

DOMINIKA BOGUSZEWSKA-MAŃKOWSKA 

* Autor korespondencyjny /corresponding author: email d.boguszevska-mankowska@ihar.edu.pl

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Radzikowie, Oddział w Jadwisinie,
Zakład Agronomii Ziemniaka, 05-140 Jadwisin, ul. Szaniawskiego 15

Plant Breeding and Acclimatization Institute – National Research Institute in Radzików, Division Jadwisin,
Department of Potato Agronomy, 05-140 Jadwisin, Szaniawskiego str. 15

Ziemniak kontra susza

Potato versus drought

DOI: <https://doi.org/10.12775/KOSMOS.2025.012>

Abstrakt

W pracy przedstawiono problem tolerancji ziemniaka na suszę glebową. Omówiono zapotrzebowania wodne w różnych fazach rozwoju rośliny z uwzględnieniem okresów krytycznych. Zwrócono uwagę na zróżnicowanie odmianowe w reakcji na suszę i różnorodność strategii w utrzymaniu plonu. Podkreślono rolę systemu korzeniowego w walce z suszą glebową. Nakreślono potrzebę dalszych badań fizjologicznych i biochemicznych w celu zrozumienia mechanizmów warunkujących tolerancję ziemniaka na suszę glebową.

Słowa kluczowe: ziemniak, susza, system korzeniowy, okresy krytyczne, genotyp

Abstract

This paper presents the problem of potato tolerance to soil drought. Water requirements at various stages of plant development are discussed, including critical periods. Varietal variation in drought response and the diversity of yield-maintenance strategies is highlighted. The role of the root system in combating soil drought is emphasized. The need for further physiological and biochemical research is outlined to understand the mechanisms underlying potato tolerance to soil drought.

Key words: potato, drought, root system, critical periods, genotype

WPROWADZENIE

Ziemniak (*Solanum tuberosum* L.) należy do czterech najważniejszych dla globalnego bezpieczeństwa żywnościowego roślin uprawnych z globalną produkcją 370 mln ton bulw. Uprawiany jest w ponad 100 krajach na powierzchni 17 mln ha i konsumowany przez ponad bilion ludzi na świecie. Wzrost globalnej produkcji na przestrzeni lat wynika przede wszystkim ze stałego wzrostu potencjału plonowania odmian ziemniaka. Europa jest drugim co do wielkości regionem produkcji ziemniaków (125,43 mln ton) po Azji (140,6 mln ton). Chiny, Indie, Ukraina, Rosja, USA to najwięksi producenci ziemniaków, a następnie, Niemcy, Francja, Holandia, Bangladesz i Polska (Alvarez-Morezuelas i in., 2022; Nasir i Toth, 2022).

Połączenie wysokiej wartości energetycznej z dużą zawartością białka i witamin sprawia, że bulwy ziemniaka są cennym źródłem pożywienia. Ziemniak posiada dużą wartość energetyczną w porównaniu z innymi roślinami uprawnymi, dostarczając 5600 kcal energii na każdy m³ wody zużytej przez plantację, więcej niż kukurydza (3860 kcal/m³), zboża (2300 kcal/m³), czy ryż o wartości energetycznej 2000 kcal/m³ (Scott i in., 2000). Oprócz celów konsumpcyjnych ziemniak wykorzystywany jest m.in. w przemyśle skrobiowym, tekstylnym, papierniczym oraz jako biopaliwo. Ze względu na wszechstronne użytkowanie jest cenną rośliną uprawną zarówno w krajach rozwiniętych jak i rozwijających się.

Gatunek ten pochodzi z Ameryki Południowej, z terenów obecnego Chile, Peru i Boliwii, gdzie ślady jego uprawy sięgają 4 tysięcy lat p.n.e. Dwa podgatunki *S. tuberosum*: *andigena* i *tuberosum*, sprowadzone do Europy w drugiej połowie XVI w., uważa się za przodków współczesnego ziemniaka uprawnego.

Nasilające się, nieprzewidywalne zjawiska atmosferyczne, wzrost kosztów produkcji zbóż oraz zainteresowanie biopaliwami podnoszą znaczenie jego uprawy (Sprenger i in., 2016).

Susza stanowi poważne wyzwanie dla produkcji ziemniaków na całym świecie. Przewiduje się, że zmiana klimatu jeszcze bardziej pogłę-

bi to wyzwanie, zwiększając narażenie upraw ziemniaków na suszę o różnym nasileniu i częstotliwości. Hodowlę odmian odpornych na suszę można rozpocząć poprzez identyfikację cech fizjologicznych i biochemicznych związanych z suszą oraz ich wykorzystanie w nowych odmianach ziemniaka. Susza wywołuje szeroki zakres reakcji u ziemniaków, od zmian fizjologicznych aż po wahania tempa wzrostu i plonowania. Wiedza na temat tych reakcji jest niezbędna do pełnego zrozumienia mechanizmu tolerancji ziemniaków na suszę, co pomoże w identyfikacji odmian odpornych na suszę.

WYMAGANIA WODNE I TEMPERATUROWE

Ziemniak jest typową rośliną klimatu umiarkowanego z występującą dobową amplitudą temperatury (chłodniejsze noce, cieplejszy dzień), rośnie i rozwija się najlepiej w temperaturze ok. 20°C. Inne są jednak wartości graniczne dla rozwoju części nadziemnej i inne dla bulw. Część nadziemna rośliny ziemniaka rozwija się najlepiej w temperaturze ok. 20–25°C, a optymalna temperatura dla tuberyzacji i wzrostu bulw wynosi 15–20°C. W temperaturze wyższej od optymalnej dochodzi do zahamowania tuberyzacji i intensywnego wzrostu części nadziemnej (Hancock i in., 2014).

Jednym z głównych czynników ograniczających produktywność ziemniaka są jego duże potrzeby wodne. Zapotrzebowanie na wodę roślin ziemniaka wynosi od 400 do 600 litrów potrzebnych do wyprodukowania 1 kg suchej masy bulw. W warunkach polowych wymagania wodne wahają się między 350 a 500 mm w sezonie wegetacyjnym, w zależności od okresu uprawy, warunków środowiskowych oraz rodzaju gleby, a także od odmiany. Ziemniak wymaga zróżnicowanych w czasie wegetacji, ale równomiernie rozłożonych opadów w poszczególnych fazach rozwojowych roślin. W przypadku polskiego klimatu, ryzykiem są zarówno deficyt opadów jak i występujące ekstrema. W ostatnich 10 latach średnia ilość opadów w okresie wegetacji zmniejszyła się a równocześnie wzrosła temperatura powietrza, co dodatkowo pogarsza warunki dla wzrostu i roz-

woju ziemniaka. Potrzeby wodne ziemniaka zmieniają się w ciągu okresu wegetacji wraz z rozwojem roślin i są zróżnicowane w różnych fazach rozwojowych, które przedstawia tabela 1 (Głuska 2004, Nowacki 2016). W okresie od początku kwitnienia do żółknięcia roślin pożądane jest utrzymanie wilgotności gleby na poziomie około 70% polowej pojemności wodnej. Potrzeby wodne roślin są wtedy największe i największa jest wrażliwość roślin na suszę, a zapotrzebowanie dzienne roślin wynosi ponad 3 mm opadu (Nowacki 2018).

Tabela 1. Wymagania wodne w poszczególnych fazach rozwojowych roślin ziemniaka

Faza rozwojowa roślin	Okres kalendarzowy dek. m-ce	Optymalne opady (mm/dekadę)
Sadzenie	I. 04 – I. 05	< 10
Od posadzenia do końca wschodów	I. 04 – III. 05	15
Od zakończenia wschodów do zawiązania pąków kwiatowych	II. 05 – III. 06	15–25
Okres kwitnienia	II. 06 – III. 07	25–30
Kumulacja plonu bulw	III. 06 – III. 08	30–35
Dojrzewanie (żółknięcie) roślin	I. 08 – III. 09	ok. 15–20
Zbiór	I. 09 – I. 10	ok. 10–15

JAK ROŚLINA ZIEMNIAKA REAGUJE NA SUSZĘ

Ziemniak jest uznawany za roślinę wrażliwą na niedobory wody w glebie, praktycznie w każdej fazie rozwojowej (Schafleitner i in., 2007, Monneveux i in., 2013), chociaż obserwuje się zróżnicowanie odmianowe w reakcji na stres (Stark i in., 2013; Boguszevska-Mankowska i in., 2022).

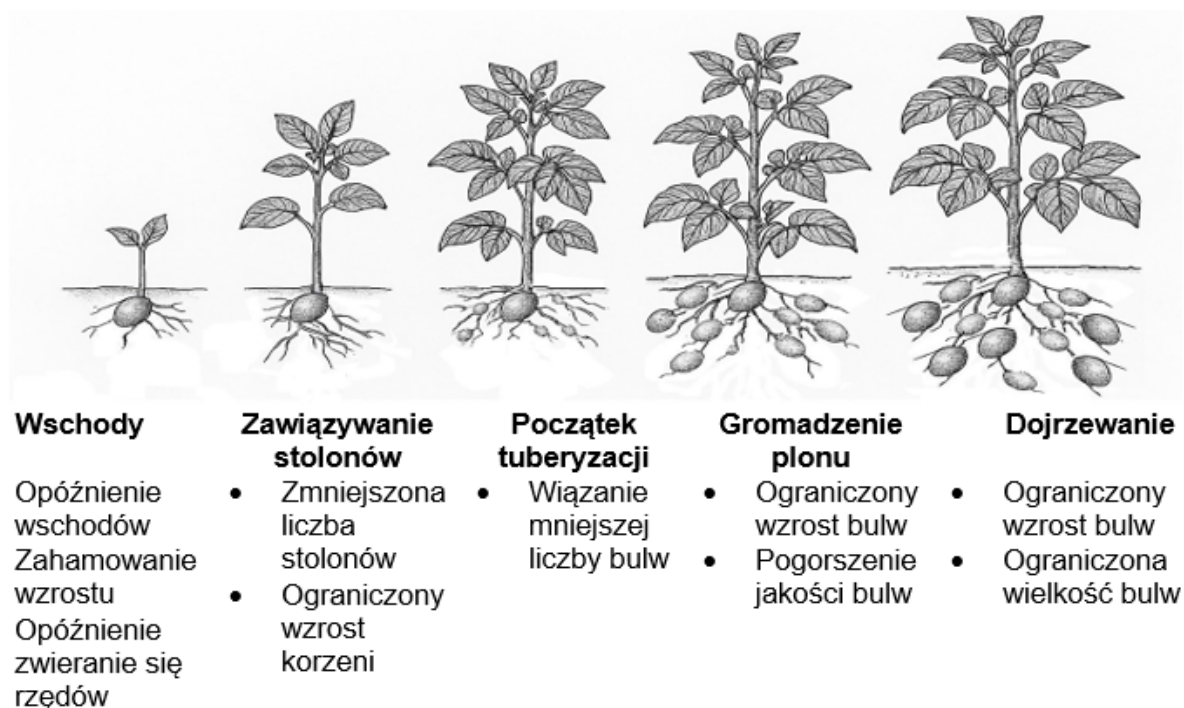
Wpływ suszy na wzrost i rozwój roślin ziemniaka był podejmowany przez wielu autorów, a podsumowanie ich prac przedstawia tabela 2 z uwzględnieniem obserwacji cechy zebranych przez Obidiegwu i in. (2015), Dahal i in. (2019) oraz Nasir i Toth (2022). Chociaż badania te często przynoszą pozornie sprzeczne wyniki, należy uwzględnić długość trwania suszy, częstotliwość i natężenie. We wczesnych etapach rozwoju susza powoduje zmniejszenie powierzchni asymilacyjnej liści, obniżenie aktywności fotosyntezy, zmniejszenie przenikania asymilatów do bulwy, a w konsekwencji zaburzenie procesu formowania bulw.

Tabela 2. Wpływ stresu suszy na różne cechy morfologiczne ziemniaka w świetle doniesień różnych badań (Obidiegwu i in. 2015; Dahal i in. 2019; Nasir i Toth 2022)

Obserwacja	Cecha morfologiczna
Obniżenie	liczba łodyg, pokrycie łanu, grubość łodygi, świeża i sucha masa roślin, powierzchnia roślin, rozmiar liścia, czas występowania liści, potencjał wodny liścia, liczba liści, wskaźnik uwodnienia RWC, wysokość roślin, plon bulw, sucha masa bulw, liczba bulw, liczba stolonów, długość korzeni, liczba korzeni, średnica i biomasa korzeni, potencjał wodny korzeni, sucha masa korzeni, zawartość chlorofilu w liściach, fotosynteza, zawartość karotenoidów
Wzrost	liczba bulw, liczba stolonów, długość korzeni, sucha masa korzeni, zawartość chlorofilu, temperatura liścia, zawartość antyoksydantów

KIEDY SUSZA NAJBARDZIEJ DOKUCZA – OKRESY KRYTYCZNE

W każdej fazie wegetacji susza powoduje inne zmiany (ryc. 1). Niemniej jednak, badania wskazują się, że okres tuberyzacji i formowanie plonu bulw to najbardziej krytyczne etapy stresu suszy (Aliche i in., 2018). Susza występująca podczas wschodów, opóźnia je, hamuje wzrost roślin oraz opóźnia zwiarcie rzędów. W fazie za-



Rycina 1. Reakcja ziemniaka na suszę glebową w kolejnych fazach rozwojowych ziemniaka.

wiązywania stolonów susza zmniejsza ich ilość i ogranicza prawidłowy wzrost korzeni. Niedobory wody występujące na początku okresu tuberyzacji powodują wiązanie mniejszej liczby bulw. Najbardziej krytycznym okresem pod względem zaopatrzenia roślin ziemniaka w wodę jest faza gromadzenia plonu. Wówczas obserwowane są największe straty plonu i pogorszenie się jego jakości. Przesuszenie redlin po wcześniejszym dużym uwilgotnieniu gleby powodować może ich spękanie i zielenienie bulw. Okresy suszy i duże wahania zaopatrzenia w wodę są główną przyczyną pogorszenia jakości plonu w wyniku tworzenia bulw lalkowatych, spękanych, a także wtórnego wiązania bulw, pustowatości, rdzawej plamistości miąższu (ryc. 2) i występowania tzw. technologicznych wad bulw objawiających się nierównomiernym rozkładem cukrów w miąższu, co powoduje nieprawidłowe wybarwienie frytek i chipsów (George i in., 2017; Dahal i in., 2019). Większość sacharozy produkowanej w liściach jest przemieszczana do rozwijających się bulw, gdzie przekształcana w skrobię, a pozostała sacharoza jest wykorzystywana do oddychania. Po okresie suszy bulwy mają więcej suchej

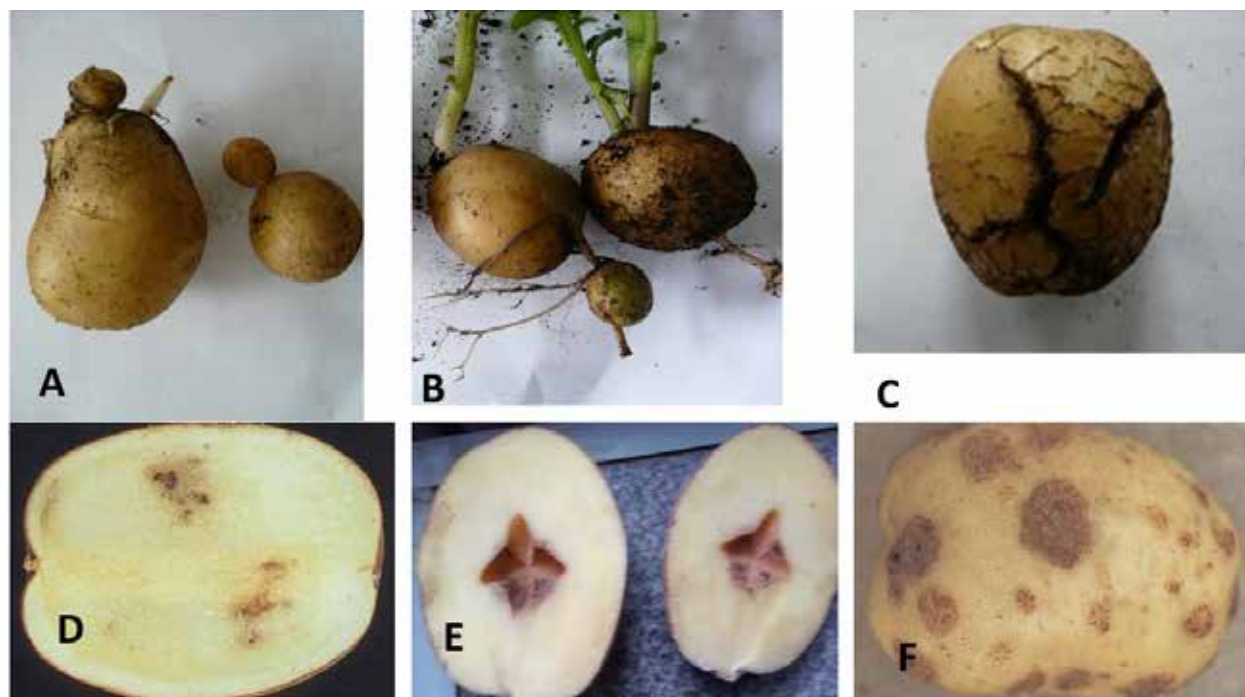
masy, mniej skrobi, a więcej cukrów redukujących. Skrobia zostaje zhydrolizowana do cukrów prostych, które są potrzebne roślinie do zintensyfikowania wzrostu. Następstwem tego zjawiska jest wzrost zawartości cukrów. Wyższa koncentracja cukrów redukujących (glukozy i fruktozy) wpływa na intensywność przebiegu reakcji Maillarda i powoduje brązowienie produktów (Zgórska i Grudzińska, 2012).

Zmiany te w konsekwencji obniżają jakość plonu, zmniejszają plon handlowy czy też dyskwalifikują towar z obrotu rynkowego.

WAŻNA ROLA SYSTEMU KORZENIOWEGO – CAŁA NADZIEJA W KORZENIACH

Ziemniak należy do roślin o płytkim systemie korzeniowym i małej jego powierzchni, a główna masa korzeni skoncentrowana jest w warstwie gleby 30–40 cm, co również przyczynia się do wrażliwości tej rośliny na suszę glebową (Zarzyńska i in. 2017; Zinta i in. 2022).

Różnice w wielkości systemu korzeniowego ziemniaka zarysowują się najbardziej w początkowej fazie kwitnienia roślin, czyli wcześniej niż różnice dotyczące części nadziemnej rośliny.



Rycina 2. Wady bulw spowodowane nierównomiernym zaopatrzeniem w wodę. A–B – Odrosty wtórne; C – Spękania bulw; D – Rdzawa plamistość miąższu, E- Brunatna pustowatość bulw, F – Parch zwykły

ny. Większy system korzeniowy w genotypach ziemniaka, szczególnie korzeni związanych ze stolonami (tzw. korzenie stolonowe), zwiększa zdolność roślin do tolerowania suszy i pozwala na utrzymanie stabilnego plonu. Genotypy te osiągają również szybsze zwanie łanu, co wydłuża czas trwania maksymalnej aktywności fotosyntetycznej i zmniejsza ilość wody traczonej z gleby przez parowanie. Przyjmując jako kryterium odporności na suszę masę korzeni w warstwie ornej i plon bulw w Japonii wyhodowano odmiany Konyu, które charakteryzowały się znacznie większą odpornością na suszę niż odmiany komercyjne. Odmiany ziemniaka o większych systemach korzeniowych z większym prawdopodobieństwem są w stanie pobierać wodę i składniki odżywcze z gleby (Iwama 2008).

W IHAR-PIB w Oddziale w Jadwisinie prowadzono badania systemu korzeniowego w specjalnie skonstruowanych wazonach o wysokości 1 m i średnicy 40 cm umożliwiających prawidłowy rozwój systemu korzeniowego. Wazon-y te były otwierane wzdłuż, co stwarza-

ło techniczną możliwość wydobycia bez uszkodzeń całego systemu korzeniowego (ryc. 3). Konstrukcja wazonu umożliwiała również wyodrębnienie korzeni z pięciu warstw (podłoże przedzielone siatką co 20 cm). Oceniano całkowitą długość systemu korzeniowego, a następnie oceniono tolerancję tych odmian na stres suszy mierzoną względnym spadkiem plonu. Spadek plonu ocenianych odmian kształtował się od 18% do 39 % w badanych latach. Odmiany uszeregowano od najmniejszego do największego spadku plonu: Tajfun, Gawin, Bogatka, Satina, Cekin. Największym systemem korzeniowym charakteryzowała się odmiana Gawin, najmniejszym zaś odmiana Satina (Wishart i in., 2014; Zarzyńska i in. 2017).

Susza glebowa zmniejsza masę systemu korzeniowego, a ekstremalnie wysoka temperatura prowadzi do zahamowania wzrostu korzeni. Susza zmienia również morfologię systemu korzeniowego ziemniaka powodując zwiększoną boczną penetrację korzeni i wytwarzanie włóśników korzeniowych, które utrzymują kontakt korzeń-gleba w glebie kurczącej się podczas



Rycina. 3. Badania systemu korzeniowego roślin ziemniaka – doświadczenia.

suszy. Genotypy o dłuższym okresie wegetacji wytwarzają większy system korzeniowy, jednak występują też różnice w zasięgu i wielkości systemu korzeniowego pomiędzy genotypami w tej samej grupie wczesności (Wishart i in., 2014; Zinta i in., 2022).

Odporność roślin ziemniaka na suszę związana jest również ze zróżnicowaną reakcją systemu korzeniowego (wydłużanie się korzeni i mniejsze zmiany ich średnicy). Według badań Boguszewskiej-Mańkowskiej (2020) odmiana odporna reagowała na suszę wydłużaniem korzeni, natomiast ich długość u odmiany wrażliwej nie zmieniała się. Jednocześnie odnotowano, że zmniejszenie średnicy korzeni było mniejsze u odmiany odpornej na suszę niż u odmiany wrażliwej.

A CO NA TO GENY?

Zróżnicowana odpowiedź odmian ziemniaka na deficyt wody odzwierciedlona spadkiem plonowania wskazuje, że istnieje genetyczna zmienność tolerancji na suszę odmian ziemniaka, która może być wykorzystana przez hodowców w celu poprawy tej cechy (Harris, 1978). Jednak wybór genotypów pod kątem odporności na suszę, przy zachowaniu maksymalnej wydajności w optymalnych warunkach,

jest trudny przede wszystkim ze względu na wiele cech zaangażowanych w mechanizmy tolerancji na suszę. Wyboru tego nie ułatwia również fakt, iż susza zmienia się w czasie i intensywności, a deficytowi wody mogą towarzyszyć inne stresy abiotyczne takie jak: wysoka temperatura czy zasolenie, rozumiane także jako susza fizjologiczna. Ponadto sukces hodowlany wymaga dokładnej informacji na temat skutecznych cech tolerancji, ich odziedziczalności i interakcji genotypu ze środowiskiem, jak również odpowiednich narzędzi selekcji do interesujących cech.

Warto wspomnieć, że próby poprawienia tolerancyjności ziemniaka na suszę glebową podejmowali Fan i in., (2012) wykazując, że nadekspresja genu SoBADH (kodującego dehydrogenazę aldehydu betainy) w roślinach transgenicznych *Ipomoes batatas* zwiększyła ich odporność na stres oksydacyjny, zasolenie oraz chłód. Natomiast zmniejszona ekspresja MSP (33kDa białko wchodzące w skład PSII) skutkowała większą tolerancyjnością transgenicznych roślin ziemniaka na stres osmotyczny, zasolenia oraz zanieczyszczenia metalami (Gururani i in., 2012), a nadekspresja genu GalUR (kodującego reduktazę kwasu D-galakturnowego) skutkowała większą odpornością ziemniaka na stresy abiotyczne w warunkach in vi-

tro (Hemavathi i in., 2011). Bardziej odporne na suszę, zasolenie i stres oksydacyjny są również transgeniczne rośliny z genem *codA* (kodującym oksydazę choliny), wykazujące zwiększoną aktywność enzymów antyoksydacyjnych (Ahmad i in., 2008). Zdolność roślin ziemniaka do tolerowania stresu suszy jest regulowana przez zwiększoną ekspresję genu *DREB1A* (Schaffleitner i in., 2007, Watanabe i in., 2011). Pino i in. (2013) porównali transgenicznego ziemniaka *ScCBFI* z liniami nietransgenicznymi. Ich badanie sugerowało lepszą tolerancję na suszę u transgenicznych linii *ScCBFI*, na co wskazywała poprawa ogólnej wydajności roślin i intensywny rozwój korzeni po stresie suszowym (Pino i in., 2013). Uważa się, że geny związane z suszą są regulowane zarówno poprzez mechanizmy zależne, jak i niezależne od ABA (Takahashi i in., 2018). Pieczyński i in. (2018) zidentyfikowali 23 geny związane z suszą w *S. tuberosum*, których homologi zidentyfikowali również w *Arabidopsis thaliana* i *Oryza sativa*. (Pieczyński i in., 2013) wskazał gen *CBP80* odpowiedzialny za tolerowanie suszy w ziemniaku. Celik (2024) wskazał geny: *StRD22*, *MYB*, *StERD7*, syntaza sacharozy (*SuSy*) i *StDHN1* związane z tolerancją na suszę. Natomiast Zhao i in., (2025) wykazali, że sieć regulacyjna obejmująca auksynę, *StDRO2*, *PmiREN024536* i *PmiREN024486* może kontrolować architekturę systemu korzeniowego w warunkach niedoboru wody.

W ostatnich latach zidentyfikowano liczne geny związane ze stresem suszy, jednak wciąż jesteśmy daleko od opracowania genotypów ziemniaka odpornych na suszę.

WIELE ODMIAN – RÓŻNE STRATEGIE

Susza jest czynnikiem stresowym o charakterze abiotycznym i może być zróżnicowana pod względem natężenia, czasu trwania, częstotliwości oraz oddziaływania z innymi stresami w tym samym czasie, co może dotyczyć komórek organów lub całych roślin (Gaspar i in., 2002). Reakcja na suszę zależy od fazy rozwojowej i aktywności fizjologicznej rośliny. Na każdy niekorzystny czynnik środowiska roślina re-

aguje najsilniej w tzw. krytycznym okresie, czyli w okresie największej wrażliwości.

Aby poradzić sobie ze skutkami suszy glebowej rośliny ziemniaka rozwinęły różnorodne strategie na poziomie molekularnym, biochemicznym i fizjologicznym (Dahal i in., 2019; Hil i in., 2021). Wśród nich wyróżniamy dwie podstawowe: unikania i tolerowania suszy. Unikanie suszy to zdolność roślin do przetrwania suszy poprzez zmiany morfologiczne, w tym zwiększony wzrost korzeni, zamykanie aparatów szparkowych i zwiększony stosunek korzeni do pędów. Tolerancja na suszę to zdolność roślin do przetrwania okresów stresu suszy poprzez zmiany fizjologiczne, w tym zwiększoną produkcję osmoprotektantów, regulację osmotyczną i akumulację cukru (Kooyers, 2015). Oba te zjawiska wiążą się ze wzrostem efektywności wykorzystania wody (*WUE*). Różnicę między tolerancją na suszę a jej unikaniem można rozpatrywać raczej jako kwestię skali niż rodzaju. Obie strategie mogą się wzajemnie uzupełniać. Strategia tolerowania suszy wydaje się być mniej ważna dla roślin użytkowanych rolniczo w przypadku niedoboru wody (Blum, 2011).

Z perspektywy agronomicznej rośliny odporne na suszę to takie, które utrzymują stabilny plon w warunkach niedoboru wody. Priorytetem w badaniach hodowlanych ukierunkowanych na poprawę odporności na suszę jest uzyskanie takich genotypów, które poradzą sobie ze stresem suszy bez hamowania wzrostu i spadku plonów (Monneveux i in., 2013; George i in. 2017; Dahal i in., 2019; Hill i in. 2021).

Przykładem wykorzystywania różnych strategii odmian ziemniaka w walce z suszą mogą być dwie pary polskich odmian ziemniaka *Gwiazda/Oberon* oraz *Tajfun/Owacja*, które wykazały skrajne różnice w tolerancji na suszę ocenioną na podstawie utraty plonu bulw (Boguszevska-Mańkowska i in., 2018). Zdolność do tolerowania odwodnienia poprzez znaczący wzrost efektywności wykorzystania wody odmiana *Gwiazda* osiągnęła w wyniku wczesnego zamykania aparatów szparkowych, a wrażliwość na ABA znacznie zmniejszyła intensywność transpiracji. Strategia ta została niedawno opisana

dla wrażliwych na suszę odmian soi (Fenta i in., 2012) i kukurydzy (Benesova i in., 2012). Inną strategię przeciwdziałania skutkom suszy wykazała unikająca odwodnienia odmiana Tajfun, która utrzymywała aparaty szparkowe częściowo otwarte. W ten sposób rośliny były w stanie zachować stosunkowo wysoki stosunek fotosyntezy do transpiracji. Tej ryzykownej strategii towarzyszyło około 15% niższe, choć nieistotne statystycznie, plonowanie bulw w porównaniu z około 8% ubytkiem masy bulw w odmianie Gwiazda.

Kolejnym ważnym aspektem jest charakterystyka odmiany w warunkach niedoboru wody oraz dobór odpowiednich odmian do warunków środowiska. W produkcji ziemniaka cenione są odmiany, które w warunkach gorszego zaopatrzenia w wodę są zdolne wytworzyć dobry plon, a więc istnieje potrzeba oceny tej cechy u poszczególnych odmian. Na wrażliwość odmiany w stosunku do suszy wpływa wiele cech m.in.: budowa systemu korzeniowego, funkcjonowanie aparatów szparkowych, które tworzą złożony układ, grubość kutykuli liści, występowanie trichomów. U różnych odmian inna cecha odpowiedzialna za gospodarkę wodną jest bardziej dominująca. Jedna odmiana może mieć np. mniej rozbudowany system korzeniowy a większą efektywność aparatów szparkowych lub odwrotnie. Reakcją odmiany na stres suszy będzie bilans, czyli wypadkowa cech wzajemnie na siebie oddziałujących. Badanie pojedynczej cechy może być tylko jednym ze wskaźników, natomiast ocena reakcji odmiany może zapewnić ocenę całościową. Jedną z możliwości jest określenie wrażliwości poszczególnych odmian na niedobory wody po ok. 3 tygodniach od momentu rozpoczęcia tuberyzacji, czyli w fazie największego zapotrzebowania na wodę. W tym czasie na dwa tygodnie wstrzymuje się podlewanie roślin, podczas gdy rośliny kontrolne podlewane są regularnie. Po zakończeniu okresu suszy aż do końca okresu wegetacji rośliny są ponownie podlewane taką dawką wody, która zapewnia im utrzymanie optymalnej wilgotności gleby. Rycina 4 przedstawia zróżnicowaną reakcję 50 odmian ziemniaka na suszę glebową. Względny spadek plonu wynosi od 4%

u do 53%. (Boguszewska-Mańkowska 2016; Boguszewska-Mańkowska i in. 2022). Odmiany o mniejszym względnym spadku plonu wykazują większą tolerancję na suszę glebową.

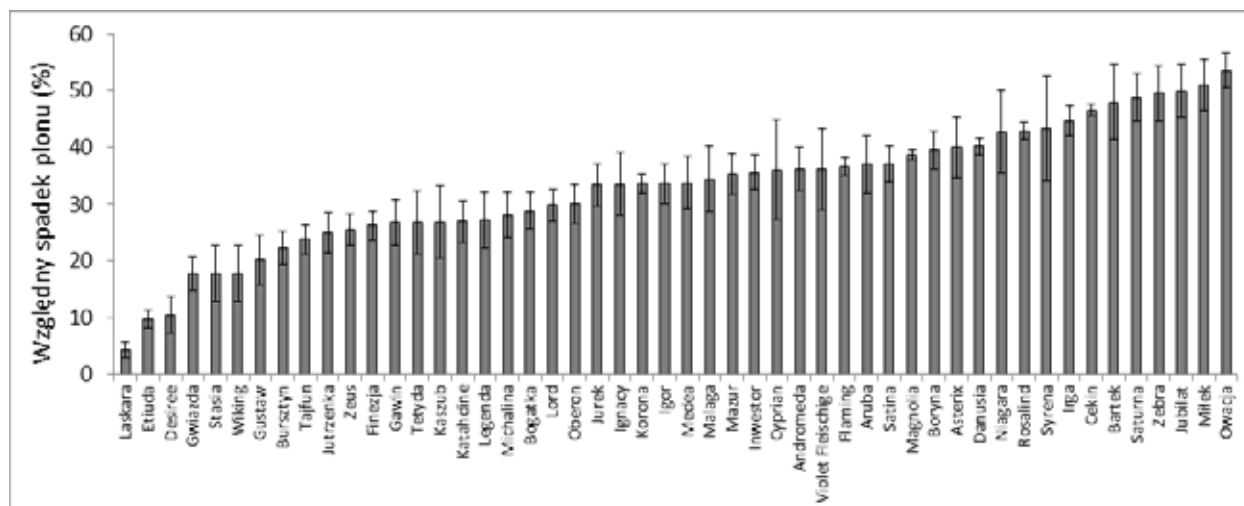
W związku ze zmieniającym się modelem rozwoju rolnictwa z intensywnego na zrównoważony oraz coraz większego znaczenia rolnictwa ekologicznego, co wiąże się między innymi z ograniczeniem stosowania nawozów, pestycydów i wody, istotne jest znalezienie genotypów odporniejszych na stresy, co umożliwi zwiększenie plonów w różnych warunkach środowiskowych. Z praktycznego punktu widzenia poznanie reakcji na suszę glebową konkretnej odmiany oraz wielu odmian pozwoli na identyfikację wymagań wodnych poszczególnych genotypów oraz ich rejonizację w zależności od warunków klimatycznych (Nowacki 2018).

JAK PRZECIWDZIAŁAĆ SKUTKOM SUSZY

Kluczowym aspektem jest dobór odmian, które w warunkach niedoboru wody potrafią wytworzyć stabilny i dobrej jakości plon.

Rozwiązaniem na niedobory i nierównomierny rozkład opadów jest nawadnianie plantacji. Jednak w Polsce nawadnianie prowadzone jest na ok. 20% powierzchni upraw ziemniaka w latach, w których występują niedobory wody i głównie plantacji dla przetwórstwa spożywczego i ziemniaka jadalnego do konfekcjonowania. Przy tym, najpopularniejszą metodą nawadniania jest deszczowanie plantacji przy pomocy deszczowni szpulowych (Nowacki 2018).

Innowacyjnym elementem agrotechniki może być stosowanie dolistnych preparatów zawierających związki bioaktywne (biostymulatory), jako alternatywnego środka w warunkach niekorzystnego oddziaływania czynnika pogodowego podczas wegetacji ziemniaka. Biostymulatory wspomagają proces fotosyntezy i metabolizmu, zwiększają odporność na choroby grzybowe, umożliwiają lepsze wykorzystanie składników pokarmowych z gleby, co poprawia kondycję roślin w niekorzystnych okresach wzrostu, zwłaszcza podczas suszy (Trawczyński 2020).



Rycina 4. Różnice odmianowe względnego spadku plonu pod wpływem dwutygodniowej suszy.

PODSUMOWANIE

Celem hodowców i genetyków molekularnych jest poprawienie wartości cech użytkowych roślin rolniczych i lepsze „dopasowanie” roślin do warunków środowiska, z uwzględnieniem poziomu i jakości plonu. Strategie, którymi się posługują, są zbliżone i polegają na poszukiwaniu i przeniesieniu wyróżniających się alleli, kontrolujących cechy użytkowe. Badania nad hodowlą ziemniaka koncentrują się przede wszystkim na selekcji odmian odpornych na suszę poprzez uwzględnienie wskaźników na poziomie całej rośliny i liści, takich jak: plon, fenotyp rośliny, zawartość wody w liściach, przy mniejszym zainteresowaniu na poziomie anatomicznym, fizjologicznym i biochemicznym. (Monneveux i in., 2013; Hill i in., 2021) Przebadanie funkcji genów i ich produktów warunkujących nabywanie i kontrolowanie odporności roślin na niekorzystne warunki środowiska może przyspieszyć zrozumienie tych procesów i przyczyni się do powstania ideotypu ziemniaka odpornego na suszę glebową.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, R., Kim M.D., Back, K.H., Kim, H.S., Lee H.S., i in., 2008. Stress-induced expression of choline oxidase in potato plant chloroplasts confers enhanced tolerance to oxidative, salt, and drought stresses. *Plant Cell Reports* 27: 687–698. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0479-4>
- Aliche, E.B., Oortwijn, M., Theeuwes, T.P.J.M., Bachem, C.W.B., Visser, R.G.F., i in., 2018. Drought response in field grown potatoes and the interactions between canopy growth and yield. *Agriculture Water Management* 206, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agw.2018.04.013>
- Alvarez-Morezuelas, A., Barandalla, L., Ritter E., Lacuesta, M., Ruiz de Galarreta, J.I., 2022. Physiological response and yield components under greenhouse drought stress conditions in potato. *Journal of Plant Physiology* 278, 153790. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153790>
- Benesova, M., Hola, D., Fischer, L., Jedelsky, P.L., Hnilicka, F., i in., 2012. The physiology and proteomics of drought tolerance in maize: Early stomatal closure as a cause of lower tolerance to short-term dehydration? *PLoS ONE* 7, e38017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038017>

- Blum, A., 2011. Drought resistance – is it really a complex trait? *Functional Plant Biology* 38(10), 753–757. <https://doi.org/10.1071/fp11101>
- Boguszewska-Mańkowska, D., 2016. Odporność ziemniaka na suszę glebową i metody. *Biuletyn IHAR* 279, 65–75. <https://doi.org/10.37317/biul-2016-0017>
- Boguszewska-Mańkowska, D., Pieczyński, M., Wyrzykowska, A., Kalaji, H.M., Sieczko, L., i in., 2018. Divergent strategies displayed by potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to cope with soil drought. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(1), 13–30. <https://doi.org/10.1111/jac.12245>
- Boguszewska-Mańkowska, D., Zarzyńska, K., Nosalewicz, A., 2020. Drought Differentially Affects Root System Size and Architecture of Potato Cultivars with Differing Drought Tolerance. *American Journal of Potato Research* 97(1), 54–62. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09755-2>
- Boguszewska-Mańkowska, D., Ruszczak, B., Zarzyńska, K., 2022. Classification of Potato Varieties Drought Stress Tolerance Using Supervised Learning. *Applied Sciences (Switzerland)* 12(4), 1939. <https://doi.org/10.3390/app12041939>
- Çelik, S., 2024. Gene expression analysis of potato drought-responsive genes under drought stress in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars *PeerJ Life & Environment* <https://doi.org/10.7717/peerj.17116>
- Dahal, K., Li X-Q., Tai H., Creelman A., Bizimungu B., 2019. Improving Potato Stress Tolerance and Tuber Yield Under a Climate Change Scenario – A Current Overview. *Frontiers in Plant Science* 10, 563. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00563>
- Fan, W., Zhang, M., Zhang, H., Zhang P., 2012. Improved Tolerance to Various Abiotic Stresses in Transgenic Sweet Potato (*Ipomoea batatas*) Expressing Spinach Betaine Aldehyde Dehydrogenase. *PLoS ONE* 7(5), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037344>
- Fenta, B.A., Driscoll, S.P., Kunert, K.J., Foyer, C.H., 2012. Characterization of Drought-Tolerance Traits in Nodulated Soya Beans: The Importance of Maintaining Photosynthesis and Shoot Biomass Under Drought-Induced Limitations on Nitrogen Metabolism. *Journal of Agronomy and Crop Science* 198, 92–10. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00491.x>
- Gaspar, T., Franck, T., Bisbis, B., Kevers, C., Jouve, L., i in., 2002 Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. *Plant Growth Regulation* 37, 263–285. <https://doi.org/10.1023/A:1020835304842>
- George, T.S., Taylor, M.A., Dodd, I.C., i in., 2017. Climate Change and Consequences for Potato Production: a Review of Tolerance to Emerging Abiotic Stress. *Potato Research* 60, 239–268. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9366-3>
- Głuska, A., 2004. Wpływ zmiennego rozkładu opadów na cechy bulw ziemniaka (*Solanum tuberosum* L.) w warunkach polowych oraz wyznaczenie okresu krytycznego wrażliwości na niedobór wody u odmian o różnej długości okresu wegetacji. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*; 496, 217–227.
- Gururani, M. A., Upadhyaya, C.P., Strasser, R. J., Woong, Y. J., i in., 2012. Physiological and biochemical responses of transgenic potato plants with altered expression of PSII manganese stabilizing protein. *Plant Physiology and Biochemistry* 58, 182–94. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.07.003>
- Hancock, R.D., Morris W.L., Ducreux L.J., Morris J.A., Usman, M., i in., 2014. Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant to moderately elevated temperature. *Plant Cell and Environment* 37, 439–450. <https://doi.org/10.1111/pce.12168>
- Harris, P.M., 1978. *Water*. W: Harris P.M. (Ed.) *The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement*. Chapman i Hall. London, 244–277.
- Hemavathi, Upadhyaya, C.P., Aklua, N., Kim H.S., i in., 2011. Biochemical analysis of enhanced tolerance in transgenic potato plants overexpressing D-galacturonic acid reductase gene in response to various abiotic

- stresses. *Molecular Breeding* 28, 105–115. <https://doi.org/10.1007/s11032-010-9465-6>
- Hill, D., Nelson, D., Hammond, J., Bell, L., 2021. Morphophysiology of Potato (*Solanum tuberosum*) in Response to Drought Stress: Paving the Way Forward. *Frontiers in Plant Science* 11, 597554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597554>
- Iwama, K., 2008. Physiology of the potato: New insights into root system and repercussions for crop management. *Potato Research* 5, 333–353. <https://doi.org/10.1007/S11540-008-9120-3>
- Kooyers, N.J. 2015. The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. *Plant Science* 234, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.02.012>
- Monneveux, P., Ramirez, D.A., Pino, M., 2013. Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.) Can we learn from drought tolerance research in cereals? *Plant Science* 205–206: 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.01.011>
- Nasir, M.W., Toth, Z., 2022. Effect of Drought Stress on Potato Production: A Review. *Agronomy* 12, 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>
- Nowacki, W., 2016. Racjonalne gospodarowanie zasobami wodnymi w uprawie ziemniaka. [W:] Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie (red.) CDR Brwinów, 273–286. ISBN: 978-83-88082-18-4
- Nowacki, W. 2018. Water in potato production, problems and challenges. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 19(6), 14–25. <https://doi.org/10.12912/23920629/95273>
- Obidiegwu, J.E., Bryan, G.J., Jones H.G., Prashar, A., 2015. Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6, 542. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542>
- Pieczynski, M., Marczewski, W., Hennig, J., Dolata, J., Bielewicz, i in., 2013. Down-regulation of CBP80 gene expression as a strategy to engineer a drought-tolerant potato. *Plant Biotechnology Journal* 11, 459–469. <https://doi.org/10.1111/pbi.12032>
- Pieczynski, M., Wyrzykowska, A., Milanowska, K., Boguszevska-Mankowska, D., Zagdanska, B., i in., (2018) Genomewide identification of genes involved in the potato response to drought indicates functional evolutionary conservation with Arabidopsis plants. *Plant Biotechnology Journal*, <https://doi.org/10.1111/pbi.12800>
- Pino, M.T., Avila, A., Molina, A., Jeknic, Z., Chen, T.H.H., 2013. Enhanced in vitro drought tolerance of *Solanum tuberosum* and *Solanum commersonii* plants overexpressing the ScCBF1 gene. *Ciencia e Investigación Agraria* 40, 171–184. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202013000100015>
- Schafleitner, R., Rosales R.O.G., Gaudin, A., Aliaja, C.A.A., Martinez G.N., i in., 2007. Capturing candidate drought tolerance traits in two native Andean potato clones by transcription profiling of field grown plants under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 45: 673–690. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.06.003>
- Scott, G.J., Rosegrant, M.W., Ringler, C., 2000. Global projections for root and tuber crops to the year 2020. *Food Policy* 25, 561–597. [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(99\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(99)00087-1)
- Sprenger, H., Kurowsky, C., Horn, R., Erban, A., Seddig, S., i in., 2016. The drought response of potato reference cultivars with contrasting tolerance. *Plant, Cell and Environment* 39: 2370–2389. <https://doi.org/10.1111/pce.12780>
- Stark, J.C., Love, S.L., King, B.A., Marshall, J.M., Bohl, W.H., i in., 2013. Potato cultivar response to seasonal drought patterns. *American Journal of Potato Research* 90, 207–216. <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9285-9>
- Takahashi, F., Kuromori, T., Sato, H., Shinozaki, K., 2018. Regulatory gene networks in drought stress responses and resistance in plants. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 1081, 189–214. [10.1007/978-981-13-1244-1_11](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1244-1_11)
- Trawczyński, C., 2020. Wpływ biostymulatorów na plon i jakość bulw ziemniaka uprawianego w warunkach suszy.

- wianego w warunkach suszy i wysokiej temperatury. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 289: 11–19. <https://doi.org/10.37317/biul-2020-0017>
- Watanabe, K.N., Kikuchi, A., Shimazaki, T., Asahina, M., 2011. Salt and drought stress tolerances in transgenic potatoes and wild species. *Potato Research* 54, 319–324. <https://doi.org/10.1007/s11540-011-9198-x>
- Wishart, J., George T.S.L., K. Brown, P.J. White, G. Ramsay, H., i in., 2014. Field phenotyping of potato to assess root and shoot characteristics associated with drought tolerance. *Plant and Soil* 378: 531–363. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-014-2029-5>
- Zinta, R., Tiwari, J.K., Buckseth, T., Thakur, K., Goutam, U., i in., 2022. Root system architecture for abiotic stress tolerance in potato: Lessons from plants. *Frontiers in Plant Science* 13, 926214. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.926214>
- Zarzyska, K., Boguszevska-Mańkowska, D., Nosalewicz, A., 2017. Differences in size and architecture of the potato cultivars root system and their tolerance to drought stress. *Plant, Soil and Environment* 63, 159–164. <https://doi.org/10.17221/4/2017-PSE>
- Zgórska, K., Grudzińska, M., 2012. Zmiany Wybranych cech jakości ziemniaka w czasie przechowywania. *Acta Agrophysica* 19(1), 203–214.
- Zhao, J., Yao, B., Peng, Z., Yang X., Li, K., i in., 2025. Splicing defect of StDRO2 intron 1 promotes potato root growth by disturbing auxin transport to adapt to drought stress. *Horticultural Plant Journal* 11, 706–720. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2023.11.003>

OŚWIADCZENIA AUTORÓW

Autorka dziękuje za wsparcie finansowe.