

**Anna Nieróbca**

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy  
w Puławach*

**PLONOWANIE W NOWOCZESNYM ROLNICTWIE W PORÓWNANIU  
Z UBIEGŁYM WIEKIEM\***

**Słowa kluczowe:** plonowanie, zielona rewolucja, postęp biologiczny, rolnictwo precyzyjne, zmiany klimatu, rolnictwo odporne na zmiany klimatu

**Wstęp**

Plonowanie roślin uprawnych, w szczególności zbóż odgrywa fundamentalną rolę w zaspokajaniu rosnącego zapotrzebowania na żywność. Zdolność do utrzymania, a w perspektywie globalnej do zwiększania plonów, jest kluczowa dla stabilności produkcji żywności, również w Polsce (Matyka i Krasowicz 2024, Sułek i in. 2024).

Wzrost liczby ludności na świecie, z prognozami przekraczającymi 10 mld do 2100 r., stawia przed rolnictwem poważne wyzwania w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego (Ritchie i in. 2023). Jednocześnie współczesna produkcja rolnicza stoi w obliczu narastających zagrożeń wynikających ze zmian klimatu. Nasilające się zjawiska ekstremalne wywierają coraz silniejszy wpływ na stabilność produkcji. Rosnąca temperatura, zmienność opadów oraz intensyfikacja ekstremalnych zdarzeń pogodowych, takich jak susze, powodzie czy fale upałów, bezpośrednio zagrażają stabilności plonów (Doroszewski i in. 2014, Lesk i in. 2016, Sadowski 2024). W Polsce symptomy tych procesów są już wyraźnie widoczne, co wymusza wdrażanie skutecznych strategii adaptacyjnych w rolnictwie (Kundzewicz i Kozyra 2011, Paluszkiwicz i in. 2024).

W odpowiedzi na te wyzwania rolnictwo usilnie poszukuje innowacyjnych rozwiązań umożliwiających stabilizację i zwiększanie plonowania roślin. Priorytetem pozostaje postęp biologiczny (genetyczny), który sprzyja tworzeniu odmian o podwyż-

---

\*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

szonym potencjale plonowania, lepszej efektywności wykorzystania zasobów oraz zwiększonej odporności na stesy biotyczne i abiotyczne (Tester i Langridge 2010, Marciniak 2011, Świącicki i in. 2011).

Równolegle rozwija się nowoczesna agrotechnika. Powstają precyzyjne systemy nawożenia i ochrony roślin, których implementacja wymaga wykorzystania zaawansowanych technologicznie maszyn rolniczych (Zhang i in. 2002, Fountas i in. 2020). W dużych gospodarstwach rolniczych kluczowe znaczenie zyskuje rolnictwo precyzyjne (często określane jako rolnictwo 4.0 i 5.0). Dzięki zastosowaniu teledetekcji i integracji różnorodnych danych umożliwia ono zarządzanie zasobami na poziomie polowym, co prowadzi do bardziej zrównoważonej i efektywnej produkcji (Wolfert i in. 2017).

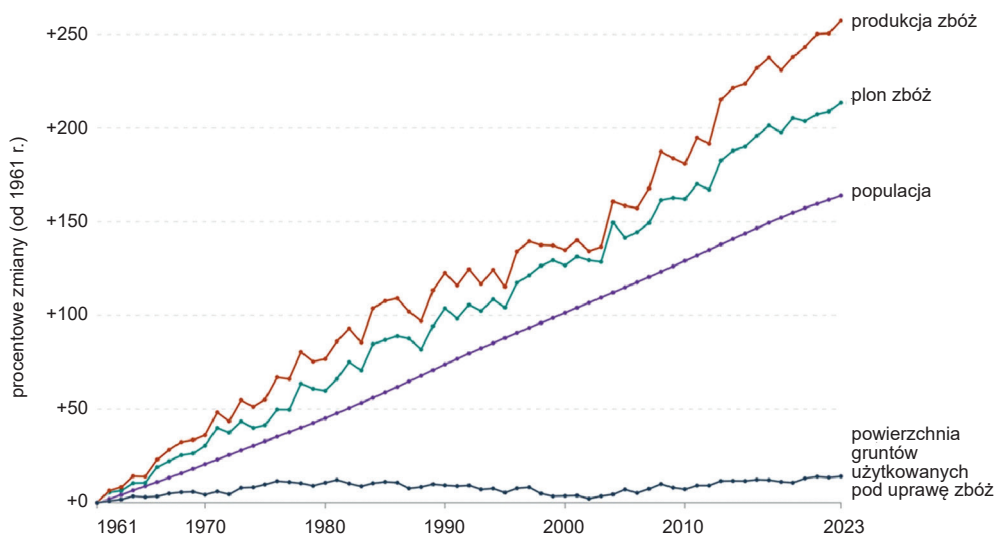
Niniejsza praca ma na celu omówienie wpływu innowacji w rolnictwie na plonowanie roślin w kontekście budowania rolnictwa odpornego na zmiany klimatu. Zostaną przedstawione kluczowe czynniki, takie jak postęp biologiczny, rozwój agrotechniki oraz cyfryzacja, zrozumienie fizjologii roślin i środowiska, a także ich oddziaływanie na wykorzystanie potencjału plonotwórczego roślin.

### **Plonowania roślin w Polsce i na świecie w XX i XXI wieku**

Globalny wzrost plonów w XX i XXI w. jest jednym z najbardziej znaczących osiągnięć ludzkości pozwalającym na wyżywienie rosnącej populacji (Godfray i Garnett 2014, Krasowicz 2024, Sułek i in. 2024). Historyczne trendy plonowania na świecie wykazują dynamiczny wzrost plonów, szczególnie po II wojnie światowej. Przed tym okresem wzrost plonów był stosunkowo powolny i w dużej mierze determinowany przez rozszerzanie obszarów uprawnych przy wykorzystaniu dość prostych metod agrotechnicznych (Evenson i Gollin 2003).

Punktem zwrotnym w globalnym rolnictwie była tak zwana zielona rewolucja, która rozpoczęła się w latach 60. XX w. Jej głównymi filarami były: wprowadzenie do produkcji wysoko plonujących odmian zbóż (ryżu, pszenicy, kukurydzy), intensywne stosowanie nawozów mineralnych i środków ochrony roślin, rozwój systemów nawadniających oraz postęp w mechanizacji rolnictwa (Pingali 2012). W wyniku wykorzystania postępu hodowlanego w państwach takich jak Indie czy Pakistan, które wcześniej borykały się z chronicznymi niedoborami żywności, osiągnęły samowystarczalność w produkcji zbóż (Conway 1997). Od początku lat 60. XX w. globalna produkcja zbóż wzrosła o ponad 250%. Wzrost ten jest wyraźnie szybszy niż przyrost populacji, co oznacza, że produkcja żywności zwiększała się w tempie pozwalającym na poprawę bezpieczeństwa żywnościowego na świecie. Wzrost ten był szczególnie dynamiczny po 2000 r., co można wiązać z rozwojem technologii upraw, intensyfikacją rolnictwa oraz postępowaniem hodowlanym. Światowe plony zbóż w tym okresie wzrosły o ok. 200%. Oznacza to, że głównym czynnikiem wzrostu produkcji była poprawa wydajności

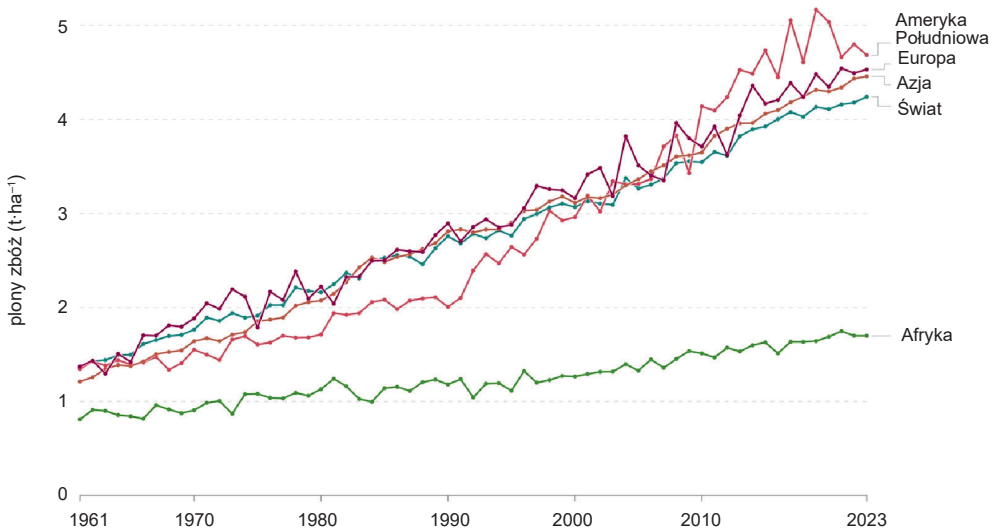
upraw, a nie zwiększenie areału zasiewów (rys. 1). W analizowanym okresie obserwuje się wyraźny i systematyczny wzrost wydajności upraw zbóż we wszystkich regionach świata, choć tempo tego wzrostu było zróżnicowane geograficznie. Średni światowy plon zbóż wzrósł z ok.  $1,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  w 1961 r. do ponad  $4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  w 2023 r., co oznacza niemal trzykrotny wzrost. Wzrost ten był szczególnie intensywny po 1980 r., w wyniku wprowadzenia nowoczesnych technologii upraw i tzw. zielonej rewolucji. Jednocześnie między regionami świata jest duża dysproporcja w wielkościach uzyskiwanego plonu (rys. 2). Afryka pozostaje regionem o najniższych plonach zbóż na świecie. W 1961 r. wynosiły one ok.  $0,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a w 2023 r. zaledwie  $1,8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Choć wydajność wzrosła dwukrotnie, różnica w stosunku do pozostałych kontynentów jest nadal bardzo duża, czego przyczyną są ograniczenia technologiczne, niestabilność polityczna, degradacja gleb oraz niedostateczne wsparcie inwestycyjne i infrastrukturalne dla sektora rolnego (Ritchie i in. 2023).



Rys. 1. Zmiany w produkcji zbóż, plonach, użytkowaniu gruntów i populacji – świat.

Wszystkie wartości są indeksowane względem pierwszego roku na osi czasu; oznacza to, że pierwszy rok serii czasowej ma wartość zero

Źródło: UN FAO 2025



Rys. 2. Plony zbóż wyrażone w tonach z hektara. Zboża obejmują pszenicę, ryż, kukurydzę, jęczmień, owies, żyto, proso, sorgo, grykę i mieszanki zbożowe

Źródło: UN FAO 2025

W polskim rolnictwie w ciągu ostatnich sześćdziesięciu lat również zaszła głęboka transformacja; sektor rolny przeszedł znaczące przeobrażenia strukturalne i technologiczne, co ma odzwierciedlenie w plonie. Powierzchnia zasiewów ogółem w Polsce systematycznie się zmniejszała. W 1960 r. wynosiła ona 15,3 mln ha, natomiast w 2024 r. – 10,8 mln ha, co oznacza spadek o ok. 4,5 mln ha (tj. 29%). Zmniejszaniu powierzchni zasiewów towarzyszyły jednak znaczące zmiany w strukturze upraw, szczególnie w grupie zbóż. Zboża pozostają dominującą grupą roślin uprawnych w Polsce, choć ich areal ulegał zmianom. W 1960 r. zajmowały 9,22 mln ha, natomiast w 2024 r. – 7,1 mln ha. Udział zbóż w strukturze zasiewów ogółem wahał się w analizowanym okresie od ok. 54% w 1980 r. do ponad 73% w 2010 r., a obecnie wynosi 65,5% (tab. 1).

W latach 1960–2024 nastąpiły istotne zmiany w strukturze zasiewów zbóż, w tym wyraźny wzrost udziału kukurydzy. Gatunek ten, będący w latach 60. XX w. uprawą marginalną, obecnie zajmuje drugie miejsce po pszenicy. W 2024 r. powierzchnia uprawy kukurydzy przekroczyła 1,28 mln ha. Pszenica natomiast jest obecnie uprawiana na powierzchni ok. 2,4 mln ha.

Największy spadek powierzchni zasiewów spośród wszystkich zbóż odnotowano w przypadku uprawy żyta. W 1960 r. uprawiano je na 5,12 mln ha, natomiast w 2024 r. już tylko na 0,68 mln ha, co oznacza spadek o prawie 87%.

Tabela 1

Powierzchnia uprawy poszczególnych gatunków zbóż w latach 1960–2024 (w mln ha)

| Wyszczególnienie             | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2015 | 2020 | 2024 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Powierzchnia zasiewów ogółem | 15,3 | 15,0 | 14,5 | 14,2 | 12,4 | 10,4 | 10,7 | 10,9 | 10,8 |
| % w strukturze zasiewów      | 60,2 | 55,8 | 54,1 | 59,9 | 71,0 | 73,7 | 69,9 | 68,1 | 65,5 |
| Zboża ogółem                 | 9,22 | 8,34 | 7,85 | 8,53 | 8,81 | 7,6  | 7,5  | 7,5  | 7,1  |
| Pszenica                     | 1,36 | 1,99 | 1,61 | 2,28 | 2,64 | 2,14 | 2,39 | 2,39 | 2,38 |
| Żyto                         | 5,12 | 3,41 | 3,04 | 2,31 | 2,13 | 1,06 | 0,75 | 0,85 | 0,68 |
| Jęczmień                     | 0,72 | 0,92 | 1,32 | 1,17 | 1,10 | 0,97 | 0,84 | 0,68 | 0,69 |
| Owies                        | 1,64 | 1,53 | 1,00 | 0,75 | 0,57 | 0,57 | 0,41 | 0,51 | 0,52 |
| Pszenżyto                    | -    | -    | -    | 0,75 | 0,70 | 1,32 | 1,52 | 1,39 | 1,15 |
| Mieszanki zbożowe            | 0,26 | 0,40 | 0,74 | 1,17 | 1,48 | 1,10 | 0,83 | 0,59 | 0,25 |
| Kukurydza na ziarno          | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,15 | 0,34 | 0,67 | 0,95 | 1,28 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie Krasowicz i Madej (2020), Sułek i in. (2024), GUS (2015, 2020, 2024)

Z danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS 1956–2024) wynika (tab. 2), że od początku lat 60. XX w. do 2024 r. w Polsce nastąpił wyraźny wzrost plonów wszystkich gatunków zbóż. Przykładowo, plony pszenicy ozimej zwiększyły się z poziomu  $1,48 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  w 1956 r. do ponad  $5,29 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  w 2024 r. (rys. 3). Wzrost ten charakteryzował się jednak zmienną dynamiką. Do początku lat 90. średnioroczny trend wzrostu plonów wynosił ok.  $72 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  rocznie. Po tym okresie nastąpiło jego osłabienie, co było związane m.in. z transformacją ustrojowo-gospodarczą w Polsce. W latach 1991–2024 trend wzrostu plonów wynosił średnio  $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  rocznie.

Tabela 2

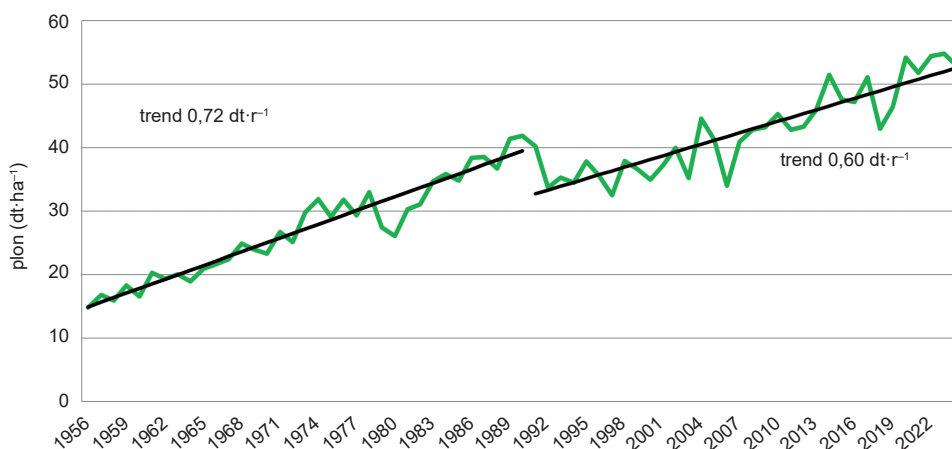
Plony poszczególnych gatunków zbóż w latach 1961–2024 ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

| Wyszczególnienie | 1961–1970 | 1971–1980 | 1981–1990 | 1991–2000 | 2001–2010 | 2011–2015 | 2016–2020 | 2021–2023 | 2024 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Pszenica         | 2,14      | 2,87      | 3,51      | 3,40      | 3,89      | 4,45      | 4,60      | 5,16      | 5,20 |
| Żyto             | 1,73      | 2,24      | 2,52      | 2,28      | 2,44      | 2,79      | 2,88      | 3,42      | 3,57 |

cd. tab. 2

| Wyszczególnienie    | 1961–1970 | 1971–1980 | 1981–1990 | 1991–2000 | 2001–2010 | 2011–2015 | 2016–2020 | 2021–2023 | 2024 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Jęczmień            | 2,12      | 2,81      | 3,19      | 2,93      | 3,16      | 3,61      | 3,71      | 4,29      | 4,34 |
| Owies               | 1,88      | 2,37      | 2,62      | 2,36      | 2,44      | 2,76      | 2,77      | 3,11      | 3,17 |
| Pszonżyto           | -         | -         | -         | 3,01      | 3,24      | 3,58      | 3,71      | 4,33      | 4,00 |
| Kukurydza na ziarno | 2,34      | 3,81      | 4,51      | 5,06      | 5,77      | 6,48      | 6,59      | 7,15      | 7,36 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS-u 1956–2024



Rys. 3. Plony pszenicy ozimej w Polsce w latach 1956–2024

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS-u 1956–2024

Nieregularna zmienność plonów pszenicy ozimej w poszczególnych latach wynika w dużej mierze z wpływu warunków pogodowych (rys. 3). W ostatnich latach odchylenia od linii trendu plonów pszenicy ozimej stały się wyraźniejsze, co wskazuje na rosnącą zmienność plonowania. Widoczne odchylenia od trendów potwierdzają istotny wpływ czynników meteorologicznych na wysokość uzyskiwanych plonów. Może to być interpretowane jako efekt wzrastającej niestabilności klimatycznej. Mimo że obecnie średnie plony pszenicy ozimej przekroczyły poziom  $5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , dane z doświadczeń odmianowych wskazują na możliwość uzyskiwania znacznie wyższych plonów przekraczających  $8\text{--}9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Świadczy to o znacznym, wciąż niewykorzystanym potencjale biologicznym upraw (Wicki 2017).

## Niewykorzystany potencjał plonotwórczy

Pomimo znaczącego postępu w zakresie genetyki oraz agrotechniki we współczesnym rolnictwie nadal obserwuje się istotny, niewykorzystany potencjał plonotwórczy odmian, określanej jako luka plonowania (ang. *yield gap*). Termin ten oznacza różnicę między potencjalnym plonem – możliwym do uzyskania w optymalnych warunkach środowiskowych i przy zastosowaniu najlepszej dostępnej agrotechniki dla danej odmiany – a rzeczywistym plonem osiąganym w warunkach produkcyjnych (van Ittersum i in. 2013). Tym samym, choć nadal obserwujemy ogólny trend wzrostu plonów dzięki innowacjom genetycznym i agronomicznym (rys. 2), to tempo tego wzrostu ulega osłabieniu. Warto też podkreślić, że niestabilność klimatyczna oddziałuje nie tylko przez obniżenie średniego plonu, ale także przez zwiększenie zmienności plonów między latami. Badania wskazują, że w regionach dotkniętych wzrostem częstotliwości ekstremów pogodowych plonowanie cechuje się większymi wahaniami, co ogranicza przewidywalność produkcji rolniczej. Przykładem może być analiza plonowania zbóż w niemieckich badaniach odmianowych, która wykazała stagnację wzrostu plonów w połączeniu ze zwiększonym oddziaływaniem stresów cieplnych i suszowych (Riedesel i in. 2024).

Badania prowadzone przez Dworakowskiego i in. (2018) również wskazują, że w Polsce pomimo postępu biologicznego jego pełna implementacja w praktyce rolniczej pozostaje ograniczona. W województwie podlaskim, w latach 1960–2009, plony zbóż uzyskiwane w warunkach doświadczalnych były średnio o 60–145% wyższe niż te uzyskiwane w gospodarstwach produkcyjnych. Natomiast według badań Wickiego (2008) poziom wykorzystania potencjału plonowania odmian zbóż w Polsce wynosił średnio ok. 55% dla okresu 1970–2007. Jednym z głównych czynników ograniczających poziom plonowania było niewystarczające i niezrównoważone nawożenie. Zmniejszenie luki plonowania jest możliwe dzięki efektywniejszemu wykorzystaniu postępu hodowlanego oraz optymalizacji praktyk agrotechnicznych. Szacuje się, że dzięki temu produkcja zbóż w Polsce mogłaby wzrosnąć o 20–30% bez konieczności zwiększania powierzchni zasiewów (Wicki 2008, Podleśny i Grabiński 2019). W Polsce na wielkość luki plonowania ma wpływ regionalne zróżnicowanie warunków produkcji wynikające z odmiennych uwarunkowań glebowo-klimatycznych oraz zróżnicowanego poziomu intensywności gospodarowania (Krasowicz i Madej 2020, Matyka i Krasowicz 2024).

## Postęp biologiczny w hodowli roślin uprawnych

Postęp biologiczny (hodowlany) polega na wprowadzaniu i upowszechnianiu nowych odmian roślin o ulepszonych cechach genetycznych, mających na celu zwiększenie wydajności, poprawę jakości plonu i odporności. Na początku XX w. postęp

biologiczny bazował głównie na klasycznych metodach hodowlanych, takich jak selekcja i krzyżowanie (hybrydyzacja). Metody te polegały na obserwacji i doborze fenotypów, bez wiedzy o strukturze DNA. W latach 60. XX w. Norman Borlaug za pomocą selekcji uzyskał półkarłowe, wysokoplonujące odmiany pszenicy. Strategicznym elementem tych prac było ukierunkowanie alokacji asymilatów (produktów fotosyntezy) na korzyść organów generatywnych, co doprowadziło do zwiększenia indeksu żniwnego (HI, ang. *Harvest Index*), czyli stosunku masy plonu użytkowego (np. ziarna, bulw) do całkowitej suchej masy rośliny (Donald i Hamblin 1976, Reynolds i in. 2011). W przypadku pszenicy indeks żniwny wzrósł z poziomu 0,3–0,35 w odmianach tradycyjnych do 0,45–0,5 w nowoczesnych odmianach karłowatych, znacząco podnosząc ich wydajność. Wdrożenie tych odmian do uprawy stanowiło kluczowy element zielonej rewolucji, umożliwiając krajom borykającym się z niedoborami żywności, takim jak Indie czy Pakistan, osiągnięcie samowystarczalności w produkcji zbóż (Conway 1997). Przykładowo, w Indiach produkcja pszenicy wzrosła z około 12 mln t w 1965 r. do ponad 20 mln t w 1970 r., co jest uznawane za koronny przykład sukcesu rewolucji żywieniowej (Conway 1997).

Kolejnym istotnym osiągnięciem tego okresu była hodowla mieszańcowa (hybrydowa) wykorzystująca zjawisko heterozji (wigor mieszańców). Metoda ta przyczyniła się do znacznego wzrostu plonowania zwłaszcza kukurydzy (Duvick 2001). Dzięki hybrydyzacji średnie plony kukurydzy w Stanach Zjednoczonych wzrosły z ok. 2,5 t·ha<sup>-1</sup> w latach 30. XX w. do ponad 10 t·ha<sup>-1</sup> obecnie (Duvick 2001). W Polsce hodowla odmian mieszańcowych jest kluczowym kierunkiem doskonalenia genetycznego nie tylko w kukurydzy, lecz także w rozwoju żyta hybrydowego, którego plonowanie przewyższa odmiany populacyjne (Święcicki i in. 2011).

Kolejnym krokiem milowym w hodowli roślin był postęp w biotechnologii i inżynierii genetycznej. Techniki takie jak hodowla kultur tkankowych przyspieszają rozmnażanie (propagację) roślin, natomiast inżynieria genetyczna (transgeneza) umożliwia precyzyjne wprowadzanie genów z innych organizmów lub gatunków. Święcicki i in. (2011) podkreślają znaczenie genetycznych modyfikacji organizmów (GMO) jako elementu nowoczesnych technologii rolniczych, zwracając uwagę na ich potencjalny proekologiczny charakter, zwłaszcza w kontekście ograniczania stosowania środków ochrony roślin. Przykładem są rośliny genetycznie zmodyfikowane (GM), takie jak kukurydza Bt (odporna na szkodniki) czy soja Roundup Ready (tolerancyjna na herbicydy). Ich wprowadzenie przyczyniło się do ograniczenia strat w plonach oraz globalnego wzrostu produkcji o 20–30% w regionach intensywnego stosowania (James 2014, Brookes i Barfoot 2020).

Współczesna hodowla roślin korzysta z zaawansowanych technologii, takich jak selekcja wspomagana markerami molekularnymi (MAS, ang. *Marker-Assisted Selection*), która umożliwia identyfikację genów odpowiedzialnych za pożądane cechy, m.in. wysokie plonowanie, odporność na choroby czy tolerancję na stres abiotyczny

(Collard i Mackill 2008). Markery molekularne stanowią obecnie jedno z kluczowych narzędzi w hodowli roślin również w Polsce, umożliwiając szybszą i bardziej precyzyjną selekcję materiału roślinnego (Święcicki i in. 2011). MAS pozwala na ocenę cech genetycznych już na wczesnych etapach rozwoju roślin, co znacząco skraca czas tworzenia nowych odmian (Tester i Langridge 2010). Przykładowo, w przypadku kukurydzy zastosowanie tej technologii umożliwiło skrócenie procesu hodowli odmian odpornych na suszę o 3–5 lat, co przełożyło się na szybsze wprowadzanie odmian o zwiększonej stabilności plonowania w zmiennych warunkach pogodowych (Ribaut i Ragot 2007).

Najnowocześniejsze metody, takie jak edycja genomu z wykorzystaniem narzędzi CRISPR/Cas9, umożliwiają jeszcze dokładniejsze modyfikacje materiału genetycznego. Technologia ta pozwala na wprowadzanie pożądaných zmian bez konieczności dodawania obcych genów, co czyni ją bardziej akceptowalną społecznie. Edycja genomu otwiera nowe możliwości w zakresie doskonalenia roślin uprawnych, zwłaszcza w kontekście zwiększania plonów, efektywnego wykorzystania składników pokarmowych (np. azotu i fosforu), odporności na patogeny oraz tolerancji na suszę i zasolenie (Jaganathan i in. 2018).

### **Postęp technologiczny w rolnictwie**

Od drugiej połowy XX w. w rolnictwie obserwujemy dynamiczny postęp technologiczny obejmujący zarówno technologie uprawy i maszyny rolnicze, jak i rewolucję cyfrową, która doprowadziła do powstania koncepcji rolnictwa precyzyjnego. Postęp technologiczny przyczynił się do wprowadzania coraz doskonalszych maszyn i narzędzi, ale także do integrowania technologii uprawy z osiągnięciami postępu biologicznego oraz koniecznością dostosowania praktyk rolniczych do zmieniających się warunków środowiskowych (Fountas i in. 2020, Smagacz i Madej 2024).

W ciągu kilkudziesięciu lat agrotechnika uprawy roślin przeszła ewolucję – od tradycyjnych, ręcznych metod do wysokoefektywnych, zmechanizowanych systemów uprawy roli (Święcicki i in. 2011, Smagacz i Madej 2024). Postęp mechanizacyjny pośrednio przyczynił się do wzrostu plonów, umożliwiając poprawę jakości zabiegów agrotechnicznych, lepsze dopasowanie terminów siewu i zbioru, bardziej racjonalne nawożenie, odpowiednie zagęszczenie ładu oraz skuteczniejsze strategie ochrony przed chwastami, chorobami i szkodnikami.

Maszyny rolnicze przeszły transformację – od prostych narzędzi do zaawansowanych technologicznie, np. ciągniki wyposażone w systemy GPS i autopilota, precyzyjne siewniki, opryskiwacze ze zmienną dawką aplikacji oraz kombajny z systemami monitorowania plonów w czasie rzeczywistym umożliwiają optymalizację każdego etapu produkcji (Zhang i in. 2002, Fontas i in. 2020). Zastosowanie precyzyjnych siewników pozwala na optymalne rozmieszczenie nasion, co może zwiększyć plony

o 5–10% (Zhang i in. 2002). Znaczący postęp dokonał się również w mechanizacji zbioru, co przyczyniło się do ograniczenia strat plonów i przyspieszenia prac polowych. Dynamicznie rozwija się także robotyzacja umożliwiająca automatyzację wielu zadań, takich jak: pielenie, punktowe opryski czy monitoring stanu roślin, co ogranicza zapotrzebowanie na pracę ludzką i zwiększa precyzję wykonywanych zabiegów (Shamshiri i in. 2018).

**Cyfryzacja rolnictwa**, oparta na integracji technologii informatycznych, przyczyniła się do rozwoju metod teledetekcji oraz powszechnego wykorzystania w praktyce dronów, satelitów i sensorów naziemnych. Umożliwia to bieżące monitorowanie stanu roślin, gleby i środowiska. Pozwala to na wczesną identyfikację niedoborów składników pokarmowych, stresu wodnego oraz presji chorób i szkodników, a tym samym na szybką interwencję i ograniczenie strat plonów nawet o 10–15% (Weiss i in. 2020).

Rozwój technologii przesyłu danych umożliwia integrację informacji z różnych źródeł – czujników, maszyn, stacji pogodowych oraz systemów monitoringu – i ich analizę przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego (Piwowar 2015, Wolfert i in. 2017).

**Postęp w zakresie rolnictwa precyzyjnego (RP)** pozwala na aplikację nawozów i środków ochrony roślin dostosowaną do przestrzennego zróżnicowania zasobności gleby i zapotrzebowania roślin, na podstawie map zasobności i danych z czujników (Gebbers i Adamchuk 2010, Roberts 2014). Zastosowanie tych technologii może zmniejszyć zużycie nawozów o 10–30%, jednocześnie zwiększając plonowanie o 3–7%.

Technologie RP wspierają także wdrażanie integrowanej ochrony roślin (IPM), m.in. poprzez punktowe aplikacje środków ochrony roślin, na podstawie danych z teledetekcji i systemów monitoringu. Pozwala to na ograniczenie zużycia pestycydów nawet o 70% bez pogorszenia skuteczności zabiegów (Święcicki i in. 2011).

Rozwój technologiczny oraz cyfryzacja znacząco przyczyniły się do wzrostu plonowania we współczesnym rolnictwie. Rolnictwo precyzyjne umożliwia dostosowanie zabiegów do lokalnych warunków siedliskowych i aktualnych potrzeb roślin, optymalizację produkcji, ograniczenie strat oraz zwiększenie odporności systemów rolnych na skutki zmian klimatycznych.

### Postęp w nawożeniu

Wpływ nawożenia na wzrost plonów od dawna uznawany jest za jeden z najważniejszych czynników determinujących poziom plonowania. Zrównoważone i precyzyjne nawożenie roślin stanowi podstawę efektywnej produkcji rolniczej. Lata 60. i 70. XX w. były okresem masowego stosowania nawozów syntetycznych, które odegrały kluczową rolę w intensyfikacji produkcji roślinnej. Intensyfikacja nawożenia mineralnego, szczególnie azotowego, była możliwa dzięki opracowaniu przemysłowo-

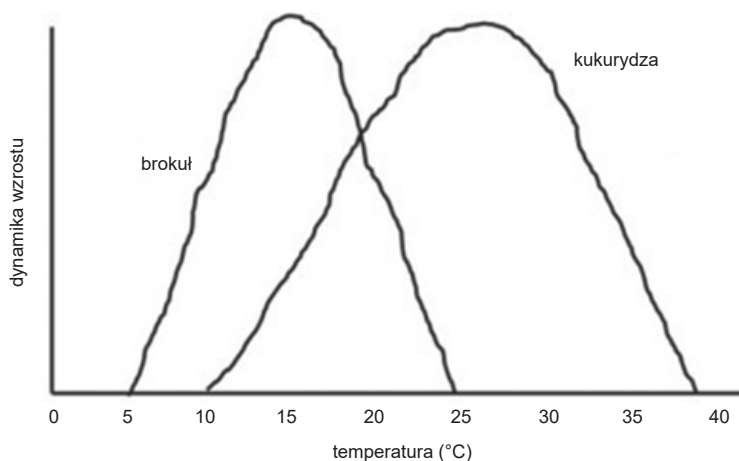
wego procesu syntezy amoniaku (proces Habera-Boscha) (McArthur i McCord 2017). W XXI w. podejście do nawożenia uległo istotnej zmianie – większy nacisk położono na efektywność wykorzystania składników pokarmowych, minimalizację wpływu nawożenia na środowisko oraz precyzyjne zarządzanie składnikami nawozowymi. Wprowadzono nawozy o kontrolowanym uwalnianiu składników pokarmowych (CRF, ang. *Controlled Release Fertilizers*), które ograniczają straty azotu do środowiska i zapewniają jego dostępność w kluczowych fazach rozwojowych roślin (Lam i in. 2020). Z kolei nawozy o zwiększonej efektywności (EEN, ang. *Enhanced Efficiency Fertilizers*) umożliwiają bardziej zrównoważone i ukierunkowane odżywianie roślin (Bindraban i in. 2015). Nowoczesne technologie obejmują także rozwój nanonawozów i biopreparatów mikrobiologicznych. Dzięki zastosowaniu nośników, takich jak nanokrzemionka czy nanozeolity, nanonawozy pozwalają na celowane dostarczanie składników w fazach krytycznych dla plonowania. Badania wykazały, że mogą one zwiększyć plon pszenicy o 55%, kukurydzy o 40%, a ryżu o 25% (Channab i in. 2024). W przypadku roślin strączkowych odnotowano wzrost żywotności pyłku i efektywności zapylenia nawet o 47% (Arora i in. 2024).

### **Czynniki środowiskowe w wykorzystaniu potencjału plonotwórczego**

Efektywne wykorzystanie potencjału genetycznego roślin uprawnych wymaga zrozumienia procesów fizjologicznych oraz mechanizmów ich interakcji ze środowiskiem.

Fotosynteza jest podstawowym procesem metabolicznym w roślinach, gdzie następuje przemiana energii słonecznej w energię chemiczną zakumulowaną w biomasie. Zwiększenie efektywności tego procesu zarówno poprzez działania hodowlane (np. modyfikacje enzymów cyklu Calvina, zmiana architektury liści), jak i poprzez optymalizację warunków środowiskowych (stężenie CO<sub>2</sub>, natężenie światła, temperatura), może istotnie wpłynąć na wzrost plonów (Zhu i in. 2010). Szacuje się, że nawet niewielki wzrost efektywności fotosyntezy o 1% może przełożyć się na zwiększenie plonów o 1–2%, co ma ogromne znaczenie w skali globalnej.

Reakcje roślin na temperaturę różnią się w zależności od gatunku oraz fazy rozwojowej. Każdy gatunek ma określony zakres temperatur, w którym przebiega jego rozwój. Faza wegetatywna najczęściej przyspiesza wraz ze wzrostem temperatury aż do wartości optymalnej, która zwykle jest wyższa niż dla fazy generatywnej. Przykładowo kukurydza (*Zea mays* L.) znosi wyższą temperaturę niż brokuł (*Brassica oleracea* L.) (rys. 4). Zbyt wysoka temperatura może jednak skrócić cykl życia rośliny, ograniczając czas przeznaczony na akumulację plonu, co prowadzi do jego obniżenia (Hatfield i Prueger 2015).



Rys. 4. Reakcja roślin kukurydzy i brokuła na zmiany temperatury, pokazująca dolną, górną i optymalną granicę temperatury dla fazy wzrostu wegetatywnego

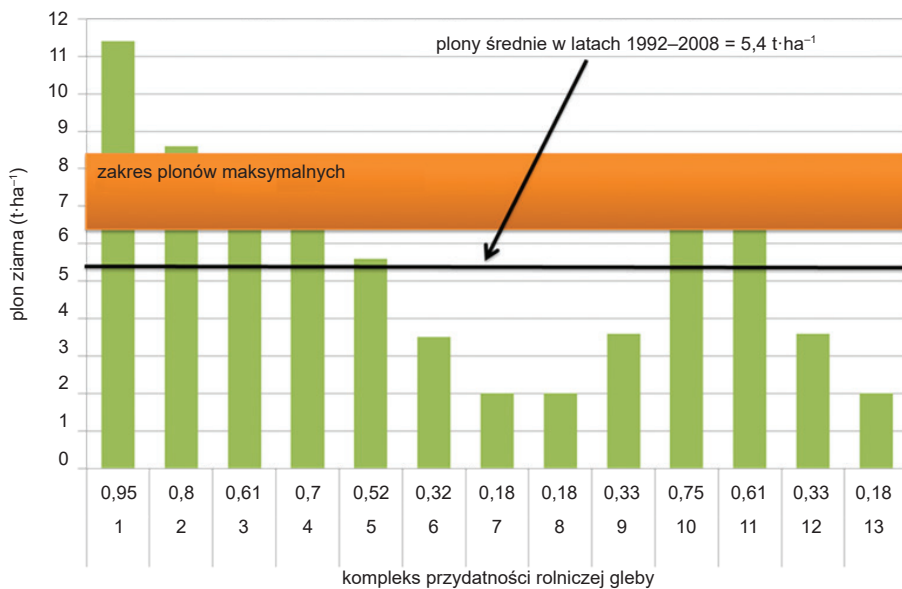
Źródło: Hatfield i Prueger 2015

Wzrost temperatury ma silniejszy wpływ na fazy generatywne niż wegetatywne, ponieważ procesy reprodukcyjne są bardziej wrażliwe na stres cieplny. Wysoka temperatura w czasie kwitnienia i zawiązywania nasion prowadzi do obniżenia żywotności pyłku i zakłócenia procesu zapłodnienia, co skutkuje istotnym spadkiem plonu. Szczególnie wrażliwe są rośliny fotoperiodyczne, takie jak soja (*Glycine max* L.), których rozwój może ulec zaburzeniu w warunkach anomalii termicznych (Hatfield i Prueger 2015). Badania prowadzone przez Hatfielda i Pruegera (2015) w warunkach kontrolowanych wykazały, że wzrost temperatury przyspiesza tempo rozwoju roślin (fenologię), lecz nie wywiera istotnego wpływu na akumulację biomasy w organach wegetatywnych. Kluczowe znaczenie dla efektywności produkcji ma faza rozwojowa, w której występuje stres termiczny. W przypadku kukurydzy (*Zea mays* L.) ekspozycja na stres termiczny w fazie rozwoju generatywnego (zwłaszcza podczas gametogenezy, tj. tworzenia pyłku) może spowodować spadek plonu ziarna sięgający 80–90% w porównaniu z warunkami optymalnymi.

Według Kozyry (2013) w ostatnich dekadach obserwuje się przyspieszenie faz fenologicznych, co wymusza dostosowanie agrotechniki do zmieniających się warunków pogodowych. Stres cieplny w neuralgicznych fazach rozwojowych – takich jak kwitnienie i dojrzewanie – może ograniczać plony.

Równie ważnym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie potencjału plonotwórczego są warunki glebowe. Typ gleby, jej struktura, zawartość materii organicznej, pH oraz zasobność w składniki pokarmowe w istotny sposób wpływają na możliwości wzrostu i plonowania roślin. W Polsce występuje duże zróżnicowanie gleb, od żyznych czarnoziemów po słabe gleby piaszczyste, co wymaga starannego doboru

gatunków i odmian do lokalnych warunków siedliskowych (Witek 1979, Krasowicz i Madej 2020, Paluszkiewicz i in. 2024). Przykładem może być zróżnicowanie plonów kukurydzy w zależności od kompleksu przydatności rolniczej – od ok. 2 do ponad 11 t ziarna·ha<sup>-1</sup> (Grzebisz 2012) (rys. 5).



Rys. 5. Plony maksymalne kukurydzy na tle jakości gleby (wskaźnik produktywności gleby 1 = 100%)  
Źródło: Grzebisz 2012

W kontekście rosnącej częstotliwości i intensywności susz w Polsce – szczególnie w latach 2015 i 2018 – niekorzystne warunki pogodowe powodowały spadki plonów zbóż o 15–30%, w zależności od regionu i stopnia nasilenia stresu (Paluszkiewicz i in. 2024, Sadowski 2024). W regionach szczególnie narażonych na niedobory wody korzystniejsze rezultaty uzyskuje się przy uprawie odmian pszenicy ozimej, które charakteryzują się mniejszymi stratami plonu w porównaniu z odmianami jarymi (Oleksiak i in. 2022). Jednym z kluczowych elementów poprawy produktywności gleb jest zwiększenie zawartości materii organicznej i wdrażanie uprawy konserwującej. Takie praktyki mogą zwiększyć plonowanie nawet o 10–20% na glebach słabej jakości, głównie dzięki poprawie retencji wodnej i dostępności składników pokarmowych (Lal 2004).

Warto zaznaczyć, że w ostatnich latach szczególnego znaczenia nabiera efektywność wykorzystania wody i składników pokarmowych, tj. WUE (ang. *Water Use Efficiency*) i NUE (ang. *Nutrient Use Efficiency*). W obliczu zmian klimatycznych i wzrastających kosztów nawozów mineralnych efektywne gospodarowanie tymi zasobami staje się kluczowe dla zrównoważonego rolnictwa. Odmiany roślin charakteryzujące się wyso-

ką WUE wytwarzają więcej biomasy przy mniejszym zużyciu wody. Z kolei wysoka NUE oznacza lepsze wykorzystanie azotu i fosforu z gleby, ograniczając potrzebę intensywnego nawożenia oraz straty tych pierwiastków do środowiska (Hawkesford i in. 2013). Coraz częstsze susze w Polsce (Kundzewicz i Kozyra 2011, Sadowski 2024) podkreślają konieczność upowszechnienia odmian roślin o zwiększonej tolerancji na niedobory wody oraz tolerujących wysokie temperatury (Święcicki i in. 2011).

W praktyce rolniczej zastosowanie technik zwiększających WUE – takich jak uprawa konserwująca czy dobór odpowiednich odmian – może przyczynić się do zwiększenia plonów 15–20% w warunkach umiarkowanego deficytu wody (Tester i Langridge 2010). Właściwe zarządzanie nawożeniem zarówno naturalnym (Wach i Kopiński 2024), jak i mineralnym (Smagacz i Madej 2024) jest również kluczowe dla poprawy efektywności nawożenia (Wicki 2008).

Wdrażanie rozwiązań agrotechnicznych zwiększających zdolność gleby do zatrzymywania wody oraz poprawiających efektywność jej wykorzystania przez rośliny stało się koniecznością. Równoległe istotne są działania hodowlane ukierunkowane na tworzenie odmian bardziej odpornych na stres abiotyczny – w tym suszę i wysokie temperatury (Wahid i in. 2007, Święcicki i in. 2011).

### **Transfer wiedzy we wdrażaniu innowacji**

Transfer wiedzy odgrywa kluczową rolę w procesie wdrażania postępu biologicznego i technologicznego w rolnictwie, stanowiąc pomost między badaniami naukowymi a praktyką rolniczą. Nawet najbardziej innowacyjne rozwiązania genetyczne czy technologiczne nie przyniosą oczekiwanych rezultatów, jeśli nie zostaną efektywnie przekazane, zrozumiane i zaadaptowane przez rolników (Kristjanson i in. 2012, Oleksiak 2013).

Na początku XX w. transfer wiedzy w rolnictwie opierał się głównie na bezpośrednich kontaktach między naukowcami, doradcami rolniczymi a rolnikami. Dominowały formy takie jak spotkania w gospodarstwach, dni pola oraz publikacje w prasie rolniczej i materiałach drukowanych. W miarę postępu naukowego i technicznego system doradztwa rolniczego stawał się coraz bardziej sformalizowany, oparty na współpracy z państwowymi instytutami badawczymi i uczelniami wyższymi, które odgrywały kluczową rolę w upowszechnianiu wyników badań.

Wraz z rozwojem mediów masowych na przełomie XX i XXI w., pojawiły się nowe kanały komunikacji, takie jak radio, telewizja, a następnie Internet. Cyfryzacja zrewolucjonizowała dostęp do informacji – współcześnie rolnicy mogą korzystać z platform e-learningowych, aplikacji mobilnych, mediów społecznościowych oraz specjalistycznych portali branżowych, co pozwala na szybkie pozyskiwanie aktualnej i dostosowanej do potrzeb wiedzy.

Kluczowe znaczenie dla skutecznego transferu wiedzy ma utrzymanie i rozwój silnego, profesjonalnego i dobrze finansowanego systemu doradztwa rolniczego.

Doradcy powinni być wyposażeni w aktualną wiedzę, narzędzia cyfrowe i kompetencje komunikacyjne, które umożliwiają im efektywną współpracę z rolnikami oraz dostosowanie zaleceń do lokalnych warunków środowiskowych, glebowych i ekonomicznych (Garforth i in. 2006, Zaliwski 2013).

Badania wskazują, że tradycyjne, bezpośrednie formy doradztwa – takie jak wizyty w gospodarstwach, demonstracje technologiczne i konsultacje indywidualne – nadal pozostają najskuteczniejsze w przypadku złożonych i trudnych do wdrożenia innowacji (Sutherland i in. 2014). Współczesne podejścia do transferu wiedzy coraz częściej opierają się na koncepcji współtworzenia innowacji (ang. *co-innovation*), w której rolnicy, naukowcy, doradcy i inne podmioty (np. firmy technologiczne, administracja publiczna) współpracują w ramach sieci wiedzy. Przykładem są tzw. żywe laboratoria (ang. *Living Labs*) i grupy operacyjne w ramach Europejskiego Partnerstwa Innowacyjnego na rzecz wydajnego i zrównoważonego rolnictwa (EIP-AGRI), które promują wymianę doświadczeń i wspólne rozwiązywanie problemów rolnictwa. Takie podejście sprzyja większemu zaangażowaniu praktyków i zwiększa skuteczność wdrażania innowacji w warunkach produkcyjnych.

### Podsumowanie

Rozwój rolnictwa w XX i XXI w. to historia bezprecedensowego wzrostu plonów, napędzanego synergicznym oddziaływaniem innowacji biologicznych i technologicznych. Zapoczątkowana w połowie XX w. zielona rewolucja poprzez wprowadzenie wysoko plonujących odmian oraz intensyfikację agrotechniki, radykalnie zwiększyła globalną produkcję żywności i znacząco przyczyniła się do poprawy bezpieczeństwa żywnościowego zarówno na świecie, jak i w Polsce. Średnie plony pszenicy ozimej wzrosły z ok. 2 t·ha<sup>-1</sup> w latach 60. XX w. do ponad 5 t·ha<sup>-1</sup> obecnie (GUS 1956–2024).

Kluczowym elementem tego postępu były osiągnięcia genetyki. Ewolucja metod hodowlanych – od klasycznej selekcji i krzyżowania, przez biotechnologię i inżynierię genetyczną, aż po precyzyjne techniki wspomagane markerami (MAS) i edycję genomu – umożliwiła tworzenie odmian o wyższym potencjale plonowania, lepszym wykorzystaniu zasobów (wody, składników pokarmowych) oraz zwiększonej odporności na stresy biotyczne i abiotyczne, takie jak susza, wysokie temperatury czy choroby.

Pomimo osiągnięć hodowlanych wciąż utrzymuje się znaczna luka w plonowaniu (ang. *yield gap*), czyli różnica między potencjalnym a rzeczywistym plonem. W Polsce szacuje się, że niewykorzystany potencjał plonowania zbóż może sięgać 20–30%, co wskazuje na potrzebę dalszej optymalizacji technologii produkcji oraz lepszego wykorzystania istniejącego potencjału biologicznego odmian.

Zrozumienie fizjologii roślin – m.in. efektywności fotosyntezy, wykorzystania wody i składników pokarmowych – oraz ich dynamicznych interakcji ze środowiskiem (warunki termiczne, długość okresu wegetacji, właściwości gleby, niedobory

wody, stres termiczny) jest kluczowe dla efektywnego wykorzystania genotypu i zmniejszenia luki plonowania.

Postęp technologiczny – obejmujący rozwój zaawansowanych maszyn rolniczych (ciągniki z autopilotem, siewniki precyzyjne, systemy zbioru), a także cyfryzację produkcji rolnej (teledetekcja, czujniki, sztuczna inteligencja, systemy informacji przestrzennej) – znacząco usprawnił agrotechnikę i umożliwił zarządzanie produkcją na poziomie mikroparceli. Rolnictwo precyzyjne, dzięki optymalizacji nawożenia, punktowym zabiegom ochrony roślin oraz dostosowaniu działań do zmienności przestrzennej i czasowej środowiska, pozwala na zwiększenie plonów przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia środków produkcji oraz minimalizacji presji środowiskowej.

Wiodącą rolę w budowaniu rolnictwa odpornego na zmiany klimatu (ang. *Climate-Smart Agriculture*) odgrywa skuteczny transfer wiedzy – od nauki do praktyki. System ten, który ewoluował od tradycyjnego doradztwa do nowoczesnych, cyfrowych platform wymiany wiedzy, umożliwi rolnikom adaptację do zmieniających się warunków klimatycznych poprzez wdrażanie innowacyjnych rozwiązań i bardziej zrównoważone zarządzanie zasobami środków produkcji. Efektywność transferu wiedzy zależy zarówno od jakości systemów doradztwa, jak i zaangażowania wszystkich uczestników systemu wiedzy i innowacji rolniczej (AKIS). Obecnie nowoczesne formy współtworzenia innowacji, polegają na tworzeniu tzw. żywych laboratoriów (ang. *Living Lab*), które stanowią platformy współpracy między rolnikami, naukowcami i instytucjami doradczymi.

## Literatura

1. A r o r a R., Singh R., Kaur J.: Bionanofertilizers: emerging solution for sustainable crop production. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2024, **22**, 100797.
2. B i n d r a b a n P.S., Muiderts E.D., Koenraads H.: Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake and reduced nutrient losses. *Global Food Security*, 2015, **4**: 26-37.
3. B r o o k e s G, Barfoot P.: Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996-2018: impacts on pesticide use and carbon emissions. *GM Crops Food*, 2020, **11(4)**: 215-241.
4. C h a n n a b A.R., Karadi B.V., Hipparagi R.V.: Impact of nanofertilizers on crop yield and nutrient uptake: A review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2024, **24**: 2341-2352.
5. C o l l a r d B. C.Y., Mackill D.J.: Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363(1491)**: 557-572.
6. C o n w a y G.: *The Doubly Green Revolution: Food for all in the 21st Century*. Cornell University Press, 1997.
7. D o n a l d C.M., Hamblin J.: The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advances in Agronomy*, 1976, **28**: 361-405.
8. D o r o s z e w s k i A., Józwicki T., Wróblewska E., Kozyra J.: Susza rolnicza w Polsce w latach 1961–2010. Monografia IUNG-PIB, Puławy, 2014.
9. D u v i c k N.: The continuing evolution of plant breeding. *Science*, 2001, **291(5505)**: 856-859.
10. D w o r a k o w s k i T., Kuźmicki J., Zawojski K.: Plonowanie zbóż w latach 1960–2009 w doświadczeniach oraz warunkach produkcyjnych w województwie podlaskim. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2018, **2**: 103-112.

11. Evenson R.E., Gollin D.: Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 2003, **300(5620)**: 758-762.
12. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations (2025) – with major processing by Our World in Data. “Land used for cereal production – UN FAO” [dataset]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Production: Crops and livestock products”. (12.10.2025).
13. Fountas S., Mylonas., Malounas I., Rodias E., Hellmann S., Ch.: Pekkeriet E. Agricultural Robotics for Field Operations, review. *Sensors*, 2020, 20, **2672**: 14-27.
14. Garforth C., Rehman T., Viegas L.: Review of the provision of extension services to farmers by the public sector in Europe. *Agricultural Economics*, 2006, **34(2)**: 125-135.
15. Gebbers R., Adamchuk S.I.: Precision agriculture and food security. *Science*, 2010, **327(5967)**: 828-831.
16. Godfray H.C.J., Garnett T.: Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, **369(1639)**, 20120273.
17. Grzebiś W.: Technologie nawożenia roślin uprawnych – fizjologia plonowania TOM 2 Zboża i kukurydza, 2012, PWRiL ss. 280.
18. GUS. 1956–2024 Rocznik Statystyczny Rolnictwa (wybrane lata w celu kompilacji danych). Warszawa: GUS.
19. Hatfield J. L., Prueger J.H.: Temperature extremes and crop production: A review. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, **201(5)**: 337-352.
20. Hawkesford M.J., Araus J.L., Atherton K., Hartley A., Lightfoot P., Salt D., Poole D.: New approaches to understanding and improving nutrient use efficiency in plants. *Plant and Cell Physiology*, 2013, **54(5)**: 793-802.
21. Jagathan V., Kannan B., Scarpellin I. M., Platonov D., Melchiori F., Prudencio M., Chopra V.L.: Crispr/Cas9 for crop improvement: Perspectives and challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2018, **37(3)**: 205-219.
22. James C.: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. ISAAA Brief No. 49. ISAAA: Ithaca, NY, 2014.
23. Kozyra J.: Wpływ prognozowanych zmian temperatury powietrza na fenologię zbóż ozimych w Polsce. Monografie i Rozprawy Naukowe. Puławy, 2013.
24. Krasowicz S., Madej A.: Organizacyjno-ekonomiczne uwarunkowania produkcji zbóż w różnych rejonach Polski. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2020, **62(16)**: 35-70.
25. Kristjansson P., Harvey B., Thornton P.: Learning platforms for climate-smart agriculture. *Agriculture & Food Security*, 2012, **1(1)**: 7.
26. Kundzewicz Z. W., Kozyra J.: Ograniczanie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Polish Journal of Agronomy*, 2011, **7**: 68-81.
27. Lal R.: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304(5677)**: 1623-1627.
28. Lam S.K., Mitchell A., Richards M.: Controlled-release fertilizers as a tool to reduce nitrogen losses and improve productivity. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, **40**: 23.
29. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty S.: Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature Food*, 2016, **3(2)**: 1-5.
30. Marciniak K.: Nowoczesne technologie w produkcji roślinnej – przyjazne dla człowieka i środowiska. *Polish Journal of Agronomy*, 2011, **7**: 102-112.
31. Matyka M., Krasowicz S.: Zmiany w regionalnym zróżnicowaniu polskiego rolnictwa; integracja versus polaryzacja. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2024, **73(27)**: 7-21.
32. McArthur J.W., McCord G.C.: Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *Journal of Economic Growth*, 2017, **22**: 1-33.
33. Oleksiak T., Spyroglou I., Paoń D., Matysik P., Pernisová M., Rybka K.: Effect of drought on wheat production in Poland between 1961 and 2019. *Crop Science* 2022, **62**: 537-964.

34. Oleksiak T.: Stosowanie kwalifikowanego materiału siewnego a plonowanie zbóż ozimych. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 2013, **268**: 87-99; doi: 10.37317/biul-2013-0035.
35. Paluszkie wicz M., Torzyński M., Bielecki J., Abdullaieva S., Kryszak Ł.: Impact of Weather Conditions on Cereal Yields in Poland / Wpływ warunków pogodowych na plony zbóż w Polsce. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics, 2024, **379(2)**: 1-18.
36. Pingali P.L.: Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, **109(31)**: 12302-12308.
37. Piwoń A.: Współczesne kierunki rozwoju rolnictwa precyzyjnego. Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G, 2015, **102(2)**: 35-47.
38. Podleśny J., Grabiński J.: Wybrane zagadnienia dotyczące postępu biologicznego i technologicznego w produkcji zbóż i roślin strączkowych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2019, **60(14)**: 9-23.
39. Reynolds M., Pelton E.M., Reyes-Villanueva H.: Agronomic and physiological approaches to increase yield potential in wheat. Journal of Experimental Botany, 2011, **62(1)**: 221-231.
40. Ribaut J.M., Ragot M.: Marker-assisted selection for drought tolerance in maize: a case study. Journal of Experimental Botany, 2007, **58(2)**: 351-360.
41. Riedesel L., Ma D., Piepho H.P., Laidig F., Moller M., Golla B., Kautz T., Feike T.: Climate change induced heat and drought stress hamper climate change mitigation in German cereal production. Field Crops Research, 2024, **317(109551)**: 1-15.
42. Ritchie H., Rodés-Guirao L., Mathieu E., Gerber M., Ortiz-Ospina E., Hasell J., Roser M.: Population Growth Explore global and national data on population growth, demography, and how they are changing. OurWorldinData.org, 2023; <https://ourworldindata.org/population-growth> (dostęp 15.10.2025).
43. Ritchie H., Rosado P., Roser M.: Crop Yields. 2022. Published online at OurWorldinData.org. 2022; <https://ourworldindata.org/crop-yields> (dostęp 25.10.2025).
44. Robert S.L.: The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Plant and Soil, 2014, **381(1-2)**: 1-12.
45. Sadowski M.: Ocena potencjalnych skutków społeczno-gospodarczych zmian klimatu w Polsce. WWF Polska, 2024, ss. 11.
46. Shamsiri R.R., Kamaruzzaman S.M., Yakub M.A., Kahn M.R.I., Nazir S., Huzaira M., Bandara M.: The future of robotics in agriculture: A review. Agricultural and Biological Research, 2018, **34(2)**: 101-118.
47. Smagać J., Madej A.: Zmiany w zużyciu wybranych środków produkcji w Polsce w latach 2004–2022. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 171-186.
48. Sułek A., Nieróbca A., Baranowska A., Leszczyńska D.: Kierunki zmian w produkcji zbóż po akcesji Polski do Unii Europejskiej. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 51-61.
49. Sutherland A., Mcroberts N., Bountoulas A.: Agricultural extension and knowledge transfer. In: Knowledge management in agriculture and rural development. CABI, 2014.
50. Świącicki W.K., Surma M., Koziara W., Skrzypczak G., Szukała J., Bartkowiak-Broda I., Zimny J., Banaszak Z., Marciniak K.: Nowoczesne technologie w produkcji roślinnej – przyjazne dla człowieka i środowiska. Polish Journal of Agronomy, 2011, **7**: 102-112.
51. Tester M., Langridge P.: Breeding technologies to increase crop production in a changing climate. Science, 2010, **327(5967)**: 814-818.
52. Van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wright A.D.: Yield gap analysis of crop production systems. In: Food security in a world of growing population and finite resources. Springer, 2013, 149-161.
53. Wach D., Kopiński J.: Zmiany w gospodarowaniu nawozami naturalnymi w polskim rolnictwie pomiędzy rokiem 2002 a 2020. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, **73(27)**: 131-147.
54. Wahid A., Ahmad I., Rashid A., Basra S.M.A.: Heat stress: An overview. In: Plant Acclimation to Environmental Stress. Springer, 2007, pp. 1-25.

55. We i s s M., Jacquet O., Allain G., Debaecker P.: Remote sensing applications for agriculture and environmental monitoring. *Agronomy for Sustainable Development*, 2020, **40(2)**: 1-18.
56. W i c k i L.: Postęp w plonowaniu odmian pszenicy ozimej i żyta w doświadczeniach odmianowych w Polsce. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 2017, **XIX(4)**: 184-189.
57. W i c k i L.: Wykorzystanie postępu odmianowego w produkcji zbóż w polskim rolnictwie. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G*, 2008, **94(2)**: 136-146.
58. W i t e k T.: Wpływ jakości gleb na plonowanie roślin uprawnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1979, **224**: 35-47.
59. W o l f e r t S., Georgiadis P., Verdouw C., Klerkx L., Beatsma P.: Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 2017, **153**: 69-80.
60. Z h a n g N., Wang M., Wang N.: Precision agriculture – A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, **35(1)**: 45-59.
61. Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R.: Improving photosynthesis for greater yield: The need for an integrative approach. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, **61**: 235-261.
62. Zaliwski A.S.: Informacja, wiedza, decyzje i systemy wspomagania decyzji. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Puławy 2013, **33(7)**: 45-68.

---

Adres do korespondencji:

*dr Anna Nieróbca*  
*Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii*  
*IUNG-PIB*  
*ul. Czartoryskich 8*  
*24-100 Puławy*  
*tel. 81 4786754*  
*e-mail: Anna.Nierobca@iung.pulawy.pl*

---

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| AUTOR         | ORCID              |
| Anna Nieróbca | 000-0002-8611-6515 |