design in three replications. The study addressed winter barley of 'Zenek' cultivar that was grown in the conventional tillage system (CT) and two reduced tillage variants: (i) without glyphosate (RT) and (ii) with glyphosate (RT + G). The previous crop used on all plots in each study year was common peas. Shallow ploughing (up to 10–12 cm) and pre-sowing ploughing (up to 20 cm) were performed after previous crop harvest on CT plots in the first week of September. In turn, cultivating instead of shallow ploughing and a cultivation unit (a cultivator + a string roller) instead of pre-sowing ploughing were used on RT plots. In the RT + G system, glyphosate (4 dm³ ha⁻¹) was applied instead of shallow ploughing and a cultivation unit (a cultivator + a string roller) instead of pre-sowing ploughing. Winter barley was sown on all plots at a sowing density of 280 seeds per m² in the third week of September. Fertilization prior to sowing included: 20 kg N ha⁻¹, 30 kg P ha⁻¹, and 85 kg K ha⁻¹. In the spring, nitrogen fertilizers were applied in two terms: (1) at the tillering stage – 60 kg N ha⁻¹ (23–24 in the BBCH scale) [Meier 2018]; and (2) at the shooting stage – 30 kg N ha⁻¹ (33–34 BBCH).

Winter barley crop was protected against weeds by harrowing at the tillering stage and against fungal diseases by the use of fungicides containing: (a) flusilazole and carbendazim (1 dm³ ha⁻¹) at the tillering stage, and (b) propiconazole and fenpropidin (1 dm³ ha⁻¹) at the shooting stage.

Soil and weather conditions

The experiment was established on Rendzic Phaeozem [FAO 2015], with the following mineral fraction distribution: sand – 52%, silt – 25%, and clay – 23%, and with a slightly alkaline pH value (pH_{KCl} = 7.1). Total nitrogen, available phosphorus (P), potassium (K), magnesium (Mg), and organic C contents in the 0.25 m soil layer were 0.80–0.88 g kg⁻¹, 110–120 mg kg⁻¹, 190–210 mg kg⁻¹, 68–70 mg kg⁻¹, and 11.2–12.6 g kg⁻¹, respectively. This soil was classified as a very good rye complex.

At the study site, the growing season begins at the turn of March and April (i.e., spans for 210–220 days), and the average daily air temperature recorded in this period exceeds +5°C. The annual sum of precipitation ranged from 515 (in 2021) to 585 mm (in 2022). In the spring and summer months (April–September), the sum of precipitation ranged from 346 mm (2020) to 433 mm (2022), whereas in the autumn and winter months (October–March), from 146 mm (2022) to 175 mm (2020) – Tab. 1. The highest air temperatures were recorded in June, July, and August, whereas the lowest ones in December, January, and February (Tab. 2).

Table 1. Monthly sums of precipitation (mm)

Years	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
2020	24.5	22.0	29.8	34.6	56.8	64.8	73.2	65.2	51.7	34.0	34.1	30.6	521.3
2021	35.0	65.5	5.5	39.5	76.5	37.0	33.5	96.0	74.5	13.5	16.0	22.5	515.0
2022	42.0	27.0	1.0	59.0	50.0	70.0	92.0	40.0	122.0	29.0	30.0	23.0	585.0
1995–2019	32.0	31.7	37.7	44.0	72.3	73.2	89.8	74.7	56.6	48.6	36.6	25.6	622.9

Table 2. Average monthly air temperature (°C)

Years	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Average
2020	1.2	2.8	4.3	8.2	11.2	18.9	18.9	19.8	15.1	10.7	5.2	1.3	9.8
2021	0.0	–3.4	–0.5	12.8	15.9	18.9	19.3	20.8	15.5	10.0	3.1	0.1	9.4
2022	–0.5	1.0	3.0	7.0	12.5	19.0	20.0	19.5	14.0	10.5	5.5	1.0	9.4
1995–2019	0.2	0.1	2.3	9.3	13.2	18.9	19.4	20.0	14.9	10.4	4.6	0.8	9.5

Production traits and statistical analysis

The experiment aimed to determine the following production traits: (1) winter barley grain yield and its components, i.e.: plant number after emergence per m² (13–14 BBCH), spike number per 1 m² before harvest, grain weight per spike, 1000 grain weight; (2) total protein content of the grain; (3) weed number per 1 m² in two terms: (i) at the tillering stage (23–24 BBCH) and (ii) at the milk maturity stage (73–74 BBCH) of barley; (4) air-dry weight of weeds at the 73–74 BBCH stage; (5) Shannon-Wiener diversity index (H'); and (6) weed flora species composition at stages 23–24 BBCH and 73–74 BBCH.

Grain was harvested with a plot harvester, at 13% moisture content. Plant number after emergence and spike number per m² were counted per the area of 1 m² of each plot. Grain weight per spike was determined based on 30 spikes randomly collected from each plot, whereas the 1000 grain weight was established by counting 2 × 500 grains and weighing them. Protein content of the grain was determined with the Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) method.

The weed species composition, weed density, and air-dry weight of weeds were evaluated twice on the 1 m² area randomly selected from each plot. The assessment of the air-dry weight of weeds consisted in collecting weeds from the specified areas, removing their

root system, and keeping their aerial parts in a well-ventilated room until a constant weight had been reached.

The Shannon-Wiener's diversity index (H') was computed using the following formula: $H' = -\sum \left(\frac{n_i}{N}\right) \log \left(\frac{n_i}{N}\right)$ where: n_i – is number of individuals of each species and N – is total number of individuals of all species.

The analysis of variance (ANOVA) was used to process experimental results, whereas the Tukey's HSD test (at $P < 0.05$) was applied to determine the significance of differences between mean values for tillage practices (TP), study years (Y), and their interactions (TP $\times$ Y).

RESULTS

Grain yields and its components, and protein content of the grain

Both tillage practices and study years were observed to differentiate winter barley grain yield. The grain yields were higher in the CT system than in RT and RT+G systems, by 18% and 23.3%, respectively, and also in 2021 compared to the other study years (by 12.9–23.9%) – Tab. 3). Barley plant number per m^2 after the emergence stage (13–14 BBCH) was affected only by the study year, being higher in 2021 than in the other study years. In turn, the number of spikes per m^2 was higher on CT plots than on RT (by 13.4%) and RT+G (by 40.1%) plots. A significantly higher number of spikes per m^2 was additionally determined on RT than RT + G plots. Barley grain weight per spike was similar in all variants of tillage practices and study years, whereas the 1000 grain weight depended only on the tillage practice variant and was higher on CT than on RT and RT + G plots. The evaluation of variance components indicates that grain yield was similarly affected by tillage practices and study years. In contrast, the spike number per m^2 and 1000 grain weight were found to be determined only by tillage practices, whereas plant number after emergence – only by study years (Tab. 4).

The protein content of winter barley grain was similar in all variants of tillage practices and study years (Tab. 5).

Weed infestation indices

A significantly higher weed number per m^2 was determined on RT than on CT and RT + G plots at the two analyzed stages of winter barley development, i.e. tillering stage (23–24 BBCH) and milk maturity stage (73–74 BBCH) – Tab. 6. A similar observation was made for the air-dry weight of weeds (Tab. 7), which was higher by 40.1% and 28.6% on RT plots than on CT and RT + G plots, respectively. Also study years differentiated the values of this parameter because weeds produced the greatest air-dry weight in 2020, a smaller one in 2022, and the smallest in 2021.

Tillage practices were also observed to influence weed biodiversity (Tab. 8). The Shannon-Wiener's index (H') computed at the winter barley tillering stage (23–24 BBCH) was significantly higher in the RT than CT system. Weed biodiversity was also affected by study years, i.e., a higher value of the H' index was noted in 2020 than in 2021 and 2022, as well as by TP $\times$ Y interactions, i.e., significantly greater weed biodiversity

Table 3. Grain yield of winter barley and its components

Years (Y)	Tillage practices (TP)			Mean
	CT	RT	RT + G	
grain yield (t ha ⁻¹)				
2020	6.51	5.89	4.29	5.56
2021	6.69	5.31	6.84	6.28
2022	5.89	4.96	4.36	5.07
Mean	6.36	5.39	5.16	–
HSD _{0.05} for TP = 0.39; Y = 0.39; TP × Y = ns				
plant number per 1 m ² (13–14 BBCH)				
2020	242	244	234	240
2021	255	264	271	263
2022	247	240	238	242
Mean	248	249	248	–
HSD _{0.05} for TP = ns; Y = 16; TP × Y = ns				
spike number per 1 m ²				
2020	501	497	373	457
2021	559	460	358	459
2022	491	411	378	426
Mean	517	456	369	–
HSD _{0.05} for TP = 51; Y = ns; TP × Y = ns				
grain weight per spike (g)				
2020	1.31	1.19	1.15	1.22
2021	1.20	1.16	1.23	1.19
2022	1.20	1.21	1.16	1.19
Mean	1.24	1.19	1.18	-
HSD _{0.05} for TP = ns; Y = ns; TP × Y = ns				
1000 grain weight (g)				
2020	49.3	47.0	45.2	47.2
2021	48.3	48.1	44.8	47.1
2022	49.0	47.2	43.8	46.7
Mean	48.9	47.5	44.6	–
HSD _{0.05} for TP = 0.7; Y = ns; TS × Y = ns				

CT – conventional tillage; RT – reduced tillage; RT + G – reduced tillage + glyphosate; ns – not significant

Table 4. Effect of tillage practices (TP) and study year (Y) on the yield and its components

Specification	Value	TP	Y	TP × Y
Grain yield	<i>F</i>	35.4	32.1	10.3
	<i>p</i>	**	**	ns
Plant number per 1 m ² (23–24 BBCH)	<i>F</i>	0.04	8.9	1.1
	<i>p</i>	Ns	*	ns
Spike number per 1 m ²	<i>F</i>	8.7	12.7	5.4
	<i>p</i>	*	ns	ns
Grain weight per spike (g)	<i>F</i>	1.7	0.4	1.7
	<i>p</i>	Ns	ns	ns
1000 grain weight (g)	<i>F</i>	122.1	1.3	3.9
	<i>p</i>	**	ns	ns

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; ns – not significant

Table 5. Protein content of winter barley grain in g·kg⁻¹

Years (Y)	Tillage practices (TP)			Mean
	CT	RT	RT + G	
2020	105.0	105.0	104.0	104.7
2021	110.0	106.0	104.0	106.7
2022	108.0	108.0	107.0	107.7
Mean	107.7	106.3	105.0	–
HSD _{0.05} for TP = ns; Y = ns; TP × Y = ns				

CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, RT + G – reduced tillage + glyphosate, ns – not significant

Table 6. Number of weeds per 1 m² in winter barley crop

Years (Y)	Tillage practices (TP)			Mean
	CT	RT	RT + G	
23–24 BBCH				
2020	9.8	26.6	16.4	17.6
2021	15.7	29.0	18.5	21.1
2022	9.2	23.0	19.0	17.1
Mean	11.6	26.2	17.9	–
HSD _{0.05} for TP = 5.6; Y = ns; TP × Y = ns				
73–74 BBCH				
2020	25.1	39.8	36.8	33.9
2021	27.5	32.6	28.4	29.5
2022	21.3	40.1	24.2	28.5
Mean	24.6	37.5	29.8	–
HSD _{0.05} for TP = 7.3; Y = ns; TP × Y = ns				

CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, RT + G – reduced tillage + glyphosate, ns – not significant

Table 7. Air-dry weight of weeds in g m⁻² of winter barley crop (73–74 BBCH)

	Tillage practices (TP)			Mean
	CT	RT	RT + G	
2020	50.0	74.5	54.3	59.6
2021	44.0	58.5	48.4	50.3
2022	47.4	65.1	51.2	54.6
Mean	47.1	66.0	51.3	–
HSD _{0.05} for TP = 3.7; Y = 3.7; TP × Y = 5.8				

CT – conventional tillage; RT – reduced tillage; RT + G – reduced tillage + glyphosate, ns – not significant

Table 8. The Shannon-Wiener's diversity index (H')

Years (Y)	Tillage practices (TP)			Mean
	CT	RT	RT+G	
23–24 BBCH				
2020	0.65	0.73	0.63	0.67
2021	0.60	0.62	0.65	0.62
2022	0.56	0.63	0.66	0.62
Mean	0.60	0.66	0.64	–
HSD _{0.05} for TP = 0.04; Y = 0.04; TP × Y = 0.07				
73–74 BBCH				
2020	0.77	0.70	0.75	0.74
2021	0.72	0.71	0.69	0.71
2022	0.66	0.69	0.58	0.64
Mean	0.72	0.70	0.67	-
HSD _{0.05} for TP = 0.04; Y = 0.04; TP × Y = ns				

CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, RT + G – reduced tillage + glyphosate, ns – not significant

occurred in 2020 than in 2022 on CT plots, and also in 2020 compared to 2021 and 2022 on RT plots. When winter barley was assessed at the milk maturity stage (73–74 BBCH), greater weed biodiversity was noted in the CT than RT+G system, in 2020 than in 2022, and also in 2021 compared to 2022.

The species composition of weed flora in winter barley stands was influenced by both tillage practices and study years (Table 9). In 2020, at the tillering stage of barley (23–24 BBCH), the weed community observed on all plots consisted of 5–6 short-term species, with *Anthemis arvensis*, *Papaver rhoeas*, and *Galium aparine* prevailing in the CT system; and *Apera spica-venti*, *G. aparine*, *Avena fatua*, and *P. rhoeas* predominating in the RT and RT + G systems. In 2021, the weed community was formed by 4–5 species, with *Veronica persica*, *G. aparine* and *A. spica-venti* prevailing in the CT system; and *A. spica-venti*, *V. persica*, and *A. arvensis* in the RT and RT+G systems. Also 4–5 species formed the weed community in 2020, with *A. spica-venti*, *A. fatua*, and *P. rhoeas* predominating on both CT, RT, and RT + G plots.

Table 9. Species composition of weeds at the tillering stage of winter barley (23–24 BBCH)

Species composition	Tillage practices		
	CT	RT	RT + G
2020 year			
<i>Anthemis arvensis</i> L.	3.5	3.0	–
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv.	1.2	8.9	6.6
<i>Avena fatua</i> L.	–	4.3	3.0
<i>Consolida regalis</i> Gray	0.8	–	–
<i>Galium aparine</i> L.	1.8	4.8	3.2
<i>Lamium purpureum</i> L.	–	2.8	0.8
<i>Papaver rhoeas</i> L.	2.5	2.8	2.8
2021 year			
<i>Anthemis arvensis</i> L.	3.4	5.0	4.5
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv.	3.8	12.0	5.2
<i>Consolida regalis</i> Gray	–	3.4	0.8
<i>Galium aparine</i> L.	4.0	–	4.0
<i>Lamium purpureum</i> L.	–	1.8	–
<i>Veronica persica</i> Poir.	4.5	6.8	4.0
2022 year			
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv.	4.2	8.9	6.8
<i>Avena fatua</i> L.	2.0	5.8	4.3
<i>Galium aparine</i> L.	–	2.0	2.2
<i>Papaver rhoeas</i> L.	1.5	4.5	3.5
<i>Veronica persica</i> Poir.	1.5	1.8	2.2

CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, RT + G – reduced tillage + glyphosate

When evaluated at the milk maturity stage of winter barley (73–74 BBCH), the weed community formed in 2020 included 7 species, with *A. spica-venti*, *P. rhoeas*, and *Fallopia convolvulus* predominating in the CT system; *P. rhoeas*, *A. spica-venti*, and *A. fatua* in the RT system as well as *A. fatua*, *A. spica-venti*, and *Consolida regalis* in the RT + G system (Tab. 10). Weeds identified on CT, RT, and RT + G plots in 2021 belonged to 5–7 species, with the most abundant ones including: *P. rhoeas* and *A. spica-venti* on CT plots; *A. spica-venti*, *F. convolvulus*, and *Sonchus asper* on RT plots; as well as *A. spica-venti*, *G. aparine*, and *A. fatua* on RT + G plots. In 2022, the weed community was formed by 4 to 6 species, including mainly: *A. spica-venti*, *G. aparine*, and *P. rhoeas* on CT plots; *A. spica-venti*, *G. aparine*, and *A. fatua* on RT plots; as well as *A. spica-venti*, *A. fatua*, *P. rhoeas*, and *G. aparine* on RT + G plots.

Table 10. Species composition of weeds at the milk maturity stage of winter barley (73–74 BBCH)

Species composition	Tillage practices		
	CT	RT	RT + G
2020 year			
<i>Anthemis arvensis</i> L.	3.2	4.8	4.0
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv	6.8	12.2	10.0
<i>Avena fatua</i> L.	1.2	5.8	10.5
<i>Consolida regalis</i> Gray	–	1.2	6.3
<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A. Löve	3.4	–	2.2
<i>Galium aparine</i> L.	4.3	1.8	2.2
<i>Papaver rhoeas</i> L.	5.4	12.8	–
<i>Polygonum lapathifolium</i> L.	0.8	–	1.6
<i>Sinapis arvensis</i> L.	–	1.2	–
2021 year			
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv	7.8	12.0	6.8
<i>Avena fatua</i> L.	2.2	4.2	6.2
<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A. Löve	2.8	6.6	–
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	0.2	1.8	–
<i>Galium aparine</i> L.	2.8	3.2	6.6
<i>Papaver rhoeas</i> L.	8.9	–	4.5
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill.	2.8	4.8	4.3
2022 year			
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv	6.2	16.9	8.9
<i>Avena fatua</i> L.	3.0	5.8	4.2
<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A. Löve	1.5	4.9	–
<i>Galium aparine</i> L.	5.4	6.5	4.4
<i>Papaver rhoeas</i> L.	5.2	3.2	6.7
<i>Polygonum lapathifolium</i> L.	–	2.8	–

CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, RT + G – reduced tillage + glyphosate

DISCUSSION

Crop productivity is a resultant of the synergistic effect of habitat factors and agricultural practices, including crop rotation, fertilization, soil tillage, and plant protection. The agricultural practice has proved that the choice of the soil tillage method depends on the quality and usability of soil and hydrothermal conditions. High grain yields may be promoted by conventional tillage (CT) performed using a moldboard plow with multiple

cultivating measures or extremely reduced no-tillage (NT) [De Vita et al. 2007, Deike et al. 2008]. Previous studies have shown that in semi-arid areas and on dry and airy soils incapable of water storage, definitely better production effects are obtained in a ploughless tillage system, e.g. no-tillage (NT) or reduced tillage (RT), and in an area with moderate rainfall and soils of average moisture – in the conventional tillage system (CT) [De Vita et al. 2007, Głąb and Kulig 2008, Farooq et al. 2011, Ruisi et al. 2014]. In the present research conducted on moderately moist soils and annual precipitation totals of nearly 600 mm, significantly higher yields of winter barley grain were obtained in conventional tillage (CT) than in both variants of reduced tillage (RT and RT + G). In this experiment, barley grain yield depended to a similar extent on the tillage practices (TP) and the study years (Y).

The soil tillage method affects also the composition of weed community in the crop stand [Hernández Plaza et al. 2015, MacLaren et al. 2020]. As claimed by many authors [Gruber and Claupein 2009, Tørresen and Skuteruda 2002, Feledyn-Szewczyk et al. 2020], the NT system increases the reservoir of diaspores in the topsoil, which ultimately leads to the infestation of successive crops by weeds. Nevertheless, the glyphosate used in this system effectively eliminates weeds present on the stubble, which affects the weed infestation of the successive crop. In the conventional plough system, weed seeds are moved into deeper soil layers, only a small part of which germinates and potentially infests crops [Riemens et al. 2007, Santin-Montanyá et al. 2016]. Woźniak and Soroka [2022] showed that small seeds of weeds belonging to the upper layer of the stand (*A. spica-venti*) mature before cereal crop harvest and can be dispersed by wind over long distances. In the ploughless cultivation system, they can represent a serious source of weed infestation. Tillage practices also affect weed biodiversity [Naeem et al. 2021]. This has been proved in a study by Woźniak and Rachon [2022], in which greater biodiversity was found for the weed community in the reduced tillage system (RT) than in the conventional (CT) and no-till (NT) systems. In the present study, the biodiversity of weeds was evaluated in two terms: at the tillering stage and before harvest of winter barley. In the first term, greater weed biodiversity was observed on RT plots, whereas before barley harvest – on CT plots. Woźniak and Soroka [2015] demonstrated the biodiversity of weed communities in cereal stands to be affected by plant succession in the crop rotation. The weed community was characterized by greater biodiversity in the crop rotation with root and legume plants, than in the cereal monoculture.

CONCLUSIONS

The grain yield of winter barley was similarly affected by tillage practices and study years. Higher grain yields were achieved in the conventional tillage system (CT) than in the reduced tillage (RT) and reduced tillage with glyphosate (RT + G). Significant differences in the grain yield were also found between study years. In addition, tillage practices differentiated spike number and 1000 grain weight, whereas study years caused differences in plant number after emergence. In contrast, the protein content of winter barley grain was similar in all variants of tillage practices and study years. A higher number and air-dry weight of weeds were determined on plots with reduced tillage (RT) than on those with conventional tillage (CT) and reduced tillage with glyphosate (RT + G). At the tillering stage of winter barley, greater weed biodiversity was noted in the RT than CT system, whereas at the milk maturity stage – in the CT system compared to the RT + G system. In both terms of infestation assessment, weed biodiversity was also affected by study years.

REFERENCES

- Blair N., Faulkner R.D., Till A.R., Poulton P.R., 2006. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part I: Broadbalk experiment. *Soil Till. Res.* 91(1–2), 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.002>
- Brennan J., Hackett R., McCabe T., Grant J., Fortune R.A., Forristal P.D., 2014. The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate. *Eur. J. Agron.* 54, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.009>
- De Vita P., Di Paolo E., Fecondo G., Di Fonzo N., Pisante M., 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil Till. Res.* 92, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.012>
- Deike S., Pallutt B., Melander B., Strassmeyer J., Christen O., 2008. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long term field experiments in Germany and Denmark. *Eur. J. Agron.* 29, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.001>
- Dębska B., Jaskulska I., Jaskulski D., 2020. Method of tillage with the factor determining the quality of organic matter. *Agronomy* 10(9), 1250. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10091250>
- FAO, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, No. 106. FAO, Rome. <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf> [access: 27.03.2023].
- Farooq M., Flower K.C., Jabran K., Wahid A., Siddique K.H.M., 2011. Crop yield and weed management in rainfed conservation agriculture. *Soil Till. Res.* 117, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.001>
- Feledyn-Szewczyk B., Smagacz J., Kwiatkowski C.K., Harasim E., Woźniak A., 2020. Weed flora and soil seed bank composition as affected by tillage system in three-year crop rotation. *Agriculture* 10(5), 186. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050186>
- Głąb T., Kulig B., 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil Till. Res.* 99(2), 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.004>
- Gruber S., Claupein W., 2009. Effect of tillage intensity on weed infestation in organic farming. *Soil Till. Res.* 105(1), 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.001>
- Hernández Plaza E., Navarrete L., González-Andújar J.L., 2015. Intensity of soil disturbance shapes response trait diversity of weed communities: The long-term effects of different tillage systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 207, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.031>
- Jaskulska I., Gałęzewski L., Piekarczyk M., Jaskulski D., 2018. Strip-till technology – a method for uniformity in the emergence and plant growth of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) in different environmental conditions of Northern Poland. *Ital. J. Agron.* 13, 194–199. <https://doi.org/10.4081/ija.2018.981>
- Josa R., Ginovart M., Solé A., 2010. Effects of two tillage techniques on soil macroporosity in sub-humid environment. *Int. Agrophys.* 24, 139–147.
- King A.E., Blesh J., 2017. Crop rotations for increased soil carbon: Perennially as a guiding principle. *Ecol. Appl.* 28, 249–261. <https://doi.org/10.1002/eap.1648>
- MacLaren C., Storkey J., Menegat A., Metcalfe H., Dehnen-Schmutz K., 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 40, 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6>
- Maillard É., Angers D.A., Chantigny M., Lafond J., Pageau D., Rochette P., Lévesque G., Leclerc M.L., Parent L.É., 2016. Greater accumulation of soil organic carbon after liquid dairy manure application under cereal-forage rotation than cereal monoculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 233, 171–178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.011>
- Meier U. (ed.), 2018. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph. Open Agrar Repository, Quedlinburg. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>
- Melander B., Holst N., Jensen P.K., Hansen E.M., Olesen J.E., 2008. *Apera spica-venti* population dynamics and impact on crop yield as affected by tillage, crop rotation, location and herbicide programmes. *Weed Res.* 48, 48–57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00597.x>

- Micucci F.G., Taboada M.A., 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soil in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.004>
- Naeem M., Hussain M., Farooq M., Farooq S., 2021. Weed flora composition of different barley-based cropping systems under conventional and conservation tillage practices. *Phytoparasitica* 49, 751–769. <https://doi.org/10.1007/s12600-021-00900-4>
- Pranagal J., Woźniak A., 2021. 30 years of wheat monoculture and reduced tillage and physical condition of Rendzic Phaeozem. *Agric. Water Manag.* 243, 106408. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106408>
- Riemens M.M., van der Weide R.Y., Bleeker P.O., Lotz, L.A.P., 2007. Effect of stale seedbed preparations and subsequent weed control in lettuce (cv. Iceboll) on weed densities. *Weed Res.* 47(2), 149–156. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00554.x>
- Roldán A., Salinas-García J.R., Alguacil M.M., Caravaca F., 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl. Soil Ecol.* 30, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.01.004>
- Ruisi P., Giambalvo D., Saia S., Di Miceli G., Frenda A.S., Plaia A., Amato G., 2014. Conservation tillage in a semiarid Mediterranean environment: results of 20 years of research. *Ital. J. Agron.* 9, 560. <http://dx.doi.org/10.4081/ija.2014.560>
- Santín-Montanyá M.I., Martín-Lammerding D., Zambranab E., Tenorio J.L., 2016. Management of weed emergence and weed seed bank in response to different tillage, cropping systems and selected soil properties. *Soil Till. Res.* 161, 38–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.03.007>
- Swanton C.J., Nkoa R., Blackshaw R.E., 2015. Experimental methods for crop-weed competition studies. *Weed Sci.* 63, 2–11. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00062.1>
- Tørresen K.S., Skuterud R., 2002. Plant protection in spring cereal production with reduced tillage. IV. Changes in the weed flora and weed seedbank. *Crop Prot.* 21, 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(01\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(01)00081-3)
- Tracy B.F., Davis A.S., 2009. Weed biomass and species composition as affected by an integrated crop-livestock system. *Crop Sci.* 49(4), 1523–1530. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.08.0488>
- Woźniak A., Rachoń L., 2022. Spring barley response to tillage systems and crop residues. *Agron. Sci.* 77(1), 27–42. <https://doi.org/10.24326/as.2022.1.3>
- Woźniak A., Soroka M., 2022. Weed flora in crop rotation and winter wheat monoculture. *Span. J. Agric. Res.* 20(2), e0301. <https://doi.org/10.5424/sjar/2022202-18984>
- Woźniak A., Soroka M., 2015. Structure of weed communities occurring in crop rotation and monoculture of cereals. *Int. J. Plant Prod.* 9(3), 487–506. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2015.2227>
- Zikeli S., Gruber S., Teufel C.F., Hartung K., Claupein W., 2013. Effects of reduced tillage on crop yield, plant available nutrients and soil organic matter in a 12-year long-term trial under organic management. *Sustainability* 5(9), 3876–3894. <https://doi.org/10.3390/su5093876>

The source of funding. This research was supported by the Ministry of Education and Science of Poland as the part of statutory activities of Department of Herbology and Plant Cultivation Techniques, University of Life Sciences in Lublin.

Received: 5.04.2024

Accepted: 14.11.2024

Publication: 13.01.2025



Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy Radzików,
Oddział w Jadwisinie, Zakład Agronomii Ziemniaka, ul. Szaniawskiego 15, 05-140 Jadwisin, Polska
e-mail: c.trawczynski@ihar.edu.pl

CEZARY TRAWCZYŃSKI 

Ocena stabilności plonowania ziemniaka w uprawie ekologicznej

Assessment of potato yield stability in an organic cultivation

Abstrakt. Celem badań przeprowadzonych w latach 2021–2023 w sześciu lokalizacjach (Jadwisin, Krzyżewo, Lućmierz, Osiny, Tarnów, Węgrzce) w warunkach certyfikowanych ekologicznych pól doświadczalnych na dziesięciu odmianach jadalnych ziemniaka (bardzo wczesne: Pogoria, Surmia, Tonacja, wczesne: Arizona, Lilly, średnio wczesne: Connect, Irmina, Mariola, Red Lady, Soraya) była ocena stabilności plonu bulw i struktury wybranych odmian ziemniaka. Po zbiorze końcowym oceniono plon bulw oraz jego strukturę (udział bulw małych o średnicy poniżej 35 mm, bulw średnich o średnicy od 36 mm do 60 mm i bulw dużych o średnicy powyżej 60 mm). Wyniki opracowano na podstawie analizy wariancji z wykorzystaniem modelu AMMI, oceniając istotność zróżnicowania badanych czynników oraz ich udział w zmienności całkowitej. Następnie określono stopień szerokiej adaptacji odmian w stosunku do zróżnicowanych warunków środowiska na podstawie trzech miar (miara nadrzędności plonowania – P_i , miara niezawodności przewagi plonowania – R_i , miara stabilności Kanga – YS_i). W badaniach wykazano istotne zróżnicowanie w stosunku do analizowanych czynników: środowiska (E), odmian (G) i współdziałania ($E \times G$). Wykazano największy udział w zmienności czynnika środowiskowego na plon i jego strukturę. Najwyższy stopień szerokiej adaptacji (miary P_i i R_i) w stosunku do plonu bulw wykazały odmiany Arizona i Connect.

Słowa kluczowe: lokalizacja, odmiany ziemniaka, plon bulw, struktura, zmienność

WSTĘP

Ziemniak jest rośliną, która może być uprawiana w warunkach ekologicznych, szczególnie odmiany dobrze rokujące pod względem odporności na zarazę ziemniaka oraz wysoko plonujące. Powinny one charakteryzować się też cechami agrotechniczno-użytkowymi dostosowanymi do zmiennych warunków środowiska. Dlatego badania muszą być

prowadzone w zróżnicowanych warunkach zarówno pod względem klimatu, czyli różnych lokalizacjach, jak i właściwości gleby [Zarzyńska 2010, Tatarowska i in. 2012, Zarzyńska i in. 2023]. Badania odmian ziemniaka muszą zawierać też komponenty stresu abiotycznego, takie jak susza czy nadmierne opady, wysoka temperatura, czyli prowadzone powinny być w różnych latach [Jankowska i in. 2015]. Zwiększenie konkurencyjności uprawy ziemniaka w systemie ekologicznym może nastąpić po wprowadzeniu odmian, których uprawa zapewni uzyskiwanie wysokich, stabilnych plonów, jak również odpowiedni poziom cech jakościowych [Zarzyńska i Goliszewski 2005, 2015]. Plon i wiele cech jakości bulw ziemniaka w znacznej mierze determinowane są genetycznie, ale również warunki środowiska, tj. układ warunków pogodowych okresu wegetacji, typ gleby, na której są uprawiane, a także stosowana agrotechnika są czynnikami modyfikującymi te właściwości w większym lub mniejszym stopniu [Zarzyńska i Wroniak 2007, Zarzyńska i Pietraszko 2015, Przystalski i Lenartowicz 2020]. Poznanie interakcji, czyli współdziałania cech genotypowych z danym środowiskiem umożliwia uzyskanie pełnej wiedzy o odmianie i jej oddziaływania na różne warunki siedliskowe. Ocena zmienności tego oddziaływania w kontekście plonu i cech jakości może być miarą stabilności odmian. Poprawna ocena stabilności i analiza interakcji genotypowo-środowiskowej umożliwiającą rekomendację odmian, które wykazują dobre przystosowanie do różnych warunków środowiska [Gauch i in. 2008, Rymuza i in. 2017, Flis i Tatarowska 2019]. Znaczącą rolę w ocenie tych elementów odgrywa wybór odpowiedniej metody statystycznej. W opracowaniach dotyczących badania interakcji odmian ze środowiskiem wykorzystuje się ocenę miary stopnia szerokiej adaptacji. Miara stopnia szerokiej adaptacji odmian to zdolność odmiany do odpowiednio wysokiej produktywności w zmiennych warunkach środowiskowych odnoszących się do lokalizacji doświadczeń, lat badań czy systemu uprawy. Jednymi z miar statystycznych do analizy szerokiej adaptacji odmian jest nadrzędność plonowania (P_i) [Lin i Binns 1988], niezawodność przewagi plonowania (R_i) [Eskridge i Mumm 1992] i miara stabilności Kanga (Y_{Si}) [Kang 1993]. Realizacja badań z uwzględnieniem wyżej wymienionych czynników pozwoliła na wytypowanie odmian odpowiednich dla systemu ekologicznej produkcji ziemniaka. Z uwagi na specyfikę tego systemu dobór odmian jest jednym z kluczowych elementów decydujących o powodzeniu uprawy. W pracy weryfikacji poddano hipotezę alternatywną zakładającą zróżnicowany wpływ czynnika środowiskowego na plonowanie odmian i strukturę bulw odmian ziemniaka wobec hipotezy zerowej mówiącej o braku różnic w tym względzie pomiędzy odmianami.

Celem badań była ocena i rekomendacja najbardziej korzystnych i stabilnych pod względem uzyskanego plonu bulw i jego struktury odmian ziemniaka do uprawy w systemie produkcji ekologicznej.

MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono w latach 2021–2023 w sześciu lokalizacjach w warunkach certyfikowanych ekologicznych pól doświadczalnych na dziesięciu odmianach jadalnych ziemniaka o zróżnicowanej wczesności. Doświadczenia zlokalizowane były w następujących miejscowościach: Jadwisin – województwo mazowieckie, Krzyżewo – województwo podlaskie, Lućmierz – województwo łódzkie, Osiny – województwo lubelskie, Tarnów – województwo dolnośląskie, Węgrzce – województwo małopolskie (czynnik I rzędu). Badane odmiany należały do trzech grup wczesności (bardzo wczesne: Pogoria,

Surmia, Tonacja, wczesne: Arizona, Lilly, średnio wczesne: Connect, Irmina, Mariola, Red Lady, Soraya) – czynnik II rzędu. Doświadczenia prowadzono w układzie losowanych podbloków, w trzech powtórzeniach. Badania przeprowadzono w warunkach gleby lekkiej: Jadwisin, Krzyżewo, Lućmierz oraz na glebie średniej: Osiny, Tarnów i Węgrzce. Charakterystykę warunków glebowych doświadczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka warunków glebowych w wybranych miejscowościach
Table 1. Characteristics of soil conditions at selected localizations

Miejscowość Localization	Charakterystyka gleby/ Soil characteristics					
	klasa class	kompleks complex	tekstura** textural classes	składnik ingredient	zasobność richness	pH
Jadwisin	IV b	żytni dobry good rye	piasek gliniasty loamy sand	P K Mg	bw ś w	6,4
Krzyżewo	IV b	żytni dobry good rye	piasek gliniasty loamy sand	P K Mg	w n n	5,4
Lućmierz	IV b	żytni dobry good rye	piasek gliniasty loamy sand	P K Mg	w n bw	5,5
Osiny	III b	żytni bardzo dobry very good rye	głina piaszczysta sandy loam	P K Mg	ś n w	6,0
Tarnów	III a	pszenney dobry wheat good	głina piaszczysta sandy loam	P K Mg	bw w w	6,6
Węgrzce	II b	pszenney dobry wheat good	głina loam	P K Mg	w bw w	6,5

pH w KCl/ pH in KCl, bw – bardzo wysoka/ very high, w – wysoka/high, ś – średnia/medium, n – niska/low

** FAO 2015

Lata badań pod względem układu warunków pogodowych w okresie wegetacji (kwiecień–wrzesień) znacznie się różniły (Tab. 2). Wartości współczynnika hydrotermicznego Sielianinowa wskazują, że 2021 r. był dość wilgotny, 2022 r. dość suchy, a 2023 r. suchy. W 2021 r. we wszystkich lokalizacjach, z wyjątkiem Tarnowa w porównaniu z pozostałymi latami zanotowano największe opady. Średni poziom opadów w 2021 r. wyniósł 504,4 mm. Największe opady zanotowano w Węgrzcach, a najmniejsze w Tarnowie. W Tarnowie zanotowano również najniższą średnią temperaturę powietrza, natomiast najwyższą w Krzyżewie. W 2022 r. zanotowano mniejszy o 113,7 mm poziom opadów niż w 2021 r. Największymi opadami i najniższą średnią temperaturą powietrza w 2022 r. charakteryzował się Tarnów. Najmniejsze opady zanotowano w Jadwisinie, a najwyższą temperaturę powietrza w Węgrzcach. 2023 r. oprócz tego, że był suchy to również najcieplejszy. Średnia temperatura powietrza w 2023 r. za cały okres wegetacji wyniosła 16,3°C.

W 2021 r. zanotowano o 1,0°C, a w 2022 r. o 1,2°C niższą niż w 2023 r. średnią temperaturę powietrza. Największe opady w 2023 r. stwierdzono w Węgrzcach, a najmniejsze w Krzyżewie. Średnia temperatura powietrza najwyższa była w Lućmierzu, natomiast najniższa w Tarnowie (Tab. 2).

Tabela 2. Układ warunków pogodowych w okresach wegetacji (kwiecień–wrzesień) w latach badań
Table 2. The pattern of weather conditions in vegetation periods (April–September) in the years of experiment

Lata/Years	Miejscowość/Localization						Średnia Mean
	J	K	L	O	T	W	
suma opadów (mm)/ sum of rainfall (mm)							
2021	486,6	433,5	487,0	550,3	400,3	668,6	504,4
2022	318,3	406,1	435,2	328,9	452,0	403,7	390,7
2023	255,6	239,0	336,2	330,8	401,7	487,0	341,7
Średnia z lat 2021–2023 Mean from years 2021–2023	352,0	382,9	385,6	356,0	412,8	445,0	–
średnia temperatura powietrza (°C)/ mean air temperature (°C)							
2021	15,4	15,7	15,2	15,0	14,7	15,6	15,3
2022	15,5	14,4	15,8	15,0	13,7	16,4	15,1
2023	16,7	15,9	16,9	16,1	15,6	16,7	16,3
2021–2023	14,6	15,2	15,8	14,8	15,8	15,1	–
współczynnik hydrotermiczny Sielianinova (K)* Sielianinov's hydrothermal coefficients (K)*							
2021	1,70	1,65	1,70	1,85	0,98	1,75	1,61
2022	1,22	1,50	1,22	1,00	1,69	0,75	1,23
2023	0,89	0,55	0,90	0,96	0,90	0,87	0,85

J – Jadwisin, K – Krzyżewo, L – Lućmierz, O – Osiny, T – Tarnów, W – Węgrzce

* Wartość współczynnika Sielianinova [Skowera 2014]: ekstremalnie sucho $k \leq 0,4$, bardzo sucho $0,4 < k \leq 0,7$, sucho $0,7 < k \leq 1,0$, dość sucho $1,0 < k \leq 1,3$, optymalnie $1,3 < k \leq 1,6$, dość wilgotno $1,6 < k \leq 2,0$, wilgotno $2,0 < k \leq 2,5$, bardzo wilgotno $2,5 < k \leq 3,0$, ekstremalnie wilgotno $k > 3,0$

*The value of the Sielianinov's coefficient [Skowera 2014]: extremely dry $k \leq 0,4$, very dry $0,4 < k \leq 0,7$, dry $0,7 < k \leq 1,0$, rather dry $1,0 < k \leq 1,3$, optimal $1,3 < k \leq 1,6$, rather humid $1,6 < k \leq 2,0$, humid $2,0 < k \leq 2,5$, very humid $2,5 < k \leq 3,0$, extremely humid $k > 3,0$

Badania przeprowadzono w technologii standardowej dla systemu uprawy ekologicznej z zachowaniem zbliżonego poziomu zabiegów agrotechnicznych we wszystkich miejscowościach. Chwasty niszczone mechanicznie, ochronę roślin ziemniaka w zakresie zwalczania zarazy ziemniaka wykonywano przy wykorzystaniu środka Miedzian 50 WP (tlenochlorek miedzi) w dawce $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a stonkę ziemniaczaną niszczone przy wykorzystaniu środka Spintor 240 SC (spinosad) w dawce $0,15 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Ziemniaki wysadzono w drugiej lub trzeciej dekadzie kwietnia w rozstawie 75 cm × 33 cm, a zbierano w trzeciej dekadzie sierpnia (odmiany bardzo wczesne i wczesne) oraz drugiej lub trzeciej dekadzie września (odmiany średnio wczesne). Wielkość poletka wynosiła 14,85 m², a liczba roślin na poletku 60. Zbiory bulw przeprowadzano po uzyskaniu pełni dojrzałości roślin, w fazie rozwoju 97–99 w skali BBCH [Klingauf 2001]. Podczas zbioru określono plon ogólny bulw z każdego poletka oraz pobierano 5-kilogramowe próby w celu określenia struktury plonu: udział procentowy frakcji bulw małych o średnicy poniżej 35 mm, bulw średnich od 35 mm do 60 mm średnicy oraz bulw dużych o średnicy powyżej 60 mm [Roztropowicz 1999].

Wyniki badań opracowano statystycznie, posługując się programem Statistica 13.3, stosując analizę wariancji [TIBCO Software 2017] oraz wykorzystując do obliczeń Zestaw Przyrodnika. Analizę porównania średnich przeprowadzono z wykorzystaniem testu Tukeya na poziomie $p = 0,05$. Miary szerokiej adaptacji: miarę nadrzędności plonowania (P_i), miarę niezawodności przewagi plonowania (R_i) oraz Miarę stabilności Kanga (YS_i) wyznaczono w oparciu o wyniki uzyskane z analizy według modelu AMMI [StatSoft Polska Sp. z o. o. 2018].

WYNIKI I DYSKUSJA

Zróżnicowanie i udział czynników w zmienności

W badaniach wykazano istotne zróżnicowanie czynnika środowiskowego (E), lokalizacji doświadczeń (L) z latami (Y) oraz odmianowego (G) i ich współdziałania ($E \times G$). Udowodnione różnice odnosiły się w stosunku do plonu bulw i wszystkich wielkości bulw. Analiza cech według modelu AMMI wykazała, że wielkość plonu i jego struktura w największym stopniu zależały od warunków środowiska. W mniejszym stopniu zaznaczył się wpływ współdziałania środowiska z genotypem, zaś najmniejszy udział w zmienności stanowiło zróżnicowanie odmianowe. W zmienności plonu bulw czynnik środowiskowy stanowił 55,3%, współdziałanie środowiska z genotypem 25,1%, a czynnik odmianowy 13,6%. Podobną strukturę udziału tych czynników w zmienności plonu bulw potwierdziły Jankowska i Pietraszko [2021]. Zbliżony udział w zmienności całkowitej lokalizacji doświadczeń (58%) oraz znacznie mniejszy w stosunku do lat (9%), genotypu (8%) i ich współdziałania (6%) wykazali Flis i in. [2014]. W badaniach Sawickiej i Pszczółkowskiego [2017] dominującą rolę w zmienności plonu bulw i jego struktury odgrywało współdziałanie odmian i lat badań, które stanowiło do 92,7%, zaś najmniejszy udział stanowił genotyp, podobnie jak w przeprowadzonych badaniach własnych. Większy niż plonu bulw był wpływ środowiska na strukturę plonu, którego udział wahał się od 60% w stosunku do bulw średnich do 64,9% dla bulw małych. Większy wpływ na strukturę plonu bulw małych, średnich i dużych współdziałania odmian z latami, od 75,2% do 78,8% uzyskali Sawicka i Pszczółkowski [2017]. W innych badaniach Sawicka i Pszczółkowski [2004] wykazali, że dominującą rolę w zmienności całkowitej bulw wszystkich frakcji, małych, średnich i dużych odgrywały lata badań (62,4%–85%), a udział zmienności genotypowej wahał się od 11,4% do 34,1%.

W przeprowadzonych badaniach współdziałanie środowiska z genotypem na strukturę plonu stanowiło średnio 27,4%, a udział genotypu w zmienności wyniósł 8,5% (Tab. 3).

Tabela 3. Zestawienie wyników analizy wariancji w stosunku do odmian i miejscowości
Table 3. Comparison of the variance analysis in relation to varieties and localizations

Parametry Parameters	Efekty Effects	Miejscowość Localization (M)	Odmiana Cultivar (O)	M × O	Powtórzenie Replication	Błąd Error
Plon bulw Tuber yield	zmiennność (%) variability (%)	55,3	13,6	25,1	1,9	4,1
	statystyka F F-statistica	64,7	119,9	13,0	4,0	–
	wartość p p-value	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–
Bulwy małe Small tubers	zmiennność (%) variability (%)	64,9	8,3	24,6	0,6	1,6
	statystyka F F-statistica	241,0	181,3	31,5	3,1	–
	wartość p p-value	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–
Bulwy średnie Middle tubers	zmiennność (%) variability (%)	60,0	7,9	30,9	0,5	0,7
	statystyka F F-statistica	256,9	372,7	85,9	5,9	–
	wartość p p-value	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–
Bulwy duże Large tubers	zmiennność (%) variability (%)	63,0	9,2	26,6	0,4	0,8
	statystyka F F-statistica	336,6	393,5	66,6	4,2	–
	wartość p p-value	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	–

Analiza plonu bulw

Wpływ różnych czynników środowiskowych na plon bulw stanowi główny element oceny wartości użytkowej odmiany. Wykazano istotne zróżnicowanie plonu bulw pomiędzy wszystkimi lokalizacjami. Największy plon bulw $37,45 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ uzyskano w Tarnowie, na glebie średniej o składzie granulometrycznym gliny piaszczystej, o najbardziej optymalnym rozkładzie i zbliżonych do średniej z wielolecia opadach. Najmniejszy plon bulw $20,02 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ uzyskano w Krzyżewie, na glebie lekkiej, o składzie granulometrycznym piasku gliniastego. W lokalizacji tej było najbardziej sucho w jednym z lat badań. Niezależnie od lokalizacji największy plon bulw $31,13 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ uzyskano w 2022 r., najbardziej umiarkowanym w stosunku do opadów i temperatury powietrza. Najbardziej niesprzyjający plonowaniu (średni plon $19,92 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) był 2023 r., w którym zanotowano najniższe opady i najwyższą temperaturę powietrza. Spadek plonu w głównej mierze wynika z braku opadów, czyli wystąpienia suszy glebowej niż wysokiej temperatury powietrza w okresie wegetacji [Boguszewska-Mańkowska i in. 2022]. Warunki pogodowe w latach mają na ogół bardziej istotny wpływ na plon bulw niż lokalizacja, jeżeli chodzi o udział czynnika środowiskowego w ogólnej zmienności, co potwierdzili Zarzecka i in. [2004]. Potwierdziły to też

Jankowska i Pietraszko [2021], wykazując, że warunki pogodowe w latach badań miały ponad trzykrotnie większy wpływ na wielkość plonu bulw niż odmiana i interakcja genotyp $\times$ rok. W badaniach Kołodziejczyka [2013] udział czynnika pogodowego stanowił ponad 76% zmienności całkowitej plonu bulw, właściwości odmianowe wyjaśniały 4,2% zmienności, a współdziałanie odmian z latami odpowiadało za 17,9% zmienności. Największy udział warunków pogodowych w latach na plon bulw, ponad 95% w zmienności, odnotowali Sawicka i Pszczółkowski [2004], a czynnik genotypowy stanowił tylko ok. 3% zmienności. Niezależnie od lokalizacji i lat badań najwyżej plonowały odmiany Connect i Arizona, odpowiednio 34,96 t·ha⁻¹ i 33,47 t·ha⁻¹. Odmiany te charakteryzowały się nie tylko najwyższym plonem bulw w lokalizacjach, ale też w ocenie szerokiej adaptacji najlepszymi wartościami miar dla tej cechy w porównaniu z pozostałymi odmianami. W literaturze takie odmiany określa się jako idealne, czyli wykazujące dobrą adaptację zarówno do korzystnych, jak i niekorzystnych środowisk [Kaya i in. 2006, Yan i in. 2007, Flis i in. 2014].

Tabela 4. Plon bulw (t·ha⁻¹) w zależności od odmiany i miejscowości (średnie z lat 2021–2023)
Table 4. Yield of tubers (t·ha⁻¹) in relation to variety and localization
(means with years 2021–2023)

Odmiana/ Cultivar	Miejscowość/Localization						Średnia Mean
	Jadwisin	Krzyżewo	Lućmierz	Osiny	Tarnów	Węgrzce	
Pogoria	23,18	17,13	22,56	25,00	30,63	25,81	24,05 ^c
Surmia	27,51	18,66	22,97	23,34	34,05	28,62	25,86 ^{bc}
Tonacja	24,77	15,98	23,24	25,78	31,67	25,55	24,50 ^c
Arizona	33,63	24,16	24,68	37,33	48,62	32,40	33,47 ^a
Lilly	29,94	19,33	24,72	28,04	34,14	28,03	27,37 ^b
Connect	24,96	28,07	27,40	43,60	54,15	31,60	34,96 ^a
Irmia	27,82	19,70	20,94	33,24	37,87	19,72	26,55 ^b
Mariola	25,66	21,32	20,11	36,48	33,54	17,05	25,69 ^{bc}
Red Lady	18,04	13,91	20,57	22,56	31,87	14,43	20,23 ^d
Soraya	26,36	21,90	23,52	31,21	37,92	20,93	26,97 ^b
Średnia/Mean	26,19 ^c	20,02 ^e	23,07 ^d	30,66 ^b	37,45 ^a	24,41 ^d	–
Rok/Year							
2021	30,73	21,74	28,30	37,18	34,97	26,15	29,84 ^b
2022	30,31	26,05	29,24	35,58	37,97	27,66	31,13 ^a
2023	17,52	12,26	11,68	19,21	39,41	19,43	19,92 ^c

Średnie wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie na poziomie $p = 0,05$ według testu Tukeya/ Mean values indicated by the same letters mean differences not statistically significant at $p = 0.05$ level, according to Tukey's test

Tabela 5. Udział bulw małych w plonie (%) w zależności od odmiany i miejscowości
(średnie z lat 2021–2023)

Table 5. Share of small tubers in the yield (%) in relation to variety and localization
(mean with years 2021–2023)

Odmiana Cultivar	Miejscowość /Localization						Średnia Mean
	Jadwisin	Krzyżewo	Lućmierz	Osiny	Tarnów	Węgrzce	
Pogoria	14,21	1,98	7,88	0,57	3,83	6,02	5,75 ^d
Surmia	10,37	2,86	7,25	1,82	8,87	7,73	6,48 ^{cd}
Tonacja	11,80	2,06	9,61	1,33	3,90	6,18	5,81 ^d
Arizona	13,05	1,03	5,36	0,32	2,83	6,92	4,92 ^e
Lilly	17,90	3,37	11,33	1,46	10,21	15,14	9,90 ^a
Connect	12,06	1,46	14,47	0,58	6,78	9,08	7,41 ^c
Irmia	8,77	2,02	10,48	0,63	7,14	13,01	7,01 ^c
Mariola	19,67	2,45	8,26	4,24	11,51	14,32	10,07 ^a
Red Lady	6,20	1,17	6,75	0,26	5,17	5,11	4,11 ^f
Soraya	14,82	1,77	10,57	3,73	9,83	11,01	8,62 ^b
Średnia/Mean	12,88a	2,02d	9,20b	1,49e	7,01c	9,45b	–
Rok/Year							
2021	10,23	2,26	5,29	3,13	9,89	7,87	6,44 ^b
2022	8,37	0,77	4,63	0,40	5,14	9,36	4,78 ^c
2023	20,06	3,02	17,68	0,96	6,00	11,13	9,81 ^a

Średnie wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie na poziomie $p = 0,05$ według testu Tukeya/ Mean values indicated by the same letters mean differences not statistically significant at $p = 0.05$ level, according to Tukey's test

Analiza wielkości bulw w plonie

Struktura plonu bulw stanowi jedną z podstawowych cech decydujących o przydatności odmiany do określonego kierunku produkcji. Udział w plonie bulw małych, o średnicy poniżej 35 mm w głównej mierze decyduje o wielkości uzyskiwanego plonu handlowego bulw. Bulwy o średnicy poniżej 35 mm stanowią frakcję niehandlową, stąd pożądany jest jak najmniejszy udział tej frakcji w plonie. W badaniach wykazano, że w Osinach na glebie średniej, o zbliżonych do średniej z wielolecia opadach w dwóch kolejnych latach oraz ciepłych uzyskano najmniej bulw małych w plonie. Najwięcej bulw małych w plonie stwierdzono w Jadwisinie, na glebie lekkiej, gdzie w dwóch latach zanotowano opady poniżej średniej z wielolecia i we wszystkich latach było ciepło. Niezależnie od lokalizacji najwięcej bulw małych w plonie 9,81% uzyskano w roku najbardziej suchym i ciepłym (2023), a najmniej 4,78% w roku z opadami zbliżonymi do średniej wieloletniej i umiarkowanie ciepłym (2022). Spośród odmian istotnie najmniejszym udziałem bulw małych w plonie charakteryzowała się odmiana Soraya (2,62%). Najwięcej bulw małych wykazano u odmian Mariola (10,07%) i Lilly (9,90%).

Tabela 6. Udział bulw średnich w plonie (%) w zależności od odmiany i miejscowości (średnia z lat 2021–2023)

Table 6. Share of middle tubers in the yield (%) in relation to variety and localization (mean with years 2021–2023)

Odmiana Cultivar	Miejscowość /Localization						Średnia Mean
	Jadwisin	Krzyżewo	Lućmierz	Osiny	Tarnów	Węgrzce	
Pogoria	80,91	68,58	85,01	40,81	57,75	54,68	64,62 ^e
Surmia	84,22	63,37	79,61	56,78	49,14	57,54	65,11 ^e
Tonacja	83,68	73,10	82,52	64,87	55,13	62,14	70,27 ^c
Arizona	75,85	66,51	71,92	43,93	45,02	53,10	59,39 ^f
Lilly	75,01	82,68	75,17	66,66	60,66	69,15	71,56 ^c
Connect	78,22	79,40	80,57	46,34	50,60	72,44	67,93 ^d
Irmia	86,83	82,14	86,11	40,47	55,14	71,54	70,37 ^c
Mariola	74,40	88,65	82,98	74,15	67,92	74,28	77,07 ^a
Red Lady	87,38	82,38	88,77	64,07	56,50	60,77	73,31 ^b
Soraya	77,00	76,52	79,12	50,36	56,27	65,88	67,52 ^d
Średnia/Mean	80,37a	76,33b	81,18a	54,85d	55,41d	64,15c	–
Rok/Year							
2021	83,31	77,85	79,39	62,35	63,41	79,17	74,25a
2022	81,06	68,67	84,99	53,73	59,74	53,09	66,88b
2023	76,74	82,49	79,16	48,46	43,09	60,20	65,02c

Średnie wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie na poziomie $p = 0,05$ według testu Tukeya/ Mean values indicated by the same letters mean differences not statistically significant at $p = 0.05$ level, according to Tukey's test

W doświadczeniach na glebie lekkiej (Jadwisin, Krzyżewo, Lućmierz) stwierdzono też większy udział w plonie bulw średnich niż w doświadczeniach na glebie średniej (Osiny, Tarnów, Węgrzce). Niezależnie od lokalizacji istotnie najwięcej bulw średnich w plonie (74,25%) odnotowano w 2021 r., o największych opadach w okresie wegetacji. Istotnie najwięcej bulw średnich w plonie uzyskano u odmiany Mariola (77,07%), a istotnie najmniej stwierdzono u odmiany Arizona (59,39%).

Udział bulw dużych w plonie kształtował się odwrotnie niż bulw średnich. Istotnie więcej bulw dużych uzyskano na glebie średniej (Osiny, Tarnów, Węgrzce) niż na glebie lekkiej (Jadwisin, Krzyżewo, Lućmierz). Istotnie najmniejszy udział bulw dużych uzyskano w roku z nadmiarem opadów (2021). Istotnie więcej bulw dużych stwierdzono w roku z niedoborem opadów (2023), co mogło wynikać z mniejszej liczby zawiązanych bulw, a przez to ich dorastania do większej średnicy. Najwięcej bulw dużych odnotowano w 2022 r., w którym opady najbardziej zbliżone były do średniej z wielolecia. Spośród odmian najwięcej bulw dużych w plonie stwierdzono u odmiany Arizona (35,68%), a najmniej u odmiany Mariola (12,84%). Podobnie dużą zmiennością charakteryzowała się struktura bulw pomiędzy latami i odmianami w badaniach Sawickiej i Pszczółkowskiego [2004, 2017], co tłumaczyli głównie nierównomiernym rozkładem opadów w latach oraz

zróznicowaną wczesnością odmian. Wykazali ponadto, że ogólnie największą zmiennością w stosunku do badanych czynników charakteryzowała się frakcja bulw dużych, o średnicy powyżej 6 cm [Sawicka i Pszczółkowski 2004, 2017]. Z obecnych badań własnych wynika, że udział bulw małych w stosunku do odmian był podobny do uzyskanych przez Sawicką i Pszczółkowskiego [2004 i 2017], natomiast znacznie mniej uzyskali oni bulw dużych w plonie. Z kolei Zarzyńska i Goliszewski [2015] uzyskali znacznie więcej bulw średnich (82,5%).

Tabela 7. Udział bulw dużych w plonie (%) w zależności od odmiany i miejscowości (średnia z lat 2021–2023)

Table 7. Share of large tubers in the yield (%) in relation to variety and localization (mean with years 2021–2023)

Odmiana Cultivar	Miejscowość/Localization						Średnia Mean
	Jadwisin	Krzyżewo	Lućmierz	Osiny	Tarnów	Węgrzce	
Pogoria	4,87	29,42	7,10	58,61	38,41	39,28	29,61 ^b
Surmia	5,40	33,75	13,13	41,38	41,97	34,72	28,39 ^b
Tonacja	4,33	24,83	7,86	33,78	40,96	31,66	23,90 ^{cd}
Arizona	11,08	32,45	22,71	55,74	52,14	39,97	35,68 ^a
Lilly	7,08	13,93	13,48	31,86	29,12	15,70	18,53 ^e
Connect	9,71	19,13	4,94	53,06	42,61	18,46	24,65 ^c
Irmia	4,38	15,83	3,40	58,88	37,71	15,44	22,61 ^d
Mariola	5,88	8,88	8,74	21,60	20,56	11,38	12,84 ^f
Red Lady	6,41	16,43	4,46	35,65	38,32	34,11	22,56 ^d
Soraya	8,17	21,70	10,30	45,90	33,88	23,10	23,84 ^{cd}
Średnia/Mean	6,73 ^f	21,63 ^d	9,61 ^e	43,65 ^a	37,57 ^b	26,38 ^c	–
Rok/Year							
2021	6,45	19,88	15,31	34,51	26,69	12,95	19,30 ^c
2022	10,56	30,55	10,37	45,86	35,11	37,54	28,33 ^a
2023	3,19	14,48	3,15	50,58	50,91	28,66	25,16 ^b

Średnie wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie statystycznie na poziomie $p = 0,05$ według testu Tukeya/ Mean values indicated by the same letters mean differences not statistically significant at $p = 0.05$ level, according to Tukey's test

Analiza stabilności odmian

Analiza stopnia szerokiej adaptacji na podstawie trzech miar pozwoliła na ocenę stabilności odmian. Pierwsza miara, stopień nadrzędności (P_i) określa, że wartość liczbowa bliższa 0 stanowi o wyższym stopniu szerokiej adaptacji. Druga miara wyrażająca prawdopodobieństwo kształtowania cechy odmiany powyżej średniej środowiskowej (R_i) wskazuje, że odmiana o wartości 1 charakteryzuje się cechą powyżej średniej środowiskowej dla badanego okresu, czyli najwyższym stopniem szerokiej adaptacji. Trzecia miara Kanga (YS) stanowi średnią genotypową cechy odmiany oraz wariancji stabilności. Im wyższa wartość miary Kanga (YS_i) dla odmiany tym wyższy jest jej stopień szerokiej adaptacji [Mądry i Iwańska 2011].

Tabela 8. Wskaźniki stabilności i adaptacji dla plonu i jego struktury
 Table 8. Stability and adaptation indicators for the yield and its structure

Odmiana Cultivar	Miara Measure	Plon bulw Tuber yield	Frakcje bulw – średnica Tubers fraction – diameter		
			<35 mm	35–60 mm	>60 mm
Pogoria	Pi	162	33	305	165
	Ri	0,11	0,28	0,33	0,61
	YSi	1	2	1	10
Surmia	Pi	145	33	245	174
	Ri	0,44	0,39	0,39	0,61
	YSi	4	4	2	9
Tonacja	Pi	156	31	152	281
	Ri	0,22	0,33	0,50	0,56
	YSi	2	3	7	5
Arizona	Pi	46	42	405	47
	Ri	0,94	0,11	0,17	0,89
	YSi	11	1	-1	12
Lilly	Pi	114	8	127	354
	Ri	0,50	0,72	0,72	0,11
	YSi	9	11	9	1
Connect	Pi	32	27	227	235
	Ri	0,78	0,50	0,67	0,33
	YSi	5	4	4	8
Irmia	Pi	116	30	220	280
	Ri	0,56	0,50	0,56	0,39
	YSi	5	5	8	3
Mariola	Pi	136	16	51	580
	Ri	0,50	0,72	0,78	0,17
	YSi	3	8	12	-1
Red Lady	Pi	234	54	124	300
	Ri	0,11	0,06	0,72	0,33
	YSi	-1	-1	10	2
Soraya	Pi	113	20	220	293
	Ri	0,50	0,72	0,50	0,39
	YSi	8	9	3	4

Pi – miara nadrzędności plonowania; Ri – miara niezawodności przewagi plonowania; YSi – miara stabilności Kanga

Pi – superiority measure; Ri – eskridey's yield reliability measure; YSi – Kang's stability measure

Na podstawie analizy plonu bulw najlepszy stopień nadrzędności (P_i) oraz plonowania powyżej średniej środowiskowej (R_i) uzyskały odmiany Connect i Arizona. Według miary Kanga (YSi) najlepszą stabilność uzyskały odmiany Arizona, Lilly i Soraya. Dla bulw małych w plonie największą stabilność wszystkich trzech miar wykazano u odmian Lilly i Mariola. Wymagają one więc uwagi ze względu na skłonność do uzyskiwania małych bulw, niehandlowych. Dalsze badania powinny więc być skierowane na eliminację tej cechy lub dostosowanie zabiegów uprawowych do ograniczenia jej występowania. Największym stopniem szerokiej adaptacji dla wszystkich trzech miar w kształtowaniu udziału bulw średnich w plonie charakteryzowały się odmiany Lilly, Mariola i Red Lady, a bulw dużych uzyskano najwięcej dla odmian: Arizona, Pogoria i Surmia. Z dotychczasowych badań wynika, że struktura plonu bulw charakteryzuje się małą stabilnością w stosunku do właściwości odmian [Sawicka i Pszczółkowski 2004, 2017]. Według Sawickiej i Pszczółkowskiego [2004] najbardziej ustabilizowaną cechą struktury plonu były bulwy średnie o średnicy 4–5 cm, a najmniej bulwy duże o średnicy powyżej 6 cm. Określenie efektów zmienności genotypowo-środowiskowej jest racjonalnym i pożądanym działaniem mającym na celu dopasowanie z szerokiej puli dostępnych odmian odpowiednich do konkretnych warunków środowiska czy systemu produkcji, w tym ekologicznego. Powinny to być odmiany o podwyższonej odporności na choroby grzybowe oraz wysokoplonujące, co również podkreślili inni badacze, typując określone kreacje. Badania Przystalskiego i Lenartowicza [2023] wykazały, że były to odmiany Tajfun i Otolia, Jankowska i Pietraszko [2021] stwierdziły, że 7 spośród 34 odmian nie wykazało interakcji ze środowiskiem i uznano je za stabilne rolniczo pod względem uzyskanego plonu, a na pierwszym miejscu w rankingu miar szerokiej adaptacji uplasowała się odmiana Mondeo. Tego typu wyniki badań odmianowych z zastosowaniem określonego modelu i miar statystycznych wskazywać mogą hodowcom kierunek dalszych prac, a rolnikom wybór odmian o szerokiej adaptacji do warunków środowiska, czyli stabilnych [Paderewski i Mądry 2010, Flis i Tatarowska 2019].

WNIOSKI

1. Wykazano istotny wpływ środowiska, genotypu oraz ich współdziałanie na wielkość plonu i strukturę bulw.
2. Stwierdzono największy udział w zmienności całkowitej czynnika środowiskowego (miejsca uprawy i badanych lat) na plon i strukturę plonu.
3. Odmiana Arizona charakteryzowała się najlepszymi wartościami liczbowymi w stosunku do wszystkich trzech miar szerokiej adaptacji dla plonowania, odmiany Lilly, Mariola i Red Lady dla udziału bulw średnich, a odmiany Pogoria, Surmia i Arizona dla udziału bulw dużych w strukturze plonu.
4. Miary szerokiej adaptacji – Miara nadrzędności plonowania (P_i), Miara niezawodności przewagi plonowania (R_i) i miara stabilności Kanga (YSi) mogą być przydatnymi charakterystykami liczbowymi oceny przystosowania nowych odmian ziemniaka do konkretnych warunków środowiskowych.

PIŚMIENNICTWO

Boguszewska-Mańkowska D., Zarzyńska K., Wasilewska-Nascimento B., 2022. Potato (*Solanum tuberosum* L.) plant shoot and root changes under abiotic stresses – yield response. *Plants* 11(24), 3568. <https://doi.org/10.3390/plants11243568>

- Eskridge K.M., Mumm R.F., 1992. Choosing plant cultivars based on the probability of outperforming a check. *Theor. Appl. Genet.* 84(3), 494–500. <https://doi.org/10.1007/BF00229512>
- FAO, 2015. World reference database for soil resources 2014. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. Update 2015. *World Soil Resources Report* 106, pp.192.
- Flis B., Domański L., Zimnoch-Guzowska E., Polar Z., Pousa S.A., Pawlak A., 2014. Stability analysis of agronomic traits in potato cultivars of different origin. *Am. J. Pot. Res.* 91, 404–413. <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9364-6>
- Flis B., Tatarowska B., 2019. Analiza interakcji genotypowo-środowiskowej w odniesieniu do wybranych cech użytkowych ziemniaka jadalnego w różnych systemach uprawy. *Biul. IHAR* 286, 239–242. <https://doi.org/10.37317/biul-2019-0054>
- Gauch H.G., Piepho H.P., Annicchiarico P., 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Sci.* 48(3), 866–889.
- Jankowska J., Pietraszko M., 2021. Analiza stabilności i szerokiej adaptacji plonu ogólnego bulw odmian ziemniaka uprawianych na glebie lekkiej. *Biul. IHAR* 294, 61–72. <https://doi.org/10.37317/biul-2021-0007>
- Jankowska J., Pietraszko M., Lutomińska B., 2015. Analiza stabilności plonowania wybranych odmian ziemniaka (*Solanum tuberosum* L.) na glebie lekkiej. *Fragm. Agron.* 32(3), 32–43.
- Kang M.S., 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: Consequences for growers. *Agron. J.* 85(3), 754–757. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500030042x>
- Kaya Y., Akçura M., Taner S., 2006. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials in bread wheat. *Turk. J. Agric. For.* 30(5), 325–337.
- Klingauf F., 2001. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. *BBCH Monograph*, 2nd ed. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.
- Kołodziejczyk M., 2013. Fenotypowa zmienność plonowania, składu chemicznego oraz wybranych cech jakości bulw średnio późnych i późnych odmian ziemniaka jadalnego. *Acta Agrophys.* 20(3), 411–422.
- Lin C.S., Binns M.R., 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Can. J. Plant Sci.* 68(1), 193–198. <https://doi.org/10.4141/cjps88-018>
- Mądry W., Iwańska M., 2011. Ilościowe miary szerokiej adaptacji odmian i ich zastosowanie w doświadczeniach wstępnych z pszenicą ozimą. *Biul. IHAR* 260/261, 81–95. <https://doi.org/10.37317/biul-2011-0025>
- Paderewski J., Mądry W., 2012. Zastosowania modelu AMMI do analizy reakcji odmian na środowiska. *Biul. IHAR* 263, 161–188. <https://doi.org/10.37317/biul-2012-0082>
- Przystalski M., Lenartowicz L., 2020. Yielding stability of early maturing potato varieties: Bayesian analysis. *J. Agric. Sci.* 158(7), 564–573. <https://doi.org/10.1017/S0021859620000945>
- Przystalski M., Lenartowicz T., 2023. Organic system vs. conventional – a Bayesian analysis of Polish potato post-registration trials. *J. Agric. Sci.* 161(1), 97–108. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000084>
- Roztropowicz S., 1999. Metodyka obserwacji, pomiarów i pobierania prób w agrotechnicznych doświadczeniach z ziemniakiem. *Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, Oddział w Jadwisinie*, 1–50.
- Rymuza K., Radzka E., Lenartowicz T., 2017. Analiza interakcji genotypowo-środowiskowej średnio wczesnych jadalnych odmian ziemniaka. *Biul. IHAR* 281, 59–68.
- Sawicka B., Pszczółkowski P., 2004. Fenotypowa zmienność struktury plonu odmian ziemniaka w warunkach środkowo-wschodniej Polski. *Biul. IHAR* 232, 53–66.
- Sawicka B., Pszczółkowski P., 2017. Fenotypowa zmienność plonu i jego struktury bardzo wczesnych i wczesnych odmian ziemniaka. *Fragm. Agron.* 34(1), 76–91.
- Skowera B., 2014. Zmiany warunków hydrotermicznych na obszarze Polski (1971–2010). *Fragm. Agron.* 31(2), 74–87.
- StatSoft Polska Sp. z o.o., 2018. Zestaw Przyrodnika wersja 1.0, www.statsoft.pl
- Tatarowska B., Flis B., Zimnoch-Guzowska E., 2012. Biological stability of resistance to *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary in 22 Polish potato cultivars evaluation in field experiments. *Am. J. Pot. Res.* 89, 73–81.

- TIBCO Statistica, 2017. TIBCO Statistica v. 13.3.0, TIBCO Software Inc, Palo Alto, CA, USA. <https://www.tibco.com/products/tibco-statistica> [dostęp: 04.03.2024].
- Yan W., Kang M. S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L., 2007. GGE Biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 47(2), 643–653. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>
- Zarzecka K., Antolak M., Pszczółkowski P., 2004. Plonowanie dziesięciu średnio wczesnych odmian ziemniaka w warunkach Podlasia. *Zesz. Nauk. AP, Rol. Siedlce* 65, 59–63.
- Zarzyńska K., 2010. Struktura plonu bulw ziemniaków uprawianych w systemie ekologicznym i integrowanym w różnych warunkach środowiskowych. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 55(4), 181–185.
- Zarzyńska K., Goliszewski W., 2005. Rozwój roślin ziemniaka w zależności od systemu produkcji, jakości gleby i odmiany. *Biul. IHAR* 237/238, 133–141.
- Zarzyńska K., Goliszewski W., 2015. Odmianowe zróżnicowanie produktywności roślin ziemniaka uprawianych w systemie ekologicznym i integrowanym. *Fragm. Agron.* 32(3), 113–120.
- Zarzyńska K., Pietraszko M., 2015. Influence of climatic conditions on development and yield of potato plants growing under organic and conventional systems in Poland. *Am. J. Potato Res.* 92(4), 511–517.
- Zarzyńska K., Trawczyński C., Pietraszko M., 2023. Environmental and agronomical factors limiting differences in potato yielding between organic and conventional production system. *Agriculture* 13, 901. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040901>
- Zarzyńska K., Wroniak J., 2007. Różnice w jakości plonu bulw ziemniaków uprawianych w systemie ekologicznym w zależności od niektórych czynników agrotechnicznych. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 52(4), 148–158.

Źródło finansowania: Dotacja Celowa (obszar 6, zad. 6.1) MR i RW dla IHAR-PIB Radzików na 2024 rok.

Abstract. The aim of the research carried out in 2021–2023 in six localizations (Jadwisin, Krzyżewo, Lućmierz, Osiny, Tarnów, Węgrzce) in the conditions of certified ecological experimental fields on ten edible potato cultivars (very early: Pogoria, Surmia, Tonacja, early: Arizona, Lilly and medium early: Connect, Irmina, Mariola, Red Lady, Soraya) was to assess the stability of tuber yield and structure of selected potato cultivars. After the final harvest, tuber yield and its structure was assessed (the share of small tubers with a diameter below 35 mm, medium tubers with a diameter from 36 mm to 60 mm and large tubers with a diameter above 60 mm). The results were prepared based on the analysis of variance using the AMMI model, assessing the significance of the diversity of the studied factors and their share in the total variability. Then, the degree of wide adaptation of varieties to various environmental conditions was determined based on three measures (the measure of yield superiority – P_i , eskridey's yield reliability measure – R_i , Kang's stability measure – YS_i). The studies showed significant differences in relation to the analyzed factors: environment (E), cultivars (G) and interaction ($E \times G$). The greatest contribution to the variability of the environmental factor was found on the tuber yield and its structure. The highest degree of broad adaptation (P_i and R_i measures) in relation to tuber yield was demonstrated by the following cultivars Arizona and Connect.

Keywords: localization, potato cultivar, tuber yield, structure, variability

Otrzymano/Received: 18.03.2024
Zaakceptowano/Accepted: 15.11.2024
Opublikowano/Publication: 13.01.2025



Katedra Ekonomii i Agrobiznesu, Wydział Agrobiotechnologii,
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin, Polska
e-mail: anna.nowak@up.lublin.pl

ANETA ZAKRZEWSKA^{ID}, ANNA NOWAK^{ID*}

Zmiany produktywności zasobów w polskim rolnictwie na tle sytuacji w pozostałych krajach Unii Europejskiej

Changes in resource productivity in Polish agriculture in comparison
with the situation in other EU countries

Abstract. Celem opracowania była ocena pozycji polskiego rolnictwa w Unii Europejskiej pod względem produktywności ziemi i pracy. Zakres czasowy badań obejmował lata 2007–2021, zrealizowano je przy wykorzystaniu bazy danych EUROSTAT. Analizę przeprowadzono na podstawie wskaźników produktywności cząstkowej oraz dynamiki jej zmian. Polska była krajem o jednej z najniższych wartości produktywności pracy w rolnictwie. Pod względem produktywności czynnika ziemi, polskie rolnictwo osiągało lepszą pozycję, jednak wartość tego wskaźnika była prawie 2-krotnie niższa niż średnio w UE. W badanym piętnastolecu w rolnictwie polskim współczynniki produktywności obu badanych czynników produkcji systematycznie rosły. Tym samym Polska znalazła się w grupie krajów nowoprzyjętych „goniących” średnią unijną pod względem produktywności pracy i ziemi, tzn. odznaczających się ponadprzeciętnym tempem wzrostu omawianych współczynników, przy ich średnim poziomie kształtującym się nadal poniżej średniej unijnej. Pomimo relatywnie wysokiej dynamiki wzrostu produktywności pracy (163,5%) pozycja Polski w rankingu krajów UE w badanym okresie pogorszyła się (spadek z lokaty 25 na 27). Wskazuje to na potrzebę dalszych przekształceń strukturalnych, zwłaszcza na odpływ nadmiaru pracujących w rolnictwie. Natomiast pod względem produktywności ziemi Polska awansowała z miejsca 20 na 18.

Słowa kluczowe: rolnictwo, produktywność, Unia Europejska, Polska, kraje członkowskie UE

Cytowanie: Zakrzewska A., Nowak A., Zmiany produktywności zasobów w polskim rolnictwie na tle sytuacji w pozostałych krajach Unii Europejskiej. *Agron. Sci.* 79(3), 113–128. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5404>

WSTĘP

Rolnictwo to sektor, który odgrywa ważną rolę w krajach członkowskich Unii Europejskiej [Domagała 2021]. W 2021 r. rolnictwo UE wygenerowało wartość dodaną brutto na poziomie 192 mld euro [EUROSTAT 2024]. Jednocześnie wiele opracowań naukowych wskazuje na jego zróżnicowanie pomiędzy krajami, które dotyczy nie tylko potencjału produkcyjnego, ale także efektywności jego wykorzystania [Nowak i in. 2016, Thuczak 2020, Pawlak i in. 2021]. Polska jest krajem, w którym w 2021 r. rolnictwo zatrudniało 8,4% ogółu pracujących, a jego udział w całkowitej wartości dodanej brutto wynosił 2,5% [GUS 2022]. Podstawowe determinanty międzynarodowej zdolności konkurencyjnej zarówno na poziomie makro-, jak i mezoekonomicznym związane są z wielkością, jakością, strukturą i efektywnością wykorzystania posiadanych zasobów produkcyjnych [Pawlak i in. 2021]. Jednym z najważniejszych mierników konkurencyjności jest produktywność [Chrynowicz i in. 2016, Guth i Smędzik-Ambroży 2020]. Komisja Europejska podkreśla dodatkowo, że produktywność jest najbardziej wiarygodnym wskaźnikiem konkurencyjności w długim okresie [Komisja Europejska 2009].

Badaniom dotyczącym produktywności rolnictwa przypisuje się szczególne znaczenie z uwagi na to, że jej poprawa jest warunkiem trwałego rozwoju gospodarczego [O'Donnell 2010]. Według Latruffe [2010] produktywność jest zdolnością czynników produkcji do tworzenia efektu w postaci produkcji. Należy zaznaczyć, że wartościotwórcza rola trzech tradycyjnych czynników produkcji – ziemi, pracy i kapitału – wynika z klasycznej teorii wartości, która została opracowana przez Petty'ego, Smitha i Saya [Guth i Smędzik-Ambroży 2020]. W wielu opracowaniach naukowych dotyczących krajów Unii Europejskiej (UE) analizowana jest ona jako produktywność cząstkowa, dotycząca poszczególnych czynników produkcji [Kołodziejczak 2014, Bezat-Jarzębowska i Rembisz 2016] lub jako produktywność całkowita [Baráth i Fertő 2016, Bokusheva i Čechura 2017, Leimane i in. 2017, Baráth i Fertő 2023]. Brakuje jednak analiz dotyczących długich szeregów czasowych oraz analiz dynamiki zmian produktywności w poszczególnych krajach członkowskich UE. Potrzeba badań z tego zakresu wynika również ze zmian, jakie dokonują się w strukturach produkcyjnych oraz w intensywności produkcji rolniczej poszczególnych krajów członkowskich. Ważnym kierunkiem badań pozostaje także ocena zmian produktywności rolnictwa w nowych krajach członkowskich, które przystąpiły do UE w 2004 r. lub później. Do krajów takich należy Polska, gdzie rolnictwo odgrywa relatywnie ważną rolę w gospodarce [Rzeszutko i Kita 2018, Nowak i Marczak 2021]. Ponadto w 2021 r. Polska zajmowała piątą pozycję spośród 28 krajów UE pod względem zasobów ziemi oraz szóstą pod względem wartości produkcji rolniczej [EUROSTAT 2024]. W niektórych opracowaniach analizą obejmuje się także czynniki wzrostu produkcji rolniczej i produktywności. Wicki [2021] wykazał, że zmiany technologiczne odgrywają dominującą rolę w osiąganiu wzrostu produkcji rolnej i wzrostu produktywności czynników produkcji. Z kolei Czyżewski [2015] zwraca uwagę na związek pomiędzy produktywnością rolnictwa a koncentracją, specjalizacją i postępem technicznym. Kisielińska [2019] wykazała, że w krajach UE, w których koncentracja kapitału i pracy była wyższa, produktywność była zazwyczaj także wyższa. Relacje pomiędzy czynnikami produkcji i ich związek z częściową produktywnością czynników produkcji w rolnictwie UE zostały omówione przez Baer-Nawrocką i Markiewicza [2013]. Wykazali oni, że relacje ilościowe pomiędzy czynnikami produkcji w rolnictwie różnych państw są bardzo zróżnicowane i dodatkowo ulegają dużym zmianom w czasie. Główne czynniki determinujące ten

układ to poziom rozwoju techniczno-ekonomicznego kraju, prowadzone kierunki produkcji rolniczej, intensywność gospodarowania, relacje między cenami poszczególnych czynników i ich faktyczna dostępność. Z badań Pawlak i in. [2021] wynika z kolei, że amerykańskie rolnictwo charakteryzuje się bardziej racjonalnymi relacjami między czynnikami produkcji, co skutkuje ich wyższą produktywnością w porównaniu do UE. Ponadto Wicki [2019] oraz Nowak [2020] wykazali, że istnieje związek pomiędzy wielkością gospodarstw rolnych oraz produktywnością czynników produkcji.

Ocena produktywności rolnictwa pozostaje także ważna w świetle celów zrównoważonego rozwoju, ujmującego proces rozwoju rolnictwa w trzech równorzędnie traktowanych płaszczyznach: środowiskowej, ekonomicznej i społecznej [Adamowicz 2012]. Współczesna kwestia rolna w sferze ekonomicznej dotyczy zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego i konkurencyjności sektora rolnego, w sferze społecznej – deprywacji dochodowej rolników i zagrożenia społecznej pozycji gospodarstw rodzinnych, a w sferze środowiskowej – z jednej strony nadmiernej eksploatacji zasobów naturalnych i negatywnego oddziaływania na klimat, z drugiej – sprawiedliwej wyceny wynagrodzenia za usługi środowiskowe i kreację dóbr publicznych [Zegar 2010, Czyżewski 2015]. Zatem wzrost produktywności, przy respektowaniu pozostałych dwóch sfer zrównoważenia wciąż pozostaje aktualny. Produktywność pracy służy ponadto do monitorowania postępów w realizacji drugiego celu zrównoważonego rozwoju (SDG 2) sformułowanego w ramach Agendy 2030 (Cel 2: Wyeliminować głód, osiągnąć bezpieczeństwo żywnościowe i lepsze odżywianie oraz promować zrównoważone rolnictwo), który jest jednym z priorytetów Komisji Europejskiej w ramach inicjatywy Europejskiego Zielonego Ładu [Hurduzeu i in. 2022]. Poprawa produktywności rolnictwa i dochodów producentów żywności to kluczowe czynniki podtrzymania rozwoju gospodarczego i zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego, a cele te zyskują na znaczeniu w ostatnich latach.

Biorąc zatem pod uwagę znaczenie badań nad produktywnością w rolnictwie, za cel pracy przyjęto ocenę pozycji polskiego rolnictwa w Unii Europejskiej pod względem produktywności ziemi i pracy.

MATERIAŁ I METODY

Ocena efektywności rolnictwa, umożliwiającą porównanie wyników między państwami Unii Europejskiej, dokonywana jest najczęściej na podstawie europejskich rachunków narodowych publikowanych przez Eurostat, a w skali mikroekonomicznej na podstawie danych FADN (Farm Accountancy Data Network) [Zawalińska i in. 2015]. W niniejszym opracowaniu wykorzystano dane Eurostat, obejmujące nakłady czynników produkcji, wartość produkcji rolniczej oraz wartość dodaną brutto. Przyjęte w pracy kategorie ekonomiczne zostały wyrażone w cenach stałych z 2010 r. Zakres podmiotowy badań obejmował 28 krajów członkowskich UE, natomiast czasowy – lata 2007–2021. Dobór okresu badawczego podyktowany był tym, że w 2007 r. do UE dołączyły Bułgaria i Rumunia. Z uwagi na to, że Wielka Brytania do 2020 r. była członkiem UE, została ona uwzględniona w badaniach.

Badania obejmowały dwa etapy. W pierwszym etapie obliczono wskaźniki produktywności cząstkowej ziemi i pracy w rolnictwie poszczególnych krajów UE. Produktywność ziemi obliczono jako relację wartości produkcji rolniczej do powierzchni użytków

rolnych. Zmienne te oznaczone są w bazie Eurostat odpowiednio następującymi symbolami: aact_eaa07 oraz tag00025. Zgodnie z założeniami „Official Journal of the European Union” [2024] produkcja rolna stanowi sumę produkcji wszystkich gospodarstw rolnych (bez dopłat i z wyłączeniem produkcji na zużycie pośrednie przez tę samą jednostkę) z uwzględnieniem produkcji wykorzystanej jako zużycie pośrednie przez tę samą jednostkę, pod warunkiem, że produkcja ta dotyczy dwóch różnych podstawowych działalności (takich jak produkty roślinne przeznaczone do wykorzystania jako pasze dla zwierząt). Produktowność pracy oceniono na podstawie relacji wartości dodanej brutto do liczby pełnozatrudnionych (AWU – annual work unit) w rolnictwie. Zmienne te występują w bazie Eurostat pod następującymi symbolami: aact_eaa07 oraz aact_ali01. W opinii wielu autorów wartość dodana jest jedną z najbardziej zobiektywizowanych kategorii oceny produktywności pracy [Filh i Fornazier 2016, Góral i Rembisz 2017]. Zatrudnienie wyrażone w AWU definiuje się jako zatrudnienie w ekwiwalencie pełnego czasu pracy (odpowiadające liczbie miejsc pracy w ekwiwalencie pełnego czasu pracy), tj. jako całkowitą liczbę przepracowanych godzin podzieloną przez średnią roczną liczbę godzin przepracowanych w pełnym wymiarze czasu pracy na danym obszarze gospodarczym. Dla tak obliczonych wskaźników opracowano rankingi krajów na podstawie średnich ich wartości z lat 2007–2009 oraz 2019–2021. Z uwagi na brak danych dotyczących kapitału w postaci zasobów w bazie Eurostat, w badaniu nie uwzględniono produktywności kapitału. Dodatkowym argumentem było obliczenie produktywności bieżącej kapitału jako relacji wartości produkcji do wartości kosztów zużycia pośredniego oraz ocena zmienności tego wskaźnika pomiędzy krajami. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wskaźnik ten jest cechą o małej zmienności, o czym świadczy wskaźnik zmienności wynoszący 18,8%.

W drugim etapie badań, na podstawie uzyskanych wartości wskaźników produktywności dla poszczególnych czynników produkcji, dokonano analizy dynamiki ich zmian w badanym okresie. Z uwagi na długi okres badawczy dynamikę policzono jako relację średniej z trzech ostatnich lat wartości danego wskaźnika do średniej z trzech pierwszych lat okresu badawczego. Pozwoliło to na ocenę zmian w grupie starych i nowych krajów członkowskich. Dodatkowo obliczono średnie tempo zmian zgodnie z wzorem [Pułaska-Turyna 2011]:

$$\bar{T} = \sqrt[n-1]{\prod_{i=2}^n \frac{y_i}{y_{i-1}}} - 1 \quad (1)$$

gdzie: $\bar{T}$ – przeciętne tempo zmian zjawiska w czasie; Π – oznacza mnożenie; y – obserwowana wielkość zjawiska; y_i – i -ty wyraz szeregu czasowego, $i = 1, 2, \dots, n$; $\frac{y_i}{y_{i-1}}$ – indeks o podstawie zmiennej (podstawą jest rok poprzedni).

WYNIKI I DYSKUSJA

W tabeli 1 przedstawiono statystyki opisowe wskaźników przyjętych do badań. Wskazano w niej również kraje, w których dany wskaźnik przyjmował wartość minimalną oraz maksymalną. Z przedstawionych danych wynika, że bardzo silną zmiennością w badanych latach charakteryzowała się produktywność ziemi, a krajem o najwyższym jej średnim poziomie była Holandia. Silną zmiennością odznaczała się także produktywność pracy (88,5%).

Tabela 1. Statystyki opisowe zmiennych uwzględnionych w badaniu
Table 1. Descriptive statistics of study variables

Wyszczególnienie Specification	Produktywność pracy Labour productivity	Produktywność ziemi Land productivity
Średnia Average	21176,3	2776,8
Min	4355,9	576,7
Min (kraj) Min (country)	Rumunia Romania	Litwa Lithuania
Max	72434,2	13546,7
Max (kraj) Max (country)	Dania Denmark	Holandia Netherlands
Odchylenie standardowe Standard deviation	18750,6	2903,0
V – wsp. zmienności (%) V – variation coefficient (%)	88,5	104,5

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych EUROSTAT/ Source: authors' elaboration based on EUROSTAT

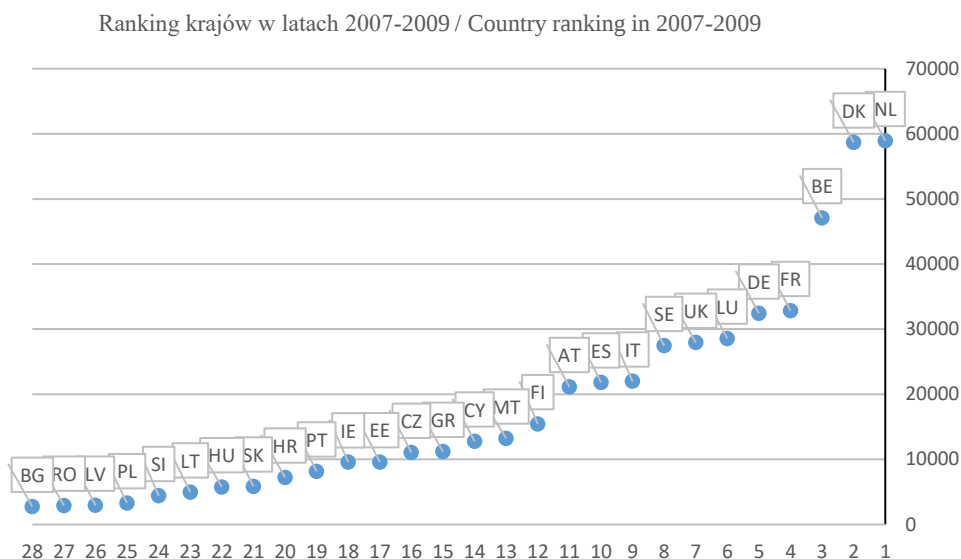
Współczynniki produktywności pracy i ziemi w polskim rolnictwie w latach 2007–2021 były znacznie niższe od średniego ich poziomu w UE. Jedna osoba zatrudniona w rolnictwie w Polsce wytwarzała przeciętnie w badanym okresie 4404,5 euro rocznie wartości dodanej brutto (tab. 2). Sytuowało to Polskę na przedostatniej pozycji wśród 28 krajów członkowskich. Liderem produktywności pracy w rolnictwie w UE były Dania, Holandia i Belgia. Można ponadto zauważyć wyraźną różnicę pomiędzy starymi i nowymi krajami członkowskimi. Żaden z krajów przyjętych do UE w 2004 r. lub później nie osiągnął poziomu średniej unijnej wartości produktywności pracy. Wartość wskaźnika produktywności ziemi wyniosła w Polsce 1449,3 euro na 1 ha UR i była prawie 2-krotnie niższa niż średnio w UE. Sytuowało to polskie rolnictwo na 18. miejscu wśród krajów członkowskich. Najwyższą efektywnością czynnika ziemi odznaczało się rolnictwo holenderskie, natomiast Łotwa, Bułgaria, Estonia i Litwa osiągały wartość produktywności ziemi poniżej 1 tys. euro. Podobnie jak w przypadku produktywności pracy zaznacza się tu wyraźna różnica pomiędzy starymi i nowymi państwami członkowskimi.

Na podstawie wartości wskaźników produktywności pracy sporządzono wykresy rankingów odwróconych dla średnich z lat 2007–2009 (ryc. 1) i 2019–2021 r. (ryc. 2), co pozwoliło zaobserwować czy nastąpiły zmiany pozycji Polski oraz pozostałych krajów członkowskich UE.

Tabela 2. Produktywność pracy i ziemi w rolnictwie w krajach członkowskich UE
w latach 2007–2021 (średnia)
Table 2. Labour and land productivity in agriculture in EU member states in 2007–2021 (average)

Kraj członkowski Member state	Produktywność pracy Labour productivity	Produktywność ziemi Land productivity
	EUR · AWU ⁻¹	EUR · ha ⁻¹
Belgia/Belgium	61 743,0	6 066,2
Bułgaria/Bulgaria	4 555,6	694,3
Czechy/Czechia	12 852,7	1 257,6
Dania/Denmark	72 434,2	3 944,8
Niemcy/Germany	31 436,5	2 981,0
Estonia	11 596,7	777,2
Irlandia/Ireland	11 261,6	1 448,7
Grecja/Greece	13 228,7	1 998,5
Hiszpania/Spain	28 652,9	1 807,3
Francja/France	35 816,4	2 286,1
Chorwacja/Croatia	6 989,9	1 952,0
Włochy/Italy	23 147,9	3 414,1
Cypr/Cyprus	21 265,9	5 597,9
Łotwa/Latvia	4 713,5	576,7
Litwa/Lithuania	7 531,9	837,8
Luksemburg/Luxembourg	30 100,5	2 539,7
Węgry/Hungary	6 651,6	1 331,5
Malta	11 244,5	9 985,7
Holandia/Netherlands	65 424,7	13 546,7
Austria	23 931,7	2 241,2
Polska/Poland	4 404,5	1 449,3
Portugalia/Portugal	10 179,8	1 811,2
Rumunia/Romania	4 355,9	1 091,7
Słowenia/Slovenia	5 420,7	2 314,2
Słowacja/Slovakia	7 662,9	1 059,5
Finlandia/Finland	19 283,3	1 614,1
Szwecja/Sweden	27 873,3	1 762,9
Wielka Brytania/United Kingdom	29 176,4	1 362,5
UE-28/EU-28	21 176,3	2 776,8

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych EUROSTAT/ Source: authors' elaboration based on EUROSTAT



NL – Holandia/Netherlands, DK – Dania/Denmark, BE – Belgia/Belgium, FR – Francja/France, DE – Niemcy/Germany, LU – Luksemburg/Luxembourg, UK – Wielka Brytania/United Kingdom, SE – Szwecja/Sweden, ES – Hiszpania/Spain, IT – Włochy/Italy, AT – Austria/Austria, FI – Finlandia/Finland, MT – Malta/Malta, CY – Cypr/Cyprus, IE – Irlandia/Ireland, GR – Grecja/Greece, EE – Estonia/Estonia, CZ – Czechy/Czechia, PT – Portugalia/Portugal, HR – Chorwacja/Croatia, SK – Słowacja/Slovakia, SI – Słowenia/Slovenia, LT – Litwa/Lithuania, HU – Węgry/Hungary, PL – Polska/Poland, RO – Rumunia/Romania, LV – Łotwa/Latvia, BG – Bułgaria/Bulgaria

Ryc. 1. Ranking krajów członkowskich UE pod względem produktywności pracy w rolnictwie w latach 2007–2009

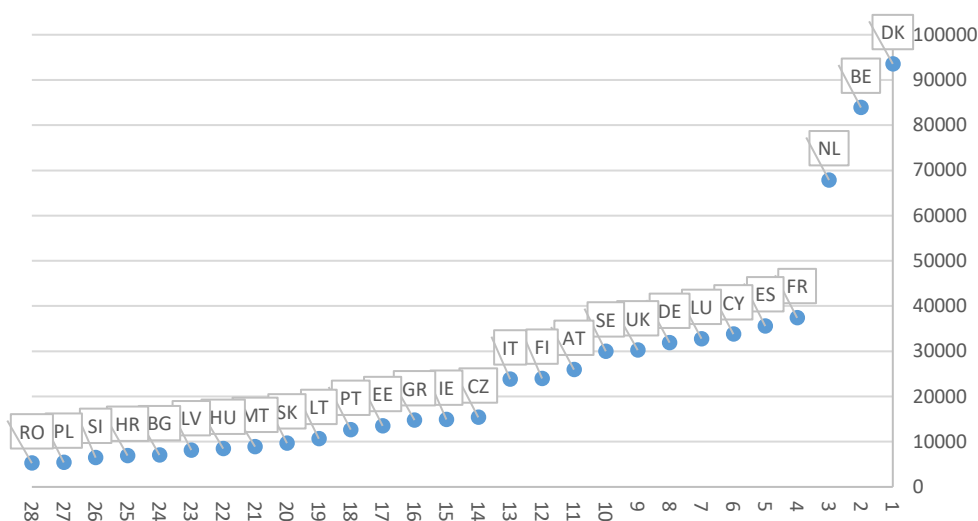
Fig. 1. Ranking of EU member states in terms of labour productivity in agriculture in 2007–2009

W obu analizowanych okresach pierwsze trzy miejsca przypadły Belgii, Danii i Holandii, jednak zmieniła się kolejność tych krajów w rankingu. W latach 2007–2009 w pierwszej dziesiątce nie znajdował się żaden kraj z grupy krajów nowoprzyjętych do UE (UE-13), natomiast w okresie 2019–2021 szóstą lokatę zajmował Cypr (awans z miejsca 14).

Spośród grupy krajów UE-13 poza Cyprem awans w rankingu odnotowały Czechy, Litwa, Słowacja, Bułgaria i Łotwa. Jednocześnie pogorszenie pozycji w analizowanej grupie dotyczyło Malty, Chorwacji, Polski, Rumunii i Słowenii (ryc. 3). Nadal jednak dziesięć krajów z grupy UE-13 zajmowało średnio w latach 2019–2021 ostatnie lokaty. Zatem zmiany w rankingu raczej dotyczyły przesunięć w grupie UE-13, a nie doganiania krajów tzw. starej Unii.

Rankingi odwrócone dla średnich z lat 2007–2009 i 2019–2021 opracowano także dla wskaźnika produktywności ziemi (ryc. 4 i ryc. 5).

Ranking krajów w latach 2019–2021/ Country ranking in 2019–2021



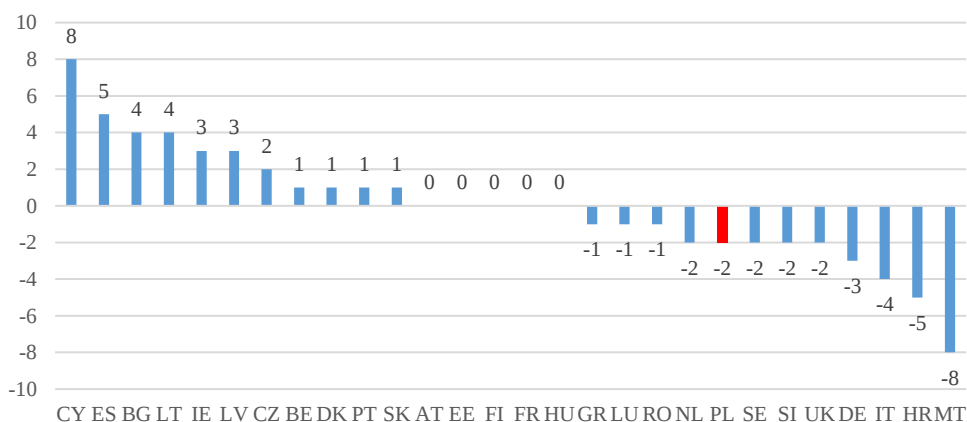
Objaśnienia jak na ryc. 1/ Explanations as in fig. 1.

Ryc. 2. Ranking krajów członkowskich UE pod względem produktywności pracy w rolnictwie w latach 2019–2021 roku

Fig. 2. Ranking of EU member states in terms of agricultural labour productivity in 2019–2021

Zmiany pozycji krajów w rankingach produktywności pracy w rolnictwie (2007–2021)

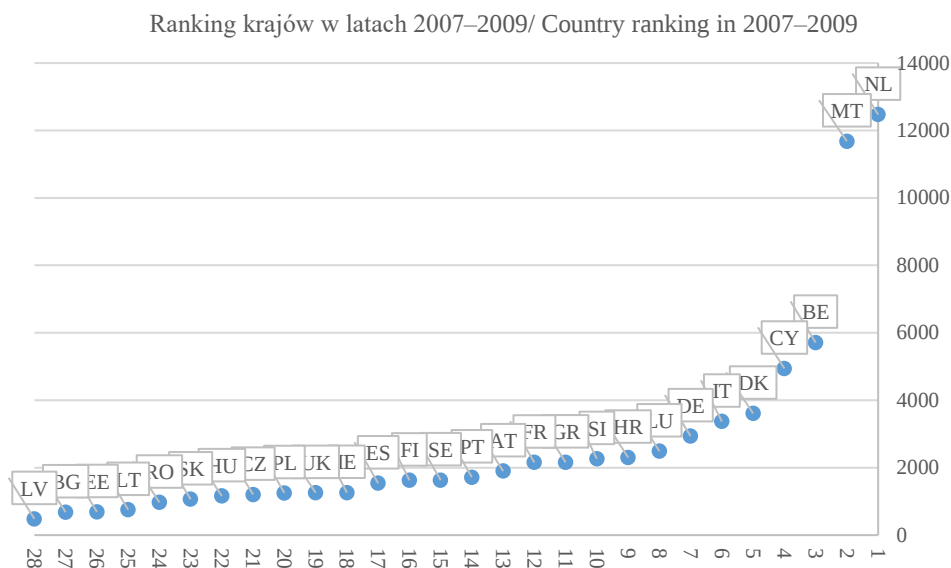
Changes in the position of countries in the agricultural labour productivity rankings (2007–2021)



Objaśnienia jak na ryc. 1/ Explanations as in fig. 1

Ryc. 3. Zmiany pozycji krajów w rankingach produktywności pracy w rolnictwie (2007–2021)

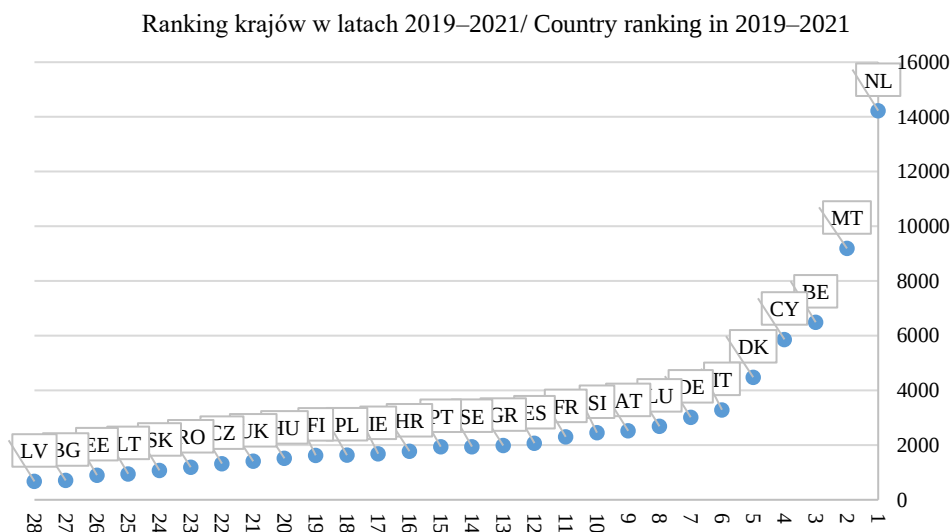
Fig. 3. Changes in the position of countries in the agricultural labour productivity rankings (2007–2021)



Objaśnienia jak na ryc. 1 / Explanations as in fig. 1

Ryc. 4. Ranking krajów członkowskich UE pod względem produktywności ziemi w rolnictwie w latach 2007–2009

Fig. 4. Ranking of EU member states in terms of land productivity in agriculture in 2007–2009

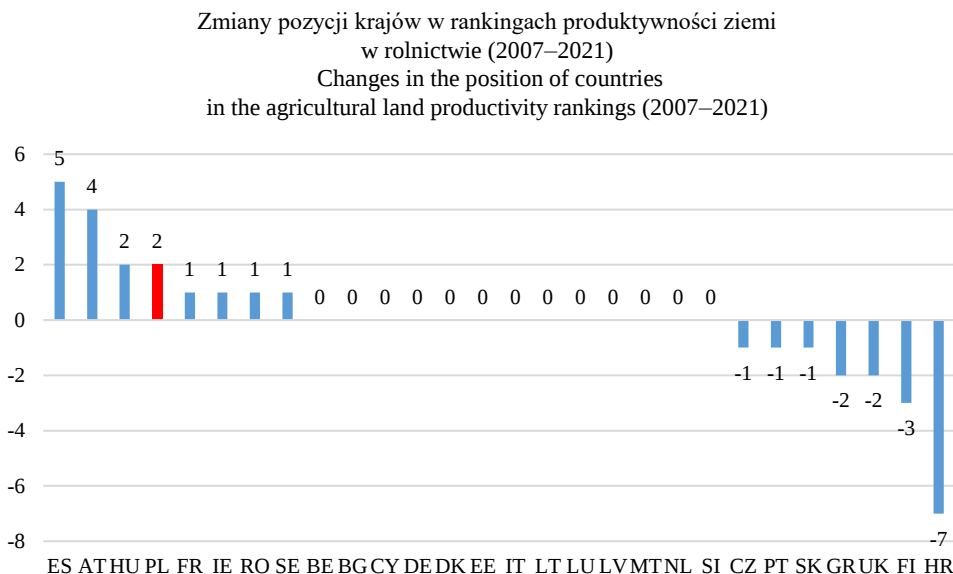


Objaśnienia jak na ryc. 1 / Explanations as in fig. 1

Ryc. 5. Ranking krajów członkowskich UE pod względem produktywności ziemi w rolnictwie w latach 2019–2021

Fig. 5. Ranking of EU member states in terms of agricultural land productivity in 2019–2021

W obu badanych okresach liderem spośród krajów UE pozostawała Holandia, a za nią lokowała się Malta. Pozycja pierwszych ośmiu oraz czterech ostatnich krajów nie zmieniła się w badanym okresie. Awans w rankingu odnotowały Francja, Austria, Szwecja, Hiszpania, Irlandia, Polska, Węgry i Rumunia, spadek natomiast – Chorwacja, Grecja, Portugalia, Finlandia, Wielka Brytania, Czechy i Słowacja (ryc. 6). Zmiany te były jednak niewielkie (poza Chorwacją, Hiszpanią i Austrią) i w wielu przypadkach oznaczały spadek lub wzrost o jedną lokatę.



Objaśnienia jak na ryc. 1 / Explanations as in fig. 1

Ryc. 6. Zmiany pozycji krajów w rankingach produktywności ziemi w rolnictwie (2007–2021)
Fig. 6. Changes in the position of countries in the agricultural land productivity rankings
(2007–2021)

W tabeli 3 zaprezentowano współczynniki dynamiki oraz średnioroczne tempo zmian produktywności pracy i ziemi w rolnictwie krajów członkowskich UE w latach 2007–2021. Z uwagi na długi okres badawczy dynamikę zbadano porównując średnie z ostatnich trzech lat ze średnimi z pierwszych trzech lat okresu. Z przedstawionych danych wynika, że w rolnictwie polskim produktywność badanych czynników produkcji wzrosła. Współczynniki dynamiki w obu przypadkach były wyższe niż średnia dynamika we wszystkich krajach członkowskich UE. Dynamika zmian produktywności pracy w polskim rolnictwie była o 11,7 pp wyższa niż średnia dla krajów unijnych. Sytuowało to polskie rolnictwo na 8. miejscu wśród krajów członkowskich. Jednocześnie Polska znalazła się w grupie krajów nowoprzyjętych odznaczających się ponadprzeciętnym tempem wzrostu produktywności pracy, przy poziomie wskaźnika kształtującym się nadal poniżej średniej unijnej. Liderem pod względem tempa zmian produktywności pracy w Unii Europejskiej okazały się Litwa, Bułgaria, Cypr i Łotwa, gdzie wskaźnik dynamiki przekraczał 200%.

Tabela 3. Dynamika oraz średnioroczne tempo zmian produktywności pracy i ziemi w rolnictwie krajów członkowskich UE w latach 2007–2021 (%)

Table 3. Dynamics and average annual rate of change in labour and land productivity in agriculture in EU member states in 2007–2021 (%)

Kraj członkowski Member state	Dynamika (2019–2021 Dynamics (2007–2021))		Średnioroczne tempo zmian (%) Average annual rate of change (%)	
	Produktywność pracy Labour productivity	Produktywność ziemi Land productivity	Produktywność pracy Labour productivity	Produktywność ziemi Land productivity
Belgia/Belgium	178,2	113,7	4,5	0,9
Bułgaria/Bulgaria	257,2	103,9	11,6	2,2
Czechy/Czechia	139,3	110,2	4,5	1,0
Dania/Denmark	159,4	124,2	2,3	1,7
Niemcy/Germany	98,4	102,8	0,7	0,4
Estonia/Estonia	140,7	131,0	1,0	1,5
Irlandia/Ireland	155,7	133,8	3,1	1,7
Grecja/Greece	132,1	91,9	3,1	-2,1
Hiszpania/Spain	162,8	134,6	3,7	2,2
Francja/France	113,9	106,8	1,1	0,0
Chorwacja/Croatia	95,8	77,1	0,9	-1,7
Włochy/Italy	108,3	97,7	0,5	0,3
Cypr/Cyprus	264,4	118,7	8,7	1,6
Łotwa/Latvia	279,1	139,3	8,7	2,2
Litwa/Lithuania	214,7	126,2	7,6	2,2
Luksemburg Luxembourg	114,7	108,0	1,4	1,1
Węgry/Hungary	147,1	131,0	5,3	2,9
Malta/Malta	67,3	78,7	-2,8	-1,5
Holandia/Netherlands	115,2	114,1	1,3	1,0
Austria/Austria	122,7	132,9	1,8	2,4
Polska/Poland	163,5	130,5	4,3	2,1
Portugalia/Portugal	155,0	113,1	4,1	1,3
Rumunia/Romania	179,9	123,0	5,8	2,7
Słowenia/Slovenia	146,8	108,5	1,4	0,2
Słowacja/Slovakia	164,9	101,1	5,8	0,3
Finlandia/Finland	155,3	100,2	2,5	-0,4
Szwecja/Sweden	109,3	119,2	0,6	1,2
Wielka Brytania/ United Kingdom	108,3	112,2	0,4	1,0
UE-28/EU-28	137,0	107,5	2,6	0,6

Źródło: jak w tab. 1 / Source: See tab. 1

Warto zwrócić uwagę, że najwyższe średniookresowe tempo zmian charakterystyczne było dla Bułgarii (11,6%). W Polsce (4,3%) było ono znacznie wyższe niż przeciętnie

w UE (2,6%). Wśród krajów, w których w analizowanym okresie produktywność pracy uległa pogorszeniu znalazły się Malta, Chorwacja oraz Niemcy. Natomiast biorąc pod uwagę tylko lata skrajne okresu badawczego oraz średnioroczne tempo zmian, spadek taki obserwuje się jedynie na Malcie.

W latach 2007–2021 w rolnictwie polskim odnotowano również poprawę produktywności ziemi. Dynamika zmian była w Polsce o 22,9 pp wyższa niż średnia unijna. Tym samym polskie rolnictwo uplasowało się na 7. miejscu ze względu na dynamikę zmian efektywności wykorzystania czynnika ziemi. Podobnie jak w przypadku produktywności pracy, tutaj Polska również znalazła się w grupie krajów „goniących” średnią unijną, tzn. cechujących się niskim poziomem produktywności ziemi, która w analizowanym okresie rosła jednak szybciej niż średnia unijna. Potwierdza to także średniookresowe tempo zmian, zgodnie z którym średnioroczny wzrost produktywności pracy wynosił 2,1%, przy średniej unijnej 0,6%. Wyższą niż w Polsce dynamiką wzrostu efektywności czynnika ziemi cechowało się rolnictwo hiszpańskie, łotewskie, austriackie, irlandzkie, węgierskie i estońskie. Natomiast w Grecji, Chorwacji, na Malcie i we Włoszech odnotowano spadek efektywności wykorzystania czynnika ziemi. W większości krajów UE-13 średnioroczne tempo zmian produktywności analizowanego czynnika produkcji było relatywnie wysokie. Liderem pod tym względem było rolnictwo węgierskie, które poprawiło swoją lokatę w UE (z 22. na 20.).

Jako przyczyny zróżnicowania poziomu produktywności czynników produkcji w rolnictwie krajów członkowskich UE wskazuje się w literaturze uwarunkowania przyrodnicze i kulturowe, odmienną historię systemów politycznych krajów, różny poziom rozwoju gospodarczego, relacje pomiędzy czynnikiem ziemi i pracy, poziom nawożenia, mechanizację, innowacyjność, zmiany strukturalne, a także czynnik instytucjonalny i kapitał ludzki [Martín-Retortillo i Pinilla 2012, Kijek i in. 2020, Bereźnicka i Wicki 2023]. Przeprowadzone badania wykazały, że krajami o najwyższej produktywności pracy były Holandia, Belgia i Dania, a produktywności ziemi – Holandia, Malta i Belgia. W badaniach obejmujących lata 1973–2002, Ball i in. [2010] także wykazali, że Dania, Belgia i Holandia były krajami o najwyższej produktywności rolnictwa. Natomiast niska produktywność pracy i ziemi w polskim rolnictwie wynika m.in. z problemów strukturalnych, w tym relatywnie wysokich zasobów pracy oraz rozdrobnionej struktury obszarowej [Kołodziejczak 2015, Rodzinka i in. 2021]. W 2021 r. w polskim rolnictwie zatrudnionych było ponad 8% ogółu pracujących, podczas gdy w większości krajów UE wskaźnik ten zawiera się w przedziale 1–3%. Czyżewski i Staniszewski [2016] podkreślają ponadto, że poziom produktywności poszczególnych nakładów zależy od ich wzajemnej relacji. Również Floriańczyk i Rembisz [2023] stwierdzają, że relacje zachodzące między czynnikami produkcji w rolnictwie determinują procesy gospodarowania w ujęciu statycznym i dynamicznym, w tym efektywność, opłacalność, dochodowość. Na przykładzie Polski oraz wybranych krajów UE dowodzą oni, że następuje ubytek czynnika pracy i ubytek czynnika ziemi przy niejednoznacznym kierunku zaangażowania czynnika kapitału. Przy stałym zwiększaniu produkcji odpowiada temu wzrost produktywności tych czynników, najmniejszy w przypadku czynnika kapitału, bo pełni on nie tylko funkcje wzrostowe, ale i substytucyjne w stosunku do pozostałych czynników. Warto zwrócić tu uwagę na relację pomiędzy czynnikiem pracy i ziemi. W 2021 r. na 100 ha użytków rolnych przypadało w Polsce prawie 10 osób pełnozatrudnionych (AWU) w rolnictwie, podczas gdy w grupie krajów UE-15 zaledwie 4 AWU [EUROSTAT 2024]. Baer-Nawrocka i Poczta [2024] zauważają

ponadto, że wyposażenie jednego pełnozatrudnionego w ziemię i kapitał nadal pozostaje w Polsce jednym z niższych w rolnictwie państw UE. Konsekwencją tego jest wciąż relatywnie niska wydajność czynnika pracy, co obok względnie niskiej produktywności ziemi ma negatywny wpływ na pozycję konkurencyjną polskiego rolnictwa. Podobny problem dotyczy też kilku krajów Europy Środkowej i Wschodniej będących członkami UE, a szczególnie Bułgarii i Rumunii.

PODSUMOWANIE

Celem badań była ocena pozycji polskiego rolnictwa w Unii Europejskiej pod względem produktywności ziemi i pracy. Produktywność oceniano na podstawie wskaźników produktywności cząstkowej. Analiza przeprowadzona dla lat 2007–2021 wskazuje, że Polska była krajem o jednej z najniższych wartości produktywności pracy w rolnictwie. Pod względem produktywności ziemi, polskie rolnictwo osiągało lepszą pozycję, jednak wartość tego wskaźnika była prawie 2-krotnie niższa niż średnio w UE. W badanym okresie w rolnictwie polskim współczynniki produktywności obu badanych czynników produkcji wzrastały szybciej niż średnio we wszystkich krajach członkowskich UE. Polska znalazła się w grupie krajów nowoprzyjętych „goniących” średnią unijną pod względem produktywności pracy i ziemi, tzn. odznaczających się ponadprzeciętnym tempem wzrostu współczynników produktywności pracy i ziemi, przy poziomie wskaźników kształtującym się nadal poniżej średniej unijnej. Wykazano jednocześnie, że Polska pogorszyła swoją pozycję w rankingu krajów pod względem produktywności pracy, podczas gdy kraje takie, jak Łotwa, Litwa czy Bułgaria odnotowały wzrost. Przyczyn można doszukiwać się m.in. w zbyt wolnym tempie przekształceń strukturalnych w polskim rolnictwie, w tym w rozdrobnieniu agrarnym oraz we wciąż zbyt wysokim poziomie zatrudnienia w tym sektorze.

Ponadto w toku całej analizy zaobserwowano różnice pomiędzy starymi i nowymi krajami członkowskimi, zarówno pod względem poziomu współczynników produktywności cząstkowej, jak również tempa zmian badanych miar. Większość nowych krajów członkowskich cechowała się niskim poziomem miar produktywności cząstkowej i znalazła się w końcówce rankingu wśród krajów członkowskich. W przypadku polskiego rolnictwa wskazuje to na potrzebę kontynuowania procesu przekształceń strukturalnych. Wprawdzie sektor ten przeszedł już głębokie zmiany strukturalne i modernizacyjne, jednak nie są one wciąż wystarczające, aby zmniejszyć dystans dzielący Polskę od krajów UE-15 o wysokim poziomie rozwoju rolnictwa. Przeprowadzone badania dają ogólny ogląd pozycji polskiego rolnictwa w UE oraz tempa zmian produktywności ziemi i pracy. Wskazują one także na potrzebę prowadzenia dalszych badań, które pozwoliłyby na wskazanie najważniejszych determinant wzrostu produktywności w rolnictwie oraz na rozpatrzenie procesów substytucji czynników produkcji w rolnictwie pod kątem możliwości poprawy efektywności ich wykorzystania.

PIŚMIENNICTWO

- Adamowicz M., 2021. Procesy rozwojowe rolnictwa w kontekście wyzwań globalizacji i nowych ujęć koncepcji zrównoważonego rozwoju. *Zag. Ekon. Rol.* 1(366), 24–45. <https://doi.org/10.30858/zer/132395>
- Baer-Nawrocka A., Markiewicz N., 2013. Relacje między czynnikami produkcji a efektywność wytwarzania w rolnictwie Unii Europejskiej. *J. Agribus. Rur. Develop.* 3, 5–16.
- Baer-Nawrocka A., Poczta W., 2024. *Przemiany w rolnictwie*. W:] W. Poczta, A. Hałasiewicz (red.), *Polska Wieś 2024. Raport o stanie wsi, 20 lat w UE*. Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa, 33–48.
- Ball V. E., Butault J.P., San Juan C., Mora R., 2010. Productivity and international competitiveness of agriculture in the European Union and the United States. *Agric. Econ.* 41, 611–627.
- Baráth, L., Fertő, I., 2016. Agricultural Productivity in the EU: A TFP Comparison between the Old (EU-15) and New (EU-10) EU Member States. Paper prepared for presentation for the 142nd EAAE Seminar Growing Success? Agriculture and rural development in an enlarged EU May 29–30. Corvinus University of Budapest, Hungary. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.168923>
- Baráth, L., Fertő, I., 2023. The relationship between the ecologisation of farms and total factor productivity: A continuous treatment analysis. *J. Agric. Econ.* 75(1), 404–424. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12563>
- Bereznicka J., Wicki L., 2023. Zmiany efektywności ziemi i pracy w polskim rolnictwie w ujęciu regionalnym. *Rocz. Nauk. SERiA*, 25(2), 23–39. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.340009>
- Bezat-Jarzębowska A., Rembisz W., 2016. Produktywność czynnika ziemia a jego zasób. *Probl. Rol. Świat.* 16(2), 9–18. <https://doi.org/10.22630/PRS.2016.16.2.22>
- Bokusheva R., Čechura L., 2017. Evaluating dynamics, sources and drivers of productivity growth at the farm level. *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*. No. 106. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/5f2d0601-en>
- Czyżewski A., 2015. *Teoriopoznawcze przesłanki rozwoju rolnictwa rodzinnego*. W:] A. Chlebicka (red.), *Ekonomiczne mechanizmy wspierania i ochrony rolnictwa rodzinnego w Polsce i innych państwach Unii Europejskiej*. FAPA, Warszawa, 9–35. <https://doi.org/10.22630/EIOGZ.2018.124.26>
- Domagała J., 2021. Economic and environmental aspects of agriculture in the EU countries. *Energies* 14, 7826. <https://doi.org/10.3390/en14227826>
- EUROSTAT, 2024. Database. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [dostęp: 21.06.2024].
- Filho J.E.R.V., Fornaziera A., 2016. Agricultural productivity: closing the gap between Brazil and the United States. *Epal Rev.* 118, 203–220. <https://doi.org/10.18356/51be7f21-en>
- Floriańczyk Z., Rembisz W., 2023. Changes in production factor relations and their determinants in agriculture in selected European Union countries. *Probl. Agric. Econ.* 377(4), 26–51. <https://doi.org/10.30858/zer/176771>
- Góral J., Rembisz W., 2017. Wynagrodzenia i wydajność pracy w rolnictwie polskim na tle pozostałych krajów Unii Europejskiej. *Zeszyty Naukowe SGGW – Ekon.i Organ. Gosp. Żywn.* 119, 119–139. <https://doi.org/10.22630/EIOGZ.2017.119.29>
- GUS, 2022. Bank Danych Lokalnych. <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/start> [dostęp: 21.06.2024].
- Guth M., Smędzik-Ambroży K., 2020. Economic resources versus the efficiency of different types of agricultural production in regions of the European Union. *Econ. Res. Ekon. Istraživanja* 33, 1036–1051. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1585270>
- Hurduzeu G., Pânzaru R.L., Medelele D.M., Ciobanu A., Enea C., 2022. The development of sustainable agriculture in EU countries and the potential achievement of Sustainable Development Goals Specific Targets (SDG 2). *Sustainability* 14, 15798. <https://doi.org/10.3390/su142315798>

- Kijek A., Kijek T., Nowak A., 2020. Club convergence of labour productivity in agriculture: Evidence from EU countries. *Agric. Econ.* – Czech 66, 391–401. <https://doi.org/10.17221/178/2020-agricecon>
- Kisielińska J., 2019. Koncentracja czynników produkcji i wsparcia a ich produktywność w gospodarstwach rolniczych krajów UE. *Annals PAAAE* 21(4), 204–214. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5484>
- Kołodziejczak M., 2014. Efektywność wykorzystania czynników produkcji w rolnictwie polskim i niemieckim w latach 2004–2012. *Rocz. Nauk. Ekon. Rol. Rozw. Obsz. Wiej.* 101(2), 70–79. <https://doi.org/10.22630/RNR.2014.101.2.20>
- Kołodziejczak M., 2015. Efektywność wykorzystania czynników produkcji w rolnictwie polskim na tle Unii Europejskiej. *Wież Rol.* 2(167), 169–192. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.230421>
- Latruffe, L., 2010. Competitiveness, productivity and efficiency in the agricultural and agri-food sectors. *OECD Food, Agric. Fisheries Pap.* 30. <https://doi.org/10.1787/5km91nkdtd6d6-en>
- Leimane I., Krieviņa A., Melece L., 2017. Productivity performance in agriculture: Comparison of the Baltic Countries. *Res. Rur. Develop.* 2, 89–96. <https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.054>
- Martín-Retortillo M., Pinilla V., 2012. Why did agricultural labour productivity not converge in Europe from 1950 to 2005?. *EHES Work. Pap. Econ. Hist.* 25. https://ehes.org/wp/EHES_No25.pdf [dostęp: 21.06.2024].
- Nowak A., 2020. Produktywność pracy w gospodarstwach rolnych w Polsce w zależności od ich wielkości ekonomicznej. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, sec. H – Oecon.* 54(3), 79–89. <https://doi.org/10.17951/h.2020.54.3.79-89>
- Nowak A., Janulewicz P., Krukowski A., Bujanowicz-Haraś B., 2016. Diversification of the level of agricultural development in the member states of the European Union. *Cah. Agric.* 25: 55004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016040>
- Nowak, A., Marczak, P., 2021. Miejsce rolnictwa w gospodarce krajów członkowskich Unii Europejskiej. *Agron. Sci.* 76(1), 85–96. <https://doi.org/10.24326/as.2021.1.6>
- O'Donnell, C.J., 2010. Measuring and decomposing agricultural productivity and profitability change. *Austral. J. Agric. Resource Econ.* 54, 527–560. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2010.00512.x>
- Official Journal of the European Union, 2004. Regulation (Ec) No 138/2004 of the European Parliament and of the Council of 5 December 2003 on the economic accounts for agriculture in the Community. *L* 33/1, 5.2.2004.
- Pawlak K., Smutka L., Kotyza P., 2021. Agricultural Potential of the EU Countries: How far are they from the USA?. *Agriculture* 11(4): 282. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040282>
- Pułaska-Turyna B., 2011. *Statystyka dla ekonomistów*. Difin, Warszawa, 373.
- Rodzinka J., Skica T., Pomianek T., 2021. Productivity and competitiveness of the agricultural sector in Poland. *Yearbook Antitrust Regulatory Stud.* 14(24), 139–159. <https://doi.org/10.7172/1689-9024.YARS.2021.14.24.6>
- Rzeszutko A., Kita K., 2018. Competitiveness of Polish agriculture compared to the agriculture of the selected EU countries under the CAP. *Rur. Areas Develop.* 15, 57–70. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.291825>
- Smędzik-Ambroży K., Rutkowska M., Kirbaś H., 2019. Productivity of the Polish agricultural sector compared to European Union member states in 2004–2017 based on FADN farms. *Annals PAAAE* 21(3), 422–431. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.3447>
- Thuczak A., 2020. Diversity of the selected elements of agricultural potential in the European Union countries. *Agric. Econ. Czech.* 66, 260–268. <https://doi.org/10.17221/381/2019-AGRICECON>
- Wicki L., 2019. Wielkość a efektywność gospodarstw rolniczych. *Annals PAAAE*, 21(2), 285–296. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2212>
- Wicki L., 2021. Rola postępu technologicznego we wzroście produkcji rolnej w nowych członkowskich krajach Unii Europejskiej. *Annals PAAAE* 23(1), 82–96. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.7880>

- Zawalińska, K., Majewski, E., Wąs, A., 2015. Długookresowe zmiany w dochodach z polskiego rolnictwa na tle krajów Unii Europejskiej. *Roczniki Naukowe SERiA* 17(6), 346-354. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.233528>
- Zegar J.S., 2010. Ekonomia wobec kwestii agrarnej. *Ekonomista* 6, 779-804.

Abstract. The aim of the study was to assess the position of Polish agriculture in the European Union (EU) regarding land and labour productivity. The study period was from 2007 to 2021, realised using the EUROSTAT database. The analysis was carried out on the basis of partial productivity indicators and the dynamics of its changes. Poland featured one of the lowest labour productivity values in agriculture. In terms of land productivity, Polish agriculture performed better; however, the value of this indicator was almost two times lower than the EU average. In the fifteen years under review, productivity indicator of both analysed production factors in Polish agriculture increased steadily. This places Poland among new member states “catching up with” the EU average in terms of labour and land productivity, i.e. featuring an above-average growth rate of the discussed coefficients. Yet, their mean level remains below the EU average. Despite a relatively high labour productivity growth rate (163.5%), Poland’s position in the ranking of EU countries has deteriorated (down from 25th to 27th place). This indicates the need for further structural transformations, especially the outflow of excess labour in agriculture. On the other hand, in terms of land productivity, Poland moved up from 20th to 18th place.

Keywords: agriculture, productivity, European Union, Poland, EU member states

Otrzymano/Received: 4.07.2024

Zaakceptowano/Accepted: 4.12.2024

Opublikowano/Publication: 13.01.2025



Katedra Zarządzania i Marketingu, Wydział Agrobioinżynierii, Uniwersytet Przyrodniczy
w Lublinie, ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin, Polska
e-mail: eugenia.czernyszewicz@up.lublin.pl

EUGENIA CZERNYSZEWICZ 

Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego w świetle globalnych uwarunkowań demograficznych, klimatycznych i społeczno-ekonomicznych

Ensure food security is given demographic, climatic, and socio-economic
considerations

Abstrakt. W pracy podjęto problematykę bezpieczeństwa żywnościowego, którego zapewnienie jest związane z prawem człowieka do życia i rozwoju. Celem artykułu jest wskazanie i określenie uwarunkowań demograficznych, społeczno-ekonomicznych i klimatycznych mających wpływ na zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego na poziomie globalnym. Jest to ważne zagadnienie, ponieważ na przestrzeni lat rosną problemy i wyzwania związane z brakiem bezpieczeństwa żywnościowego, likwidacją głodu i niedożywienia w różnych regionach świata, a z drugiej strony obserwujemy zmiany klimatyczne, konflikty społeczne i pogłębienie nierówności w dostępie do żywności. Problematykę zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego analizowano przy zastosowaniu metody przeglądu literatury, pozyskanej z krajowych i zagranicznych baz danych. Stwierdzono, że na różne wymiary bezpieczeństwa żywnościowego wpływa wiele różnorodnych czynników, których zakres i siła oddziaływania zależy od skali ich rozpatrywania.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, żywność, uwarunkowania klimatyczne, uwarunkowania demograficzne, uwarunkowania społeczne

WSTĘP

Bezpieczeństwo żywnościowe jest podstawowym prawem człowieka [Kemmerling i in. 2022]. Jednak procesy demograficzne, obserwowane zmiany klimatyczne, lokalne

Cytowanie: Czernyszewicz E., 2024. Zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego w świetle globalnych uwarunkowań demograficznych, klimatycznych i społeczno-ekonomicznych. Agron. Sci. 79(3), 129–142. <https://doi.org/10.24326/as.2024.5406>

konflikty oraz ogólnoświatowe wstrząsy gospodarcze przyczyniają się do problemów z jego zapewnieniem i niedożywieniem części populacji w różnych regionach świata. Bezpieczeństwo żywnościowe należy rozpatrywać w wielu wymiarach, ponieważ oznacza ono nie tylko proste zaspokojenie popytu na żywność, ale także stabilny dostęp do żywności, gwarantującej pożywną dietę w celu zapewnienia życia i zdrowia ludzi [Schmidhuber i Tubiello 2007]. Na przestrzeni lat wyzwania związane z brakiem bezpieczeństwa żywnościowego oraz wszelkich form niedożywienia i głodu potęgowały się, a pandemia COVID-19 jeszcze bardziej pogłębiła ten proces istotnie zakłócając popyt i łańcuchy dystrybucyjne żywności [Barman i in. 2021]. Inny kryzys międzynarodowy z ostatnich lat – wojna na Ukrainie – przyczynił się również do poważnego zakłócenia łańcucha dostaw i cen żywności oraz nawozów i energii [Gross 2022, Hatab i Lagerkvist 2024]. W związku ze wzrostem populacji prognozuje się, że do 2050 r. globalne zapotrzebowanie na żywność może się podwoić w stosunku do poziomu z 2000 r. [Fischer i in. 2014]. Również obserwowane zamiany klimatu, a zwłaszcza trend ocieplenia będzie miał istotne wieloaspektowe skutki dla systemu produkcji żywności [Karaczun i Kozyra 2020], związane między innymi z degradacją gleb i zmniejszeniem jej zasobów, zwłaszcza na terenach nadmorskich i depresyjnych [Pawłowski 2022]. Ponadto zmiany klimatu powodują zmiany warunków agroekologicznych, co pośrednio może wpływać na dystrybucję dochodów oraz popyt na produkty rolne. Zagrożenia biotyczne wynikające z rosnącej presji chorób i szkodników, zmniejszenia różnorodności uprawianych gatunków [Khoury i in. 2014], koncentracji produkcji [Campi i in. 2021] i zmian w użytkowaniu gruntów [Wheeler i von Braun 2013] mogą również istotnie zakłócić zrównoważenie systemu żywnościowego w różnych regionach na świecie. Wskazanie wpływu tych czynników na zidentyfikowane w literaturze wymiary bezpieczeństwa żywnościowego stanowi lukę badawczą.

Celem artykułu jest wskazanie i określenie na podstawie literatury przedmiotu uwarunkowań demograficznych, społeczno-ekonomicznych i klimatycznych mających wpływ na różne wymiary zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego na poziomie globalnym. Przyjęto następujące cele szczegółowe:

- rozpoznanie i analiza istoty i wymiarów bezpieczeństwa żywnościowego,
- przedstawienie różnych aspektów uwarunkowań demograficznych mających wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe,
- ukazanie wpływu zmian klimatycznych na różne wymiary bezpieczeństwa żywnościowego,
- objaśnienie wpływu czynników społecznych i ekonomicznych na bezpieczeństwo żywnościowe i jego wymiary,
- rozpoznanie wpływu kryzysów międzynarodowych na problem zapewnienia bezpieczeństwa żywności w skali globalnej, w tym pandemii COVID-19 i trwającej wojny na Ukrainie,
- wskazanie wpływu i zakresu wybranych ograniczeń biotycznych na zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego.

MATERIAŁ I METODY

Pracę wykonano na podstawie przeglądu literatury naukowej i stron internetowych organizacji zajmujących się analizowanym problemem. Zastosowano podejście integracyjne do przeglądu literatury [Snyder 2019]. Literaturę naukową pozyskano przy wykorzystaniu

internetowych baz danych oraz wyszukiwarek, w tym Google Scholar. Korzystano z naukowych baz danych krajowych i zagranicznych, takich jak: BazEkon, Science Direct, Scopus, Springer oraz Web of Science. Poszukiwano literatury z użyciem słów kluczowych, takich jak: bezpieczeństwo żywnościowe, bezpieczeństwo żywności, w połączeniu z terminami demografia, zmiany klimatu, uwarunkowania społeczne i uwarunkowania ekonomiczne oraz wojna na Ukrainie. Zebrana literatura pozwoliła określić lukę badawczą, zdefiniować problem badawczy, określić cel badań i przeanalizować zagadnienia z nim związane. W analizie problemu badawczego określono uwarunkowania demograficzne, klimatyczne, społeczne, ekonomiczne i biotyczne zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego głównie na poziomie globalnym, ale również regionalnym, lokalnym i indywidualnym.

POJĘCIE I WYMIARY BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOSTCIOWEGO

Bezpieczeństwo żywnościowe i bezpieczeństwo żywności są podstawowymi składnikami prawa człowieka do życia i rozwoju. Zostało ono uznane w Powszechnej Deklaracji Praw Człowieka ONZ z 1948 r. Według FAO (Food and Agriculture Organization) i WHO (World Health Organization) nie można zagwarantować bezpieczeństwa żywnościowego z pominięciem bezpieczeństwa żywności [Wiśniewska i Wyrwa 2022]. Organizacja ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) definiuje bezpieczeństwo żywnościowe jako „sytuację, która istnieje, gdy wszyscy ludzie przez cały czas mają fizyczny, społeczny i ekonomiczny dostęp do wystarczającej, bezpiecznej i pożywnej żywności, która spełnia ich potrzeby żywieniowe i preferencje żywieniowe dla aktywnego i zdrowego życia”.

W literaturze wyróżnia się cztery główne wymiary bezpieczeństwa żywnościowego: dostępność, stabilność, wykorzystanie i dostęp. Dostępność dotyczy zapewnienia wystarczającej ilości żywności, co oznacza ogólną zdolność systemu rolnego do zaspokojenia popytu na żywność. Swoim zakresem wymiar ten obejmuje agroklimatyczne podstawy produkcji roślinnej i pastwiskowej oraz czynniki społeczno-ekonomiczne i kulturowe, które określają, gdzie i jak rolnicy funkcjonują na rynkach, a więc produkcję i handel żywnością. Wymiar stabilności, odnosi się do osób, które są narażone na wysokie ryzyko tymczasowej lub trwałej utraty dostępu do zasobów potrzebnych do spożywania odpowiedniej żywności, ponieważ osoby te nie są w stanie zabezpieczyć się *ex ante* przed szokami dochodowymi lub nie mają wystarczających „rezerw” na konsumpcję *ex post*, lub jedno i drugie. Ważną przyczyną niestabilnego dostępu do żywności jest zmienność klimatu, np. bezrobotni pracownicy rolni, którzy prawie całkowicie zależni są od płac w rolnictwie w regionie o nieregularnych opadach i mający niewielkie oszczędności, są narażeni na duże ryzyko utraty dostępu do żywności. Trzeci wymiar obejmuje dostęp jednostek do odpowiednich zasobów (towarów) w celu nabycia odpowiedniej żywności dla zapewnienia pożywnej diety. Kluczowym elementem jest więc siła nabywcza konsumentów oraz wysokość realnych dochodów i cen żywności. Czwarty wymiar obejmuje wszystkie aspekty żywienia związane z jakością i bezpieczeństwem żywności, a jego podwymiary są związane ze zdrowiem, w tym z warunkami sanitarnymi w całym łańcuchu żywnościowym. Ważne jest, aby osoby otrzymywały nie tylko odpowiednią ilość jedzenia, ale także, aby żywność nie powodowała niekorzystnych skutków dla zdrowia i życia [Schmidhuber i Tubiello 2007]. Uwzględniając powyższe wymiary, nie można zagwarantować bezpieczeństwa żywnościowego z pominięciem bezpieczeństwa żywności.

Do głównych czynników braku bezpieczeństwa żywnościowego i niedożywienia należy zaliczyć: rosnącą populację mieszkańców ziemi, zmiany klimatu i związane z nimi ekstremalne warunki klimatyczne (w tym zwiększającą się emisję gazów cieplarnianych, wzrost stężenia dwutlenku węgla (CO₂) w atmosferze, zmniejszanie się powierzchni gruntów ornych), konflikty, włączając w to trwającą wojnę na Ukrainie, wstrząsy gospodarcze w połączeniu z rosnącymi nierównościami, pandemia COVID-19 i inne.

UWARUNKOWANIA DEMOGRAFICZNE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOSCIOWEGO

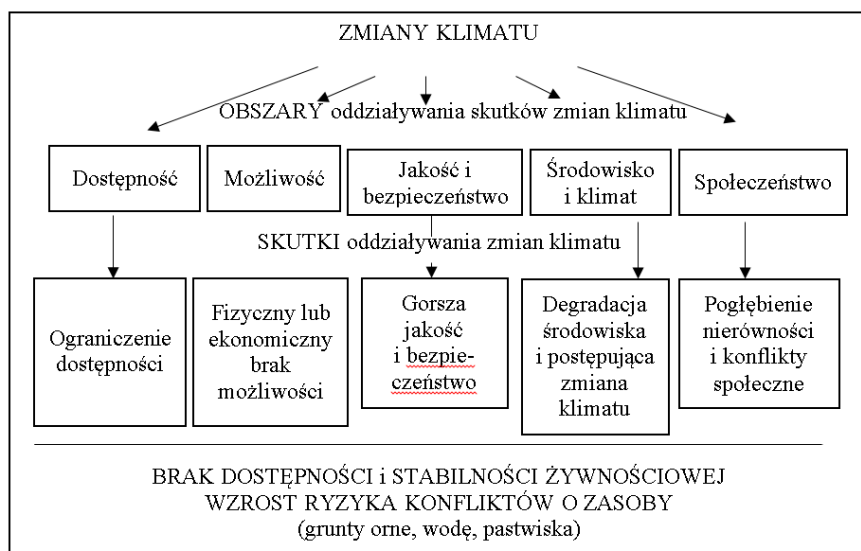
Na przestrzeni lat rosną problemy i wyzwania związane z brakiem bezpieczeństwa żywnościowego, likwidacją głodu i wszelkich form niedożywienia. Liczba ludzi, których nie stać na właściwą dietę, na całym świecie sięga prawie 3,1 mld. Pandemia COVID-19 jeszcze bardziej pogłębiła brak bezpieczeństwa żywnościowego, pomimo iż zgodnie z opinią Europejskiego Urzędu ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA) nie ma dowodów na to, że żywność może być źródłem zakażenia COVID-19, ani że wirus może być przenoszony przez żywność.

Pod koniec 2011 r. populacja świata przekroczyła 7 mld i oczekuje się, że do 2050 r. liczba ludności osiągnie 9,3 mld. Wzrost populacji wiąże się ściśle ze wzrostem zapotrzebowania na żywność. W związku z tymi prognozami przewiduje się, że do 2050 r. globalne zapotrzebowanie na żywność wzrośnie od 50% do 100% w stosunku do poziomu z 2000 r. [Fischer i in. 2014]. Przewiduje się, że w 2030 r. prawie 670 mln ludzi będzie nadal cierpieć głód, to jest 8% światowej populacji, czyli tyle samo, co w 2015 r. Ponadto około 2,3 mld ludzi na świecie doświadczyło w 2021 r. umiarkowanej lub poważnej niepewności żywnościowej, a 11,7% światowej populacji borykało się z poważnym brakiem bezpieczeństwa żywnościowego. W 2020 r. prawie 3,1 mld ludzi nie mogło sobie pozwolić na zdrowe odżywianie, to o 112 mln więcej niż w 2019 r. Szacuje się, że w 2021 r. od 702 mln do 828 mln ludzi na świecie (odpowiednio od 8,9% do 10,5% światowej populacji) doświadczyło głodu [FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2022]. Cytowane dane FAO, IFAD, UNICEF, WFP i WHO wskazują, że w skali globalnej problem bezpieczeństwa żywnościowego jest poważny i raczej nie ma szans na jego całkowite rozwiązanie w kolejnych dekadach. Jednak należy dążyć do jego maksymalnego złagodzenia.

UWARUNKOWANIA KLIMATYCZNE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOSCIOWEGO

Bardzo ważnym czynnikiem braku bezpieczeństwa żywnościowego są zmiany klimatu (ryc. 1). Istnieje wiele dowodów na to, że Ziemia ociepla się od połowy XIX w. Globalna średnia temperatura wzrosła od lat 50. XIX w. o 0,8°C, przy czym trend ocieplenia obserwowany jest w zapisach temperatury mierzonej na lądzie i morzach oraz w wodach powierzchniowych oceanów. Ocenia się, że jeśli wzrost temperatury przekroczy 1,5°C do maksymalnie 2°C cel, zakres i siła skutków będą tak znaczące, że system produkcji żywności nie będzie w stanie w pełni dostosować się do celów wyznaczonych w Porozumieniu Paryskim [Karaczun i Kozyra 2020]. Konsekwencje globalnego ocieplenia dla produkcji rolniczej i produkcji żywności są wieloaspektowe. Jednym z nich jest

degradacja gleb związana z pustoszczeniem terenów suchych. Pierwsze szacunki globalnego zasięgu i dotkliwości pustoszczenia z lat 70. i 80. były na tyle dramatyczne, że doprowadziły do ustanowienia w 1994 r. Konwencji ONZ w sprawie zwalczania pustoszczenia (UNCCD). W literaturze naukowej nie znaleziono jednak przykładów dużych obszarów całkowicie zdegradowanych i jest ono obecnie postrzegane jako cecha lokalna, mimo iż Międzynarodowy Fundusz Rozwoju Rolnictwa stwierdził, że „źródła utrzymania ponad 1,2 mld ludzi zamieszkujących obszary suche w 110 krajach są obecnie zagrożone suszą i pustoszczeniem” [Sterk i Stoorvogel 2020]. Ponadto, w związku z globalnym ociepleniem i topnieniem lodowców, które pokrywają 10% powierzchni ziemi i zawierają 70–80% zasobów słodkiej wody oraz podniesieniem poziomu mórz i oceanów [Nicholls i in. 2011], realne wydają się prognozy wyłączenia w różnych częściach świata z produkcji żywności terenów nadmorskich i depresyjnych [Mimura 2013]. W latach 1961–1993 poziom mórz росł o $1,8 \text{ mm-rok}^{-1}$, a od 1993 r. o $3,1 \text{ mm-rok}^{-1}$. Szacuje się, że całkowite stopnienie lodowców doprowadziłoby do podniesienia poziomu morza o ok. 70 m [Pawłowski 2022].



Źródło: opracowanie własne na podstawie Karaczun i Kozyra [2020]/ Source: own study based on Karaczun and Kozyra [2020]

Ryc. 1. Wpływ skutków zmiany klimatu na czynniki oddziałujące na bezpieczeństwo żywnościowe

Fig. 1. Impact of climate change effects on factors affecting food security

Zmiana klimatu może wynikać z przyczyn naturalnych, z działalności człowieka poprzez emisję gazów cieplarnianych, takich jak dwutlenek węgla i metan oraz ze zmian w użytkowaniu gruntów [Wheeler i von Braun 2013]. Szacuje się, że poziom dwutlenku węgla (CO_2) w atmosferze wzrósł z około 284 ppm w 1832 r. do 397 ppm w 2013 r.

Praktycznie wszystkie oceny wskazują, że zmiany klimatu będą miały negatywny wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe we wszystkich jego czterech wymiarach. Znaczenie poszczególnych wymiarów i ogólny wpływ zmian klimatu na bezpieczeństwo

żywnościowe różni się w zależności od regionu i w czasie, a co najważniejsze, zależy od ogólnego statusu społeczno-gospodarczego, jaki kraj osiągnął w wyniku zmian klimatu. Prognozuje się, że zmiany klimatyczne zwiększą zależność krajów rozwijających się od importu i uwydatnią obecny brak bezpieczeństwa żywnościowego szczególnie w Afryce Subsaharyjskiej i w mniejszym stopniu w Azji Południowej. W krajach rozwijających się niekorzystne skutki zmian klimatu będą odczuwane zwłaszcza przez osoby ubogie. Ocenia się, że środowisko społeczno-gospodarcze, w którym zmiany klimatu będą się rozwijać, jest nawet ważniejsze niż skutki, jakich można oczekiwać po biofizycznych zmianach klimatu. Jeśli chodzi o rolę zmian klimatycznych w zapewnieniu stabilności i wykorzystania żywności, to kluczową determinantą wykorzystania żywności w długim okresie są różnice w ścieżkach rozwoju społeczno-gospodarczego. Będą one decydować o umiejętności radzenia sobie z problemami niestabilności żywności czy to wynikającymi ze zmian klimatu, czy spowodowanymi przez inne czynniki. To, czy i jak bardzo skutki zmian klimatycznych będą odczuwalne w długim okresie, będzie w dużej mierze zależeć od stosunku otoczenia politycznego do ubogich. Przy czym handel może w dużym stopniu przyczynić się do poprawy dostępu do dostaw międzynarodowych, a inwestycje w infrastrukturę transportową i komunikacyjną pomogą zapewnić bezpieczne i terminowe dostawy żywności w skali lokalnej. Ponadto w warunkach zmian klimatu stosowanie nawadniania, promowanie zrównoważonych praktyk rolniczych oraz stały postęp technologiczny również mogą być kluczowymi czynnikami zapewnienia stałych dostaw żywności tak na poziomie lokalnym, jak i międzynarodowym [Schmidhuber i Tubiello 2007].

Zmiany klimatu wpływają na rolnictwo i produkcję żywności w złożony sposób [Karaczun i Kozyra 2020]. Na produkcję żywności wpływają bezpośrednio poprzez zmiany warunków agroekologicznych oraz pośrednio poprzez wpływ na wzrost i dystrybucję dochodów, a tym samym na popyt na produkty rolne. Ciągła emisja gazów cieplarnianych wpływa na zmiany temperatury i opadów, a przez to na przydatność gruntów i plony [Li i in. 2022]. Szacuje się, że zdecydowanie największym czynnikiem przyczyniającym się do globalnej zmian klimatu, odpowiadającym za ponad 75% globalnej emisji gazów cieplarnianych i prawie 90% wszystkich emisji CO₂ są paliwa kopalne – węgiel, ropa i gaz. Emisje gazów cieplarnianych, pokrywając Ziemię, zatrzymują ciepło słoneczne, co prowadzi do globalnego ocieplenia i zmiany klimatu. Utrzymujące się wyższe temperatury z czasem zmieniają wzorce pogodowe i zakłócają normalną równowagę w naturze, a to stwarza wiele zagrożeń dla ludzi i innych form życia na Ziemi [Causes and effects of climate change 2024]. Podstawowym produktem w rolnictwie jest biomasa, która powstaje dzięki fotosyntezie, czyli przekształceniu zaabsorbowanego CO₂ w biomasę z wykorzystaniem energii słonecznej. Szacuje się, że w skali globalnej w wyniku fotosyntezy wiązane jest 451 Gt CO₂·rok⁻¹ i równocześnie w procesie oddychania wydalone jest do atmosfery 435 Gt CO₂·rok⁻¹. Z tych szacunków wynika, że rośliny absorbują z atmosfery 16 Gt CO₂·rok⁻¹. Tak więc zwiększenie produkcji biomasy w rolnictwie, np. poprzez uprawę poplonów może przyczynić się w znacznym stopniu do wzrostu sekwestracji CO₂ i ograniczenia jego emisji [Pawłowski 2022]. Prognozuje się, że w umiarkowanych szerokościach geograficznych wyższe temperatury przyniosą głównie korzyści dla rolnictwa: obszary potencjalnie nadające się do uprawy powiększą się, wydłuży się okres wegetacji, a plony mogą wzrosnąć. Umiarkowane ocieplenie na niektórych wilgotnych i umiarkowanych trwałych użytkach zielonych może zwiększyć produktywność pastwisk i zmniejszyć zapotrzebowanie na chów i mieszanki paszowe. Z drugiej strony zwiększona częstotliwość ekstremalnych zjawisk, np. fal upałów i susz w regionie Morza Śródziemnego lub

zwiększonych opadów i powodzi w regionach o klimacie umiarkowanym, spowoduje zmniejszoną produktywność zwierząt gospodarskich i zwiększoną ich śmiertelność na półpustynnych i suchych pastwiskach. W efekcie zwiększonej ewapotranspiracji i niższego poziomu wilgotności gleby niektóre obszary uprawne mogą stać się nieodpowiednie do uprawy. Wzrost temperatury prawdopodobnie spowoduje także rozszerzenie zasięgu wielu agrofagów rolniczych i zwiększy zdolność populacji szkodników do przetrwania zimy i zaatakowania upraw wiosennych.

Inną ważną zmianą z punktu widzenia rolnictwa będzie wzrost stężenia dwutlenku węgla (CO_2) w atmosferze. Wyższe stężenia CO_2 będą miały pozytywny wpływ na wiele upraw, zwiększając akumulację biomasy i plon końcowy [Cure i Acock 1986]. Skala tego efektu może być różna w zależności od stosowania nawadniania [Leakey 2009] i nawożenia oraz rodzaju uprawy. Jakość odżywcza produktów rolnych może nie wzrastać wraz z wyższymi plonami, ponieważ niektóre rośliny, jak jęczmień, pszenica, ryż, ziemniaki wykazują niższą zawartość białka w warunkach podwyższonego CO_2 [Taub i in. 2007]. W warunkach zmiany klimatu największe straty w gruntach uprawnych wystąpią prawdopodobnie w Afryce, a najmniejsze lub nawet wzrosty będą miały miejsce w Federacji Rosyjskiej i Azji Środkowej [Schmidhuber i Tubiello 2007].

Oczekuje się również, że globalne i regionalne warunki pogodowe staną się bardziej zmienne niż obecnie oraz wzrośnie częstotliwość i dotkliwość ekstremalnych zjawisk, takich jak cyklony, powodzie, gradobicia i susze. W ich efekcie zwiększą się wahania plonów co może niekorzystnie wpływać na stabilność dostaw żywności, a tym samym na bezpieczeństwo żywnościowe [Schmidhuber i Tubiello 2007].

Zmiana klimatu wpłynie również na zdolność ludzi do efektywnego korzystania z żywności, wpływając na warunki bezpieczeństwa żywności, w tym presję chorób przenoszonych przez wodę i żywność. Jednak głównym problemem związanym ze zmianą klimatu i bezpieczeństwem żywności jest to, że zmieniające się warunki klimatyczne mogą zainicjować błędne koło, w którym choroby zakaźne powodują głód, co z kolei sprawia, że dotknięte nią populacje są bardziej podatne na choroby zakaźne. Skutkiem tego może być znaczny spadek wydajności pracy i wzrost ubóstwa, a nawet śmiertelności. Zasadniczo wszystkie przejawy zmian klimatu, czy to susza, wyższe temperatury, czy ulewne deszcze, mają wpływ na presję chorobową i na bezpieczeństwo żywności i bezpieczeństwa żywnościowego. Wzrost dziennych temperatur zwiększy prawdopodobnie częstotliwość zatruc pokarmowych [Kovats i in. 2004]. Ekstremalne opady deszczu, podobnie jak powodzie mogą zwiększać ryzyko wybuchów chorób przenoszonych przez wodę. Skutki powodzi będą najsilniej odczuwane na terenach zdegradowanych ekologicznie oraz tam, gdzie brakuje podstawowej infrastruktury publicznej, w tym urządzeń sanitarnych i higienicznych. Zwiększy to liczbę osób narażonych na choroby przenoszone przez wodę (np. cholerę), a tym samym obniży ich zdolność do efektywnego wykorzystania żywności [Schmidhuber i Tubiello 2007]. Choroby przenoszone przez wodę są powszechne w krajach afrykańskich, powodują zachorowalność i śmiertelność zwłaszcza w krajach słabiej rozwiniętych wśród dzieci w wieku poniżej 5 lat [Manetu i Karanja 2021].

UWARUNKOWANIA SPOŁECZNE I EKONOMICZNE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOŚCIOWEGO

Należy zauważyć, że rolnictwo jest nie tylko źródłem żywności, ale, co równie ważne, źródłem dochodów ludności. Kluczową kwestią dla bezpieczeństwa żywnościowego nie jest to, czy żywność jest „dostępna”, ale czy zasoby pieniężne i niepieniężne, którymi dysponuje ludność, są wystarczające, aby umożliwić każdemu dostęp do odpowiedniej ilości żywności. Analizy World Inequality Lab [2018] wskazują, że pogłębia się rozwarstwienie społeczeństw pod względem zamożności, co zagraża bezpieczeństwu żywnościowemu najbiedniejszych grup społeczeństwa np. według World Inequality Report [Alvarado et al. 2018] w USA udział bogactwa 1% najlepiej zarabiających podwoił się z 10% do 20% w latach 1980-2015. Ważnym następstwem roli i znaczenia siły nabywczej konsumentów w zaspokajaniu potrzeb żywnościowych i dostępie do żywności jest fakt, że krajowa samowystarczalność nie jest ani konieczna, ani wystarczająca do zagwarantowania bezpieczeństwa żywnościowego na poziomie indywidualnym. W ciągu ostatnich 30 lat spadające ceny żywności i rosnące realne dochody doprowadziły do znacznej poprawy dostępu do żywności w wielu krajach rozwijających się. Spadek cen wskazuje, że globalnie podaż nadążała za popytem, a nawet go przewyższała, jednak prognozuje się, że niepewność żywnościowa nadal będzie się utrzymywać [FAO 2002]. Zwiększona siła nabywcza umożliwiła coraz większej liczbie osób kupowanie nie tylko większej ilości żywności, ale także bardziej pożywej i z większą ilością białka, związków mineralnych i witamin. Sądzi się, że na połączeniu zjawiska niższych realnych cen żywności i silnego wzrostu dochodów najbardziej skorzystały kraje Azji Wschodniej, a w mniejszym stopniu region Bliskiego Wschodu i Afryki Północnej. Na poziomie globalnym skutki zmian klimatu będą prawdopodobnie bardzo małe, jednak na poziomie regionalnym znaczenie rolnictwa jako źródła dochodu może być znacznie większe. Tak, że w niektórych regionach produkcja rolnictwa będzie ważnym czynnikiem przyczyniającym się do bezpieczeństwa żywnościowego [Schmidhuber i Tubiello 2007].

W dłuższej perspektywie przewiduje się malejący udział rolnictwa w całkowitym produkcie krajowym brutto (PKB), co oznacza kontynuację trendu, który trwa od dziesięcioleci w wielu rozwijających się regionach na świecie. Udział rolnictwa w PKB w krajach rozwijających się wynosi około 13%, a w krajach rozwiniętych 2%. W Afryce Środkowej, Wschodniej i Zachodniej udział ten wynosi ponad 31%, a w Azji Południowej około 25%. Wzrost dochodów pozwoli większej części światowej populacji zaradzić ewentualnym lokalnym niedoborom produkcji poprzez import, a jednocześnie znaleźć sposoby radzenia sobie z kwestiami bezpieczeństwa i stabilności dostaw żywności. Tam, gdzie dochody są niskie, a udział wydatków na żywność wysoki, wyższe ceny żywności mogą stwarzać lub zaostrzać problemy związane z bezpieczeństwem żywnościowym. Istnieje wiele badań, w których podjęto próbę zmierzenia prawdopodobnego wpływu zmian klimatycznych na ceny żywności [Fischer i in. 2002]. Z tych badań wynika, że ceny żywności będą rosły umiarkowanie wraz z umiarkowanymi wzrostami temperatury do 2050 r.

Innym ważnym czynnikiem zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego, w wymiarze jej dostępności jest utrzymanie ciągłości dostaw produktów żywnościowych oraz środków do ich produkcji. Istotną rolę w tym zakresie pełni transport morski, który szybko rozwija się, jednak przyczynia się w dużym stopniu do globalnych emisji gazów cieplarnianych [Schnurr i Walker 2019]. Duży wpływ na utrzymanie ciągłości dostaw, ze względu na swoje położenie i skalę przewozu towarów ma drożność niektórych szlaków

wodnych i przesmyków morskich np. Kanału Sueskiego, Cieśniny Malakka, Cieśniny Gibraltarskiej, czy Kanału Panamskiego [Bailey i Wellesley 2017].

Tak więc, zmiany klimatu, na które człowiek ma widoczny wpływ, wywierają duży wpływ na ludzi i środowisko naturalne [IPCC 2014]. Jest bardzo prawdopodobne, że zmiany klimatu zwiększą liczbę osób zagrożonych głodem. Wpływ ten, jak wspomniano, będzie silnie uzależniony od przewidywanego rozwoju społeczno-gospodarczego [Fisher i in. 2002], np. szacuje się, że zmiana klimatu zwiększyłaby liczbę niedożywionych w 2080 r. o 5–26% w porównaniu z brakiem zmian klimatu. Niektóre badania wskazują na duże pozytywne skutki stabilizacji klimatu dla sektora rolnego, które jednak mogą być widoczne dopiero w drugiej połowie tego stulecia [Tubiello i Fischer 2007]. Na podstawie przedstawionych informacji, można się spodziewać, że globalne bezpieczeństwo żywnościowe pozostanie światowym problemem przez następne 50 lat i dłużej [Rosegrant i Cline 2003].

WPLYW KRYZYSÓW MIĘDZYNARODOWYCH NA ZAPEWNIENIE BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOSCIOWEGO

W ostatnich latach źródłem wielu problemów w obrocie żywnością stał się koronawirus [Al-Rousan i in. 2024]. Skutki pandemii COVID-19 i środków wprowadzanych w celu jej powstrzymania wynikają z okresowego wprowadzenia i utrzymywania lockdownu, ograniczenia popytu, zamykania granic, fluktuacji liczby pracowników produkcyjnych, ograniczeń finansowych itp. [Barman i in. 2021]. Spowodowało to pomniejszenie lub nawet utratę dochodu wielu gospodarstw domowych, niezbędnego dla zapewnienia dostępu do żywności ich członkom. Jest to sytuacja szczególnie niepokojąca dla gospodarstw skrajnie ubogich, które średnio 70% swoich dochodów wydają na żywność. Zauważono, że spadki dochodów będą miały szczególnie duży wpływ na spożycie bogatej w składniki odżywcze żywności, takiej jak owoce, warzywa i produkty pochodzenia zwierzęcego. Ponadto w wyniku pandemii zakłócone zostały łańcuchy dostaw, zwłaszcza w biednych krajach z powodu ryzyka przenoszenia chorób, niedoborów siły roboczej oraz zakłóceń w transporcie i logistyce. Autorzy raportu IFPRI (International Food Policy Research Institute) wskazują ponadto na kluczowe znaczenie handlu w rozwiązywaniu kwestii bezpieczeństwa żywnościowego w wymiarze dostępności i stabilności. Handel bowiem zapewnia dywersyfikację dostaw, zmniejsza luki w produkcji i pomaga ustabilizować światowe rynki. Ograniczenia eksportowe wprowadzone przez 21 krajów na ryż i pszenicę w początkowym okresie pandemii spowodowały niestabilność i wzrost światowych cen tych podstawowych produktów spożywczych [Swinnen i McDermott 2020].

Inny kryzys międzynarodowy trwający od lutego 2022 r. – wojna na Ukrainie – przyczynił się do poważnego zakłócenia łańcucha dostaw żywności [Filho i in. 2023, Hatab i Lagerkvist 2024, Devadoss i Ridley 2024] i dodatkowo wpływa na ceny zboża i żywności oraz nawozów i energii [Gross 2022, Al.-Rousan i in. 2024]. W wyniku agresji Rosji i działań wojennych w Ukrainie został wstrzymany ukraiński eksport rolny drogą morską 22 mln ton zboża oraz została ograniczona produkcja zbóż w Ukrainie i Rosji. Przeciwdziałać temu kryzysowi może uruchomienie rezerw strategicznych przez UE i USA, powstrzymanie ograniczeń eksportowych, wprowadzenie ułatwień w handlu nawozami i wsparcie organizacji przeciwdziałających głodowi na świecie. Przedłużająca się wojna grozi negatywnymi skutkami dla globalnej gospodarki, w tym wzrostem cen, mniejszą

dostępnością żywności i jeszcze większym głodem, szczególnie w najbiedniejszych państwach. Wynika to z faktu, że oba kraje – Rosja i Ukraina – należą do głównych producentów artykułów rolnych na świecie, w tym zbóż i roślin oleistych [Portner i in. 2022]. W 2020 r. z Ukrainy pochodziło 36% eksportu oleju i nasion słonecznika (17% z Rosji), 13% kukurydzy, 11% żyta (12% z Rosji), 10% rzepaku (6% z Rosji) i 9% pszenicy (18% z Rosji). Eksport tych krajów koncentruje się na państwach rozwijających się w Afryce i na Bliskim Wschodzie. Rosja jest także największym na świecie producentem i eksporterem nawozów sztucznych. Zmniejszenie ich dostępności w krajach rozwijających się może spowodować spadek produkcji rolnej w następnych latach [Kugiel 2022]. Trwający konflikt wpływa na bezpieczeństwo żywnościowe na trzy sposoby: powoduje bezpośredni wzrost cen niektórych produktów z powodu ograniczenia ich podaży (blokada portów, licencje eksportowe, zakaz eksportu, sankcje), powoduje wzrost cen surowców energetycznych (ropy i gazu) [Al-Rousan i in. 2024], co skutkuje zwiększeniem kosztów produkcji i transportu oraz wyższymi cenami żywności, ogranicza możliwość niesienia pomocy humanitarnej, zwiększając jej koszty i problemy w działaniu niektórych agencji pomocowych np. Światowego Programu Żywnościowego (WFP). Wojna ta zagraża bezpieczeństwu żywnościowemu na świecie poprzez zaburzenia łańcuchów dostaw i wzrost cen żywności, szczególnie w krajach rozwijających się i biednych [Abay i in. 2023, Tetteh i Ntsiful 2023]. Na poziomie indywidualnym konflikt zbrojny może bezpośrednio (tj. narażenie na ataki) lub pośrednio (np. ataki na rodzinę, znajomych lub infrastrukturę) zmniejszyć zdolność ludzi do zdobywania żywności [Rudolfson i in. 2024]. Widocznym wpływem konfliktów zbrojnych na bezpieczeństwo żywnościowe jest niszczenie gruntów rolnych, infrastruktury, przesiedlenia i masowy głód [Kemmerling i in. 2022].

UWARUNKOWANIA BIOTYCZNE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ŻYWNOCIOWEGO

Innym zauważalnym czynnikiem zagrażającym bezpieczeństwu żywnościowemu są patogeny roślin i zwierząt [Staver i in. 2020, Blome i in. 2020]. Z szacunków wynika, że 1,3 mld ludzi na świecie żyje za mniej niż 1 dolara dziennie, a co najmniej 10% światowej produkcji żywności jest tracone z powodu chorób roślin. W przypadku zwierząt szczególnie groźne są świńska grypa, ptasia grypa, afrykański pomór świń czy „choroba panamska” [Blome i in. 2020]. Ograniczenia biotyczne mogą czasami poważnie zagrozić bezpieczeństwu żywnościowemu, dlatego patolodzy roślin nie mogą ignorować danych dotyczących niedoboru żywności i szkód w produkcji żywności spowodowanych przez patogeny roślinne, jak i zwierzęce. Większość żywności do spożycia przez ludzi dostarcza czternaście roślin uprawnych. Ponadto istnieje wiele roślin, które są mniej intensywnie uprawiane, ale spełniają ważne wymagania żywieniowe w ograniczonych obszarach naszego globu. Wszystkie rośliny ulegają chorobom zarówno w polu, jak i po zbiorach, a głównymi grupami patogenów są wirusy, bakterie, grzyby, nicienie i rośliny pasożytnicze [Strange i Scott 2005].

Za potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa żywnościowego zostało uznane również zmniejszenie różnorodności gatunków roślin uprawnych w światowych dostawach żywności. Zmiany w dostawach żywności zwiększają współzależność między krajami w zakresie dostępności i dostępu do tych źródeł żywności oraz zasobów genetycznych wspierających ich produkcję, a także nadają pilnego charakteru priorytetom dotyczącym

rozwoju żywienia ukierunkowanym na zwiększenie bezpieczeństwa żywnościowego [Khoury i in. 2014].

Negatywnie wpływa na zaopatrzenie w żywność, bezpieczeństwo żywnościowe i zrównoważony rozwój systemów żywnościowych koncentracja produkcji rolnej. Konkurencyjność krajów i spójność ich wzorców dywersyfikacji produkcji są czynnikiem zwiększającym podaż żywności na mieszkańca i bezpieczeństwo żywnościowe, jednak mogą szkodzić zrównoważeniu systemu żywnościowego [Campi i in. 2021].

PODSUMOWANIE

W pracy, zaproponowano autorski model wpływu oddziaływania zmian klimatu na różne obszary (w tym na środowisko, społeczeństwo, jakość i bezpieczeństwo, możliwość zapewnienia i dostępność żywności) oraz wskazano i omówiono skutki tego oddziaływania na cztery główne wymiary zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w skali globalnej. Tym samym zintegrowano różne perspektywy spojrzenia na problem zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego. Reasumując, na bezpieczeństwo żywnościowe wpływa wiele różnorodnych czynników, z których najważniejsze w skali globalnej są zmiany demograficzne związane z rosnącą populacją mieszkańców Ziemi oraz obserwowane od lat 50. XIX w. zmiany klimatu, związane głównie z działalnością człowieka. W ostatnich latach bardzo poważnie wpłynęły na bezpieczeństwo żywnościowe pandemia COVID-19 oraz konflikty zbrojne, w tym zwłaszcza trwająca wojna na Ukrainie. Czynniki te wpływają na wszystkie wymiary bezpieczeństwa żywnościowego, a więc dostępność, stabilność, wykorzystanie i dostęp. Zakres i siła oddziaływania poszczególnych czynników są różne w zależności od skali rozpatrywania ich wpływu lokalnej, regionalnej czy globalnej. Poza wymienionymi, negatywnie na bezpieczeństwo żywnościowe wpływa wiele innych czynników, które w mniejszym lub większym stopniu są powiązane z wymienionymi czynnikami głównymi. W przyszłych badaniach tego problemu warto zastosować inne podejścia do przeglądu literatury, aby wyłonić nowe perspektywy problemu zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego w skali globalnej. Interesująca byłaby również całościowa analiza wskazanych problemów związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa żywnościowego w skali poszczególnych krajów z uwzględnieniem ich poziomu rozwoju społeczno-gospodarczego.

PIŚMIENNICTWO

- Abay K.A., Breisinger C., Glauber J., Kurdi S., Laborde D., Siddig K., 2023. The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. *Glob. Food Sec.* 36, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100675>.
- Al-Rousan N., Al-Najjar H., Al-Najjar D., 2024. The impact of Russo-Ukrainian war, COVID-19, and oil prices on global food security. *Heliyon* 10 (8), e29279. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29279>.
- Alvaredo F., Chancek L., Saez P.E., Zucman G. (eds), 2018. *World Inequality Report 2018*, Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674984769>
- Bailey R., Wellesley L., 2017. *Checkpoints and Vulnerabilities in the global food trade*. Chatham House Report, Chatham House, The Royal Institute of International Affairs.

- <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-06-27-choke-points-vulnerabilities-global-food-trade-bailey-wellesley-final.pdf> [dostęp: 9.09.2022].
- Barman A., Das R., De P.K., 2021. Impact of COVID-19 in the food supply chain: Distribution and recovery strategy. *Current Research in Behavioral Sciences* 2., 100017. <https://doi.org/10.1016/j.crbeha.2021.100017>
- Blome S., Franzke K., Beer M., 2020. African swine fever – A review of current knowledge. *Virus Res.* 287(2), 198099. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198099>
- Campi M., Duenas M., Fagiolo G., 2021. Specialization in food production affects global food security and food systems sustainability. *World Dev.* 141, 105411. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105411>
- Causes and effects of climate change, 2024. <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Cure J.D., Acocck B., 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey, *Agric. For. Meteorol.* 38, 127–145.
- Devadoss S., Ridley W., 2024. Impacts of the Russian invasion of Ukraine on the global wheat market. *World Dev.* 173, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106396>
- FAO, 2002. *World Agriculture: towards 2015/2030. Summary report.* Rome.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2022. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable.* Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
- Filho W.L., Fedoruk M., Paulino Pires Eustachio J.H., Barbir J., Lisovska T., Lingos A., Baars C., 2023. How the War in Ukraine Affects Food Security. *Foods* 12, 3996. <https://doi.org/10.3390/foods12213996>
- Fischer R.A., Byerlee D., Edmeades G.O., 2014. Crop yields and global food security. Will yield increase continue to feed the world?. *ACIAR, Monograph No. 158.* Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. xxii + 634, 18.
- Gross M., 2022. Global food security hit by war. *Curr. Biol.* 32(8), R341-R343. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.04.007>
- Hatab A.A., Lagerkvist C.J., 2024. Perceived business risks and observed impacts of the Russian-Ukraine war among small- and medium-sized agri-food value chain enterprises in Egypt. *Food Policy* 127, 102712. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102712>
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Karaczun Z.M., Kozyra J., 2020. *Wpływ zmian klimatu na bezpieczeństwo żywnościowe Polski.* Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Kemmerling B., Schetter K., Wirkus L., 2022. The logics of war and food (in)security. *Glob. Food Sec.* 33, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100634>
- Khoury C.K., Bjorkman A.D., Dempewolf H., Ramirez-Villegas J., Guarino L., Jarvis A., Rieseberg L.H., Struik P.C., 2014. Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *PNAS* 111 (11), 4001-4006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111>
- Kovats R.S., Edwards S.J., Hajat S., Armstrong B.G., Ebi K.L., Menne B., 2004. The effect of temperature on food poisoning: a time-series analysis of salmonellosis in ten European countries. *Epidemiol. Infect.* 132, 443-453. <https://doi.org/10.1017/S0950268804001992>
- Kugiel P., 2022. *Biuletyn PISM*, 63 (2482) [dostęp: 5.09.2022].
- Leakey A.D.B., 2009. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and future of C₄ crops for food and fuel. *Proc. R. Soc. B.* 276, 2333–2343. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1517>
- Li L., Li X., Zheng X., Li X., Jiang T., Ju H., Wan X., 2022. The effects of declining soil moisture levels on suitable maize cultivation areas in Northeast China. *J. Hydrol.* 608, 127636. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127636>

- Manetu W.M., Karanja A.M., 2021. Waterborne disease risk factors and intervention practices: A review. *OALib. Journal* 8 (5),1–11. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107401>
- Mimura N., 2013. Sea-level rise caused by climate change and its implications for society, *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 89(7), 281–301. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.281>
- Nicholls R.J., Marinova N., Lowe J.A., Brown S., Vellinga P., de Gusmão D., Hinkel J., Tol R.S.J., 2011. Sea-level rise and its possible impacts given a ‘beyond 4°C world’ in the twenty-first century. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 369, 161–181. DOI: 10.1098/rsta.2010.0291
- Pawłowski L. 2022. Rola rolnictwa w ograniczaniu zmian klimatu. *Aktualności UP w Lublinie* 4/110, 26–27.
- Portner L.M., Lambrecht N., Springmann M., Bodirsky B.L., Gaupp F., Freund F., Lotze-Campen H., Gabrysch S., 2022. We need a food system transformation – In the face of the Russia-Ukraine war, now more than ever. *One Earth* 5(5), 470–472. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.004>
- Rosegrant M., Cline S.A., 2003. Global food security: Challenges and policies. *Science* 302 (5652), 1917–1919. <https://doi.org/10.1126/science.1092958>
- Rudolfson I., Bartusevičius H., van Leeuwen F., Østby G., 2024. War and food insecurity in Ukraine. *World Dev.* 180, 106647. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102712>
- Schmidhuber J., Tubiello F.N., 2007. Global food security under climate change. *PNAS* 104(50), 19703–19708. <https://doi.org/10.1073.pnas.0701976104>
- Schnurr R.E.J., Walker T.R., 2019. Marine transportation and energy use. Reference module. *Earth Systems Environ. Sci.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09270-8>
- Snyder H., 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *J. Bus. Res.* 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Staver Ch., Pems D., Scheerer L., Vicente L.P., Dita M., 2020. Ex Ante Assessment of Returns on Investments to address the impact of Fusarium Wilt Tropical Race 4 on global banana production. *Front. Plant. Sci.* 11, 844. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00844>
- Sterk G., Stoorvogel J., 2020. Desertification – Scientific versus political realities., *Land* 9, 156. DOI:10.3390/land9050156
- Strange R.N., Scott P.R., 2005. Plant Disease: A threat to global food security. *Annu. Rev. Phytopathol.* 43, :3.1–3.34. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.113004.133839>
- Swinnen J., McDermott J. (ed.) 2020. COVID-19 & Global Food Security. IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/133762/filename/133971.pdf> [dostęp: 5.09.2022].
- Taub D.R., Miller B., Allen H., 2007. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* 14(3), 556–564. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01511.x>
- Tetteh J., Ntsiful E., 2023. A comparative analysis of the performances of macroeconomic indicators during the Global Financial Crisis, COVID-19 Pandemic and The Russia-Ukraine War: The Ghanaian case. *Res. Glob.* 7, 100174. <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2023.100174>
- Tubiello F.N., Fischer G., 2007. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000–2080. *Technol. Forecast. Soc. Change* 74, 1030–1056.
- Wheeler T., von Braun J., 2013. Climate Change Impacts on Global Food Security. *SCIENCE* 341 (6145), 508–513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Wiśniewska M., Wyrwa J., 2022. Bezpieczeństwo żywności i żywnościowe w okresie pandemii. Ujęcie interdyscyplinarne. PTE, Zielona Góra.

Źródło finansowania badań i publikacji: Subwencja MNiSW na utrzymanie potencjału badawczego jednostki.

Abstract. The paper subtracts the issue of food security, the provision of which is linked to the human right to life and development. The purpose of the article is to identify and define the demographic, socioeconomic, and climatic conditions affecting the provision of food security at a global level. This is an important issue, because over the years the problems and challenges of food insecurity, eradication of hunger, and malnutrition in various regions of the world are increasing, and on the other hand we observe climate change, social conflicts, and deepening inequalities in access to food. The issue of ensuring food security was analyzed using the literature review method obtained from domestic and foreign databases. In conclusion, it was found that the various dimensions of food security are influenced by multiple factors, their scope and strength depend on the scale of their consideration.

Keywords: security, food, climatic determinants, demographic determinants, social determinants

Received: 10.07.2024

Accepted: 5.12.2024

Publication: 13.01.2025