

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

71(25)



**GOSPODARKA WODNA W ROLNICTWIE
JAKO ELEMENT ADAPTACJI DO ZMIAN KLIMATU**

DOTACJA CELOWA
2023

Puławy 2023



INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

**STUDIA I RAPORTY
IUNG-PIB**

71(25)

**GOSPODARKA WODNA W ROLNICTWIE
JAKO ELEMENT ADAPTACJI DO ZMIAN KLIMATU**

**DOTACJA CELOWA
2023**

Puławy 2023

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Redakcja naukowa:

dr hab. inż. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB

Autorzy:

*mgr inż. Damian Badora; dr Robert Borek;
dr hab. Andrzej Doroszewski, prof. IUNG-PIB; dr hab. Krzysztof Jończyk;
mgr Piotr Koza; dr hab. Jerzy Kozyra; dr Eugeniusz Nowocień; dr Piotr Skowron;
dr hab. Janusz Smagacz, prof. IUNG-PIB; dr Damian Wach;
dr hab. inż. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB; dr Katarzyna Żyłowska*

Recenzenci:

*dr hab. Andrzej Doroszewski, prof. IUNG-PIB; dr hab. Jan Jadczyszyn;
prof. dr hab. Stanisław Krasowicz; prof. dr hab. Mariusz Matyka;
dr Jacek Niedźwiecki; dr Anna Nieróbca; prof. dr hab. Alicja Pecio;
dr hab. Rafał Pudelko; dr Katarzyna Żyłowska*

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

Okładka: krajobraz okolic Rogowa (fot. *dr Anna Nieróbca*)

ISBN 978-83-7562-404-5

Publikacja elektroniczna

Egzemplarz bezpłatny

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB w Puławach

tel. (81) 47 86 720; fax (81) 47 86 721

e-mail: iung@pulawy.pl; <http://www.iung.pulawy.pl>

STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB

**GOSPODARKA WODNA W ROLNICTWIE
JAKO ELEMENT ADAPTACJI DO ZMIAN KLIMATU**

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
1. Doroszewski A. – Warunki termiczne i opadowe w Puławach w latach z ekstremalnymi suszami rolniczymi w okresie 2006–2022	9
2. Doroszewski A., Koza P. – Występowanie suszy rolniczej w Polsce w latach 2006–2022.....	27
3. Żyłowska K., Kozyra J. – Zmiany klimatycznego bilansu wodnego okresu wegetacyjnego w Polsce w latach 1971–2020.....	65
4. Jończyk K. – Organizacja produkcji roślinnej, płodozmian a gospodarka wodna	77
5. Smagacz J. – Znaczenie konserwującej uprawy roli w kształtowaniu żyzności gleby	87
6. Skowron P., Wach D. – Zapobieganie zanieczyszczeniom zasobów wód przez nawozy wykorzystywane w praktyce rolniczej	105
7. Borek R. – Wpływ zadrzewień śródpolnych i systemów rolno-leśnych na bilans wodny pola	123
8. Wawer R., Nowocień E. – Ochrona retencyjności gleb. Erozja wodna i wietrzna w Polsce	157
9. Wawer R. – Rolnictwo 4.0 – precyzyjne nawadnianie.....	177
10. Wawer R., Badora D. – Rola organizacji lokalnych samorządów wodnych w zarządzaniu zasobami wodnymi w Polsce w kontekście zmian klimatu	199

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się postępującą zmianę klimatu, która w Polsce objawia się nie tylko wzrostem średniej temperatury i zwiększeniem zmienności warunków termicznych, ale i dużymi zmianami w dystrybucji opadów w ciągu roku. Obserwuje się mało śnieżne zimy, które nie zapewniają odnowienia zasobów wody w glebie, co powoduje jej braki już na początku okresu wegetacyjnego. Częstość występowania susz w okresach krytycznych dla roślin uprawnych znacznie się zwiększyła, miejscami przybierając rozmiary klęski żywiołowej (Monitoring Suszy, IUNG).

Przygotowanie polskiego rolnictwa na dalsze zmiany jest pilnie potrzebne i wymaga zaangażowania nie tylko administracji rządowej i samorządowej, ale przede wszystkim samych użytkowników wód, których decyzje bezpośrednio wpływają na dostępność i jakość wody na obszarach wiejskich. Wobec przewidywanych susz i braków wody w rolnictwie, woda powoli staje się dobrem wspólnym o znaczeniu strategicznym.

Najważniejsza w procesie podejmowania decyzji ukierunkowanych na racjonalną gospodarkę wodną jest rzetelna informacja na temat stanu zasobów wodnych, prognoz ich dynamiki w bieżącym sezonie, szacowania tempa ich odnawiania przy aktualnym klimacie i zużyciu. Ponadto potrzebne są dobre praktyki z jednej strony optymalizujące zużycie wody, a z drugiej umożliwiające jej zbieranie w okresach nadmiaru, by zapasy mogły być wykorzystane w czasie niedoborów. Są to wielkie wyzwania wymagające rozważnego planowania i wydatkowania środków, z zachowaniem zasady równości w dostępie do zasobów środowiska i równoległą realizacją celów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych.

Efektywna gospodarka wodna na terenach wiejskich wymaga holistycznego podejścia i uwzględnienia wszystkich potrzeb mieszkańców, z naciskiem na utrzymanie produkcji rolnej, decydującej o bezpieczeństwie żywnościowym kraju. Spośród szerokiego spektrum zagadnień związanych z wyzwaniami, jakie stawia rolnictwu zmieniający się klimat, w kontekście gospodarki wodnej na obszarach wiejskich za najważniejsze cele strategiczne należałoby uznać:

- Opracowanie nowych metod optymalizacji bilansu hydrologicznego gleb w układzie gleba–woda–roślina, w tym optymalizacja melioracji wodnych, zwiększanie retencji glebowej oraz precyzyjne nawadnianie;
- Opracowanie nowych metod monitoringu, oceny i prognoz dostępności wody dla rolnictwa na poziomie gospodarstwa, gminy i zlewni;
- Przyjęcie gospodarki wodnej za jeden z najistotniejszych elementów planowania przestrzennego i adaptacji gminy wiejskiej do zmian klimatu;
- Adaptację praktyk rolniczych do zmieniających się zasobów wody dostępnej dla roślin;
- Zwiększenie retencji wodnej w krajobrazie rolniczym;
- Dywersyfikację źródeł wody dla gospodarstw rolnych;
- Zapobieganie obniżeniu jakości gleb wynikającemu z deficytów wody, zwłaszcza zapobieganie mineralizacji próchnicy glebowej;

- Stymulowanie ekonomicznych i środowiskowych efektów wdrażania dobrych praktyk gospodarki wodnej w gospodarstwach przez subsydia i doradztwo.

Podjęto szereg inicjatyw strategicznych mających na celu adaptację gospodarki wodnej na obszarach wiejskich do zmiany klimatu. Między nimi najważniejsze wydaje się utworzenie Lokalnych Partnerstw ds. Wody, stymulowane przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi w oparciu o sieci ośrodków doradztwa rolniczego w całym kraju. Do istotnych kroków milowych należy zaliczyć również opracowanie planów strategicznych: Planu Przeciwdziałania Skutkom Suszy oraz Programu Przeciwdziałania Niedoborom Wody, opracowanie kodeksów dobrych praktyk wodnych w rolnictwie oraz ogrodnictwie. Wchodzące w życie ekoschematy związane ze zwiększaniem zawartości próchnicy, powodującym zwiększenie retencji wodnej gleb uzupełniają dokumenty strategiczne bieżącym wsparciem rolników. Niebawem europejska inicjatywa Misji Glebowej, wspierająca rolnictwo węglowe i dbałość o zdrowie gleby wprowadzi nowe mechanizmy sprzyjające zwiększaniu retencji glebowej.

Niniejsze opracowanie zbiorowe ma na celu przybliżenie wiedzy zarówno o zasięgu i intensywności zmian klimatycznych na obszarze Polski, jak i merytorycznych podstawach dobrych praktyk w gospodarowaniu wodą na terenach wiejskich, od agrotechniki przez rolnictwo inteligentne po rozwiązania systemowe organizacji sprawiedliwej dystrybucji wody.

Kierownik zadania 2.2

dr hab. inż. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB

Andrzej Doroszewski

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

**WARUNKI TERMICZNE I OPADOWE W PUŁAWACH W LATACH
Z EKSTREMALNYMI SUSZAMI ROLNICZYMI W OKRESIE 2006–2022***

Słowa kluczowe: opad atmosferyczny, temperatura powietrza, ekstremalne susze

Wstęp

Do głównych elementów meteorologicznych decydujących o suszy należą zarówno temperatura powietrza, jak i opad atmosferyczny. Temperatura powietrza jest jednym z głównych czynników kształtujących wielkość suszy, w tym też istotną rolę odgrywa występowanie jej wartości ekstremalnych.

Rośliny charakteryzują się dużą wrażliwością na niedobory opadów atmosferycznych, zwłaszcza w okresach krytycznych, występujących zazwyczaj w czasie intensywnego wzrostu ich masy. Niedobory te powstają w okresie, w którym zapotrzebowanie na wodę dla roślin nie jest w pełni pokrywane przez opady atmosferyczne oraz przez zasoby wody łatwo dostępnej w glebie. Ekstremalny deficyt wody (niski opad lub jego brak) powoduje całkowitą utratę plonu, notowany jest zwłaszcza w warunkach wystąpienia wysokiej temperatury powietrza.

Suszę rolniczą w okresie 2006–2022 notowano w latach: 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 oraz 2022 (8). W każdym z tych lat susza w Polsce wystąpiła przynajmniej w 10 uprawach. Największą liczbę gmin z suszą, największy obszar gruntów ornych z jej wystąpieniem oraz najniższe wartości klimatycznego bilansu wodnego, a więc ekstremalne charakterystyki jej występowania odnotowano w latach: 2006, 2015, 2018 oraz 2019 (9).

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

Celem pracy jest analiza warunków termicznych i opadowych występujących zwłaszcza w latach, w których notowano ekstremalne susze rolnicze w okresie 2006–2022.

Metody wyznaczania suszy

Suszę meteorologiczną wyznaczano za pomocą klimatycznego bilansu wodnego (KBW), to jest różnicy pomiędzy opadem atmosferycznym a ewapotranspiracją potencjalną (ETP):

$$KBW = P - ETP$$

gdzie:

P – opad atmosferyczny (mm);

ETP – ewapotranspiracja (mm).

Wartość ETP jest obliczana na podstawie wzoru Doroszewskiego i in. (6):

$$ETP = 161 + 19,57 d - 152,7 \ln d + 0,0004034 h^2 + 0,00186 (t + 5)^3 + 0,004192 (100 - f)^2 + 0,0003681 v (100 - f)^{2,5}$$

gdzie:

d – długość dnia (h);

h – uśłonecznienie (h);

t – średnia temperatura powietrza (°C);

f – wilgotność względna, godz. 13.00 (%);

v – średnia prędkość wiatru ($m \cdot s^{-1}$).

Dane meteorologiczne użyte do obliczeń rozpatrywanych charakterystyk pochodzą ze stacji meteorologicznej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach dla okresu 1871–2022.

Omówienie wyników

Wystąpienie ekstremalnej temperatury powietrza bardzo często jest powodem wystąpienia ekstremalnej suszy, o czym świadczą m.in. dane zawarte w tabeli 1. Absolutne maksymalne miesięczne temperatury powietrza w Puławach dla okresu 1871–2022 notowano w 2006, 2015 oraz 2019 r., a dla kwietnia i maja maksymalne miesięczne wartości wystąpiły w 2018 r. Należy zaznaczyć, że notowano także występowanie rekordowych wartości rocznej temperatury powietrza, które wystąpiły w 2015, 2018 oraz 2019 r. W latach z absolutnymi ekstremalnymi wartościami miesięczna temperatura powietrza była wyższa od wartości średnich wieloletnich od 3,9 do 5,8°C. Najcieplejsze miesiące kwietnia i maja również były wyższe od

wartości średnich wieloletnich odpowiednio o 5,9 i 4,2°C. Natomiast ekstremalne susze w Polsce odnotowano w 2006, 2015, 2018 oraz 2019 r. (9). W tych latach w Puławach rejestrowano też występowanie ekstremalnych niskich wartości KBW, które wynosiły od –200 do –265 mm. Przedstawiona zgodność występowania ekstremalnych wartości temperatury oraz ekstremalnych lat z suszą jest pełna (tab. 1).

Tabela 1

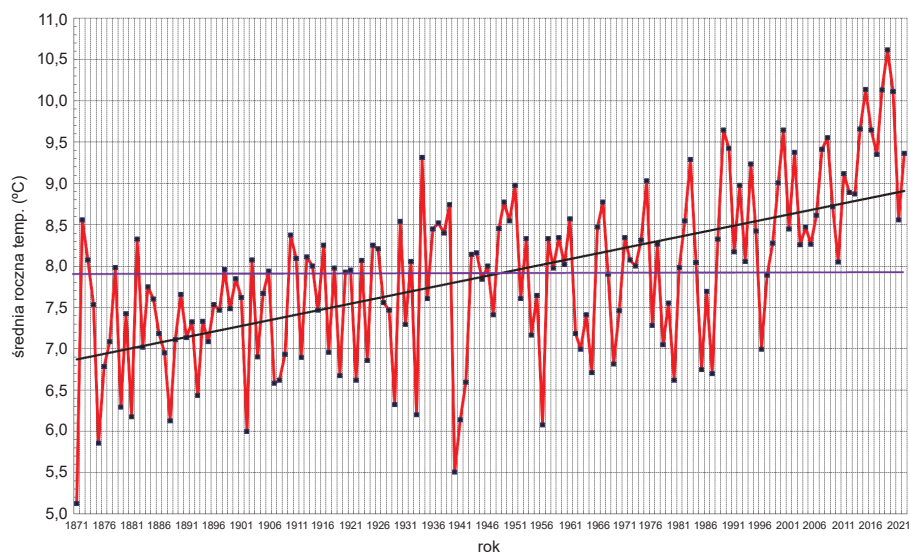
Ekstremalne wartości temperatury powietrza w Puławach w okresie 1871–2022
oraz wartości KBW w latach występowania ekstremów klimatycznych

Ekstremalne temperatury	Miesiąc	Rok	Średnia temperatura miesiąca, roku (°C)	Odchylenie temperatury od średniej wieloletniej (°C)	Okres sześciodekadowy KBW	KBW (mm)
Absolutne miesięczne rekordy	lipiec	2006	22,5	+3,9	1 VI–31 VII	–265
	sierpień	2015	22,6	+5,0	1 VII–31 VIII	–250
	czerwiec	2019	22,7	+5,8	1 VI–31 VII	–220
Rekordowe miesiące	kwiecień	2018	13,9	+5,9	21 IV–20 VI	–200
	maj	2018	17,8	+4,2		
Rekordowe lata		2015	10,1	+2,3		–265
		2018	10,1	+2,3		–250
		2019	10,6	+2,8		–220

Źródło: opracowanie własne

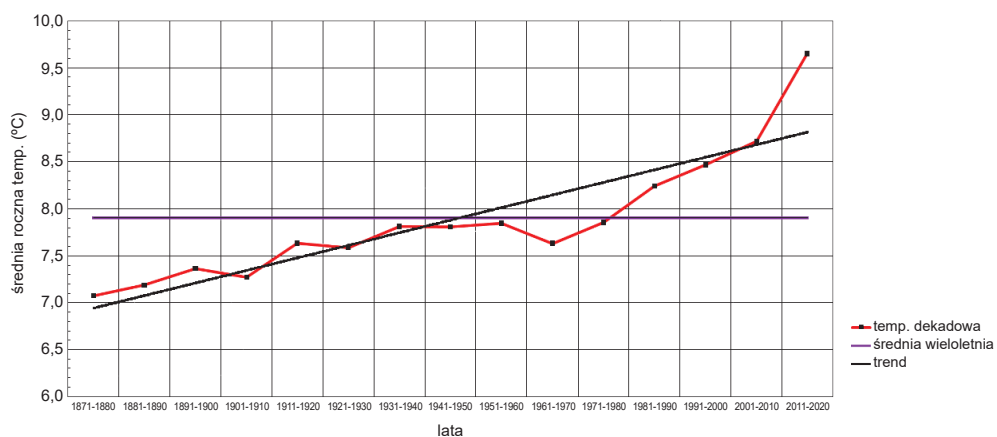
Przykładem zachodzących zmian klimatycznych są poniżej zamieszczone wykresy rocznej oraz sezonowej temperatury powietrza dla okresu 152 lat dla Puław, które wskazują na znaczne ocieplenie, zwłaszcza występujące w ostatnich latach (rys. 1–10).

Roczny trend temperatury powietrza w Puławach wynosi 1,35°C na 100 lat. W ciągu ostatnich 25 lat (od 1997 r.) roczna temperatura każdego roku jest wyższa od wartości średniej wieloletniej. Tylko w tym okresie notowano roczną temperaturę wyższą od 9,5°C (rys. 1). Szczególny wzrost temperatury powietrza widoczny jest od okresu 1981–1990 do lat 2011–2020 (rys. 2).



Rys. 1. Średnia roczna temperatura powietrza w Puławach w latach 1871–2022

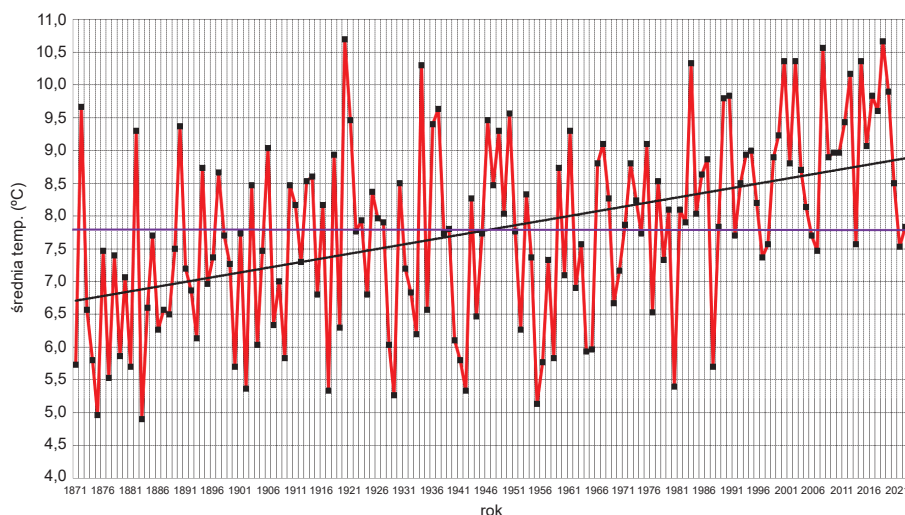
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Średnia roczna temperatura powietrza w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

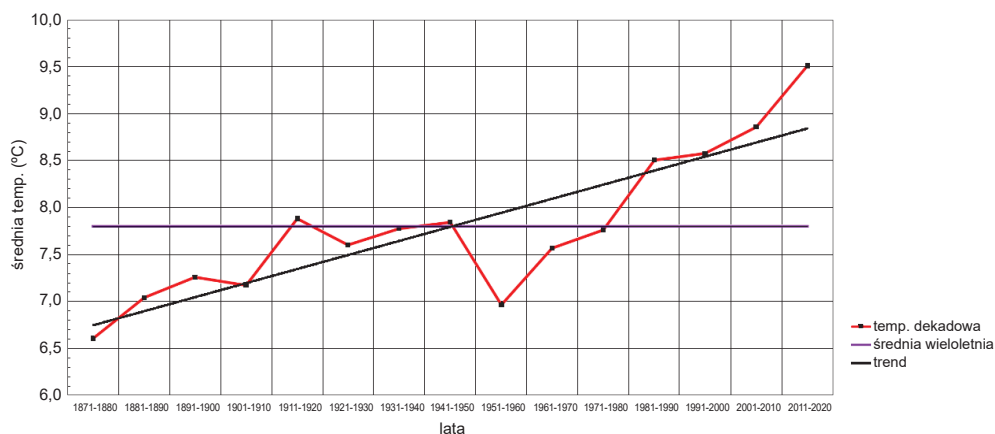
Źródło: opracowanie własne

Wiosną trend temperatury powietrza w Puławach wynosi $1,44^{\circ}\text{C}$ na 100 lat. Tylko w ostatnich 25 latach (1997–2022) w każdym roku notowano temperaturę wiosny wynoszącą $7,5^{\circ}\text{C}$ lub wyższą (rys. 3). Szczególny wzrost temperatury powietrza wiosną widoczny jest w ostatnich czterdziestu latach 1981–2020 (rys. 4).



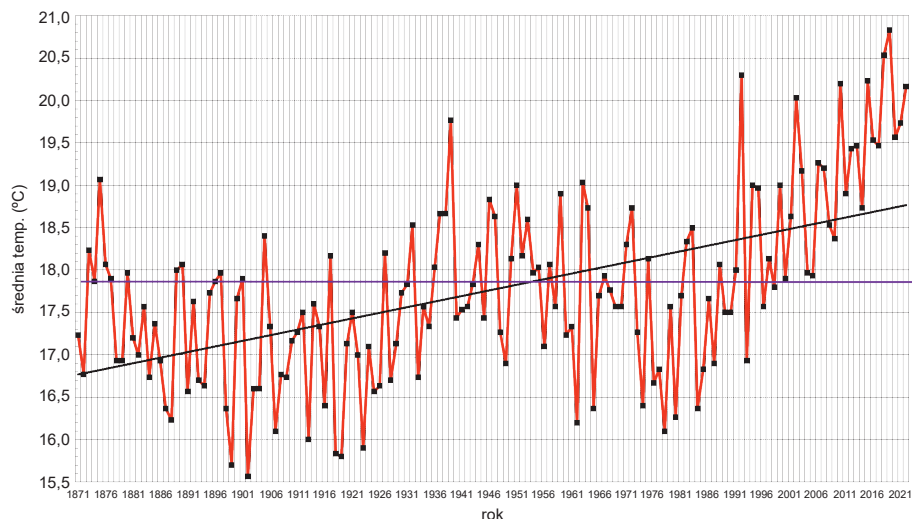
Rys. 3. Średnia temperatura powietrza wiosny (marzec–maj) w Puławach w latach 1871–2022

Źródło: opracowanie własne



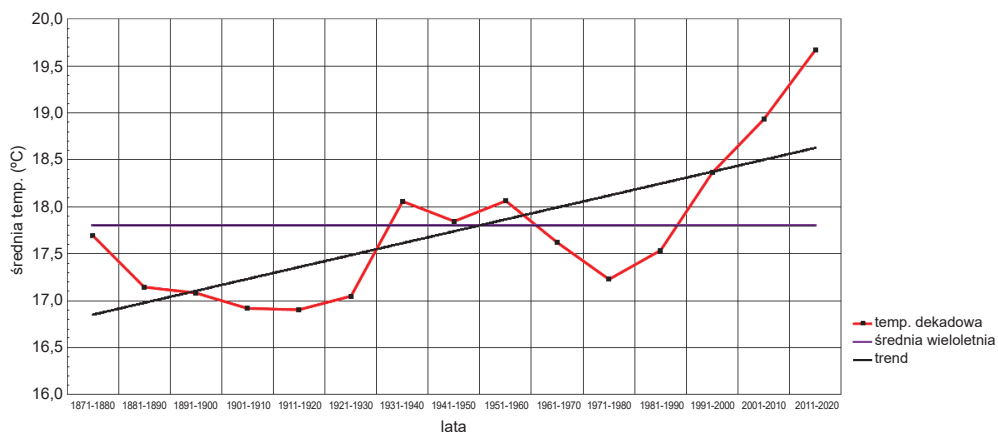
Rys. 4. Średnia temperatura powietrza wiosny (marzec–maj) w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

Trend temperatury powietrza dla lata w Puławach wynosi $1,32^{\circ}\text{C}$ na 100 lat. W każdym roku obecnego wieku temperatura ta była wyższa od średniej wieloletniej ($7,8^{\circ}\text{C}$) (rys. 5). Wzrost temperatury powietrza jest szczególnie widoczny od okresu 1981–1990 do lat 2011–2020 (rys. 6).



Rys. 5. Średnia temperatura powietrza lata (czerwiec–sierpień) w Puławach w latach 1871–2022

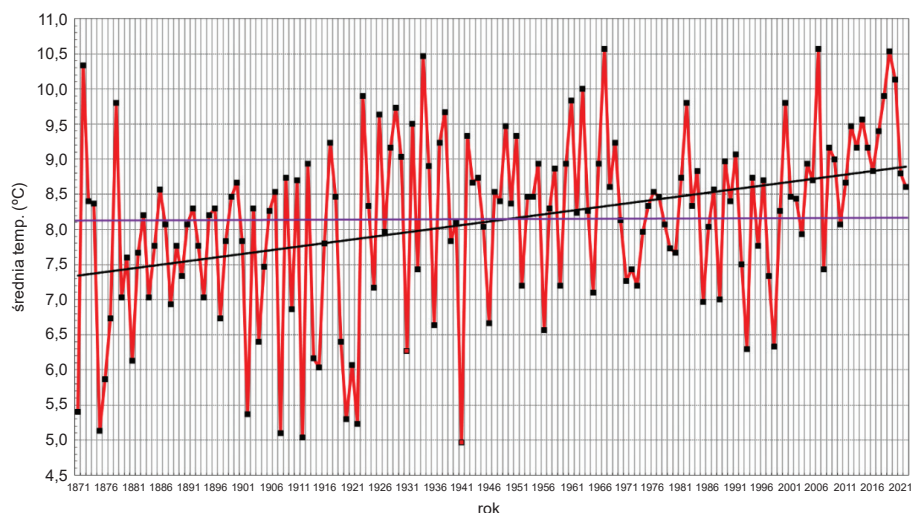
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Średnia temperatura powietrza lata (czerwiec–sierpień) w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

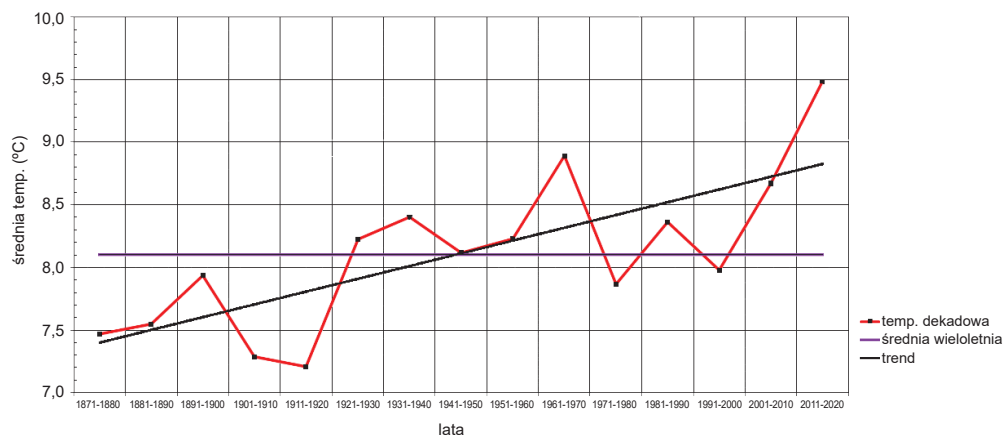
Źródło: opracowanie własne

Trend temperatury jesieni w Puławach wynosi $1,03^{\circ}\text{C}$ na 100 lat. Szczególnie ciepłą jesień notowano w ostatnich 12 latach (2011–2022), średnia dla tego okresu wynosiła $9,3^{\circ}\text{C}$ (rys. 7). Wzrost temperatury powietrza w okresie jesiennym widoczny jest zwłaszcza po 2000 r. (rys. 8).



Rys. 7. Średnia temperatura powietrza jesieni (wrzesień–listopad) w Puławach w latach 1871–2022

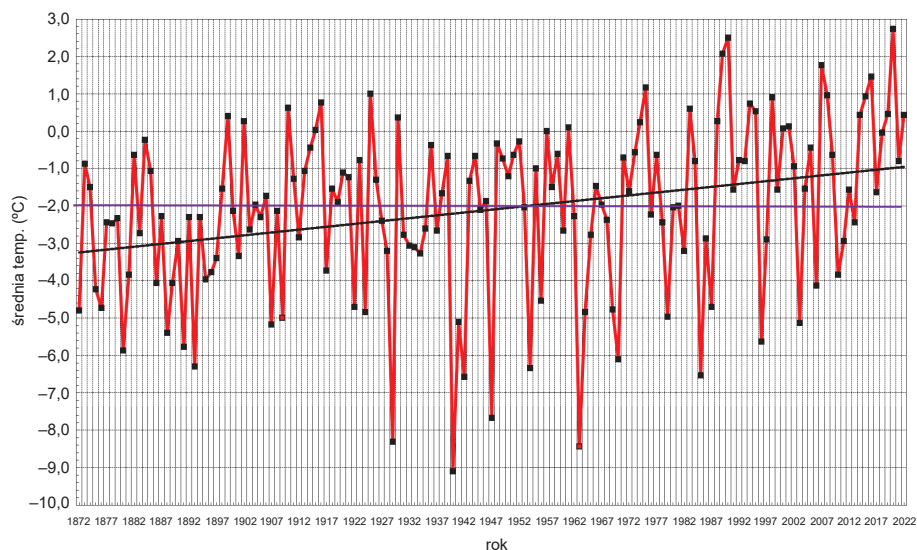
Źródło: opracowanie własne



Rys. 8. Średnia temperatura powietrza jesieni (wrzesień–listopad) w Puławach o okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

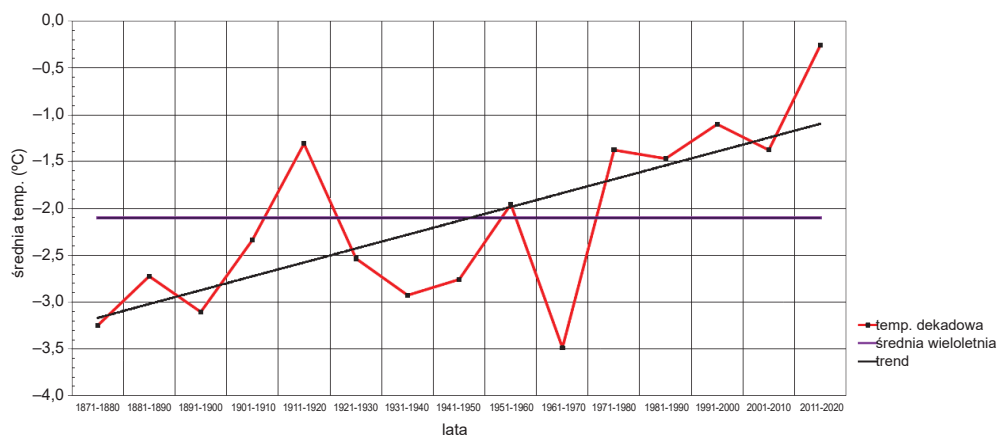
Źródło: opracowanie własne

Trend temperatury powietrza w zimie w Puławach wynosi $1,53^{\circ}\text{C}$ na 100 lat. W ostatnich 9 latach (2014–2022) temperatura powietrza każdej zimy była wyższa od średniej wieloletniej ($-2,1^{\circ}\text{C}$) (rys. 9). Szczególny wzrost temperatury powietrza w zimie widoczny jest po 2000 r. (rys. 10).



Rys. 9. Średnia temperatura powietrza zimy (grudzień–luty) w Puławach w latach 1871–2022

Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Średnia temperatura powietrza zimy (grudzień–luty) w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

Źródło: opracowanie własne

Analiza współczynników trendu liniowego w Puławach dla okresu 152-letniego (1871–2022) wykazała, że miesiącem o najwyższym przyroście temperatury powietrza był grudzień ($1,7^{\circ}\text{C}$). W badaniach Matuszko i Piotrowicz (20) dla okresu 133-let-

niego (1884–2016) najwyższy przyrost temperatury w Krakowie notowano w styczniu, a w Koszalinie w okresie 45 lat (1951–1995) w lutym (13). A więc w różnych rejonach kraju najwyższy przyrost wartości temperatury powietrza notowano w miesiącach zimowych (grudzień–styczeń–luty).

Natomiast duży wzrost temperatury odnotowano w sierpniu zarówno w Puławach ($1,6^{\circ}\text{C}$), jak i w Krakowie (20).

Najmniejszy wzrost temperatury powietrza zaznaczył się we wrześniu i październiku w Puławach (odpowiednio: $0,5$ i $1,0^{\circ}\text{C}$), jak również w Krakowie (20), a w Koszalinie – w listopadzie (13). A zatem w różnych rejonach kraju najniższy przyrost wartości temperatury powietrza notowano w jesiennych miesiącach (wrzesień–październik–listopad).

Porą roku o najwyższym przyroście temperatury w Puławach i Koszalinie (13) była wiosna i zima, a w Krakowie – zima i lato (20). Z powyższego zestawienia danych wynika, że w badanych miejscowościach najwyższy przyrost wartości temperatury powietrza notowano zwłaszcza w zimie.

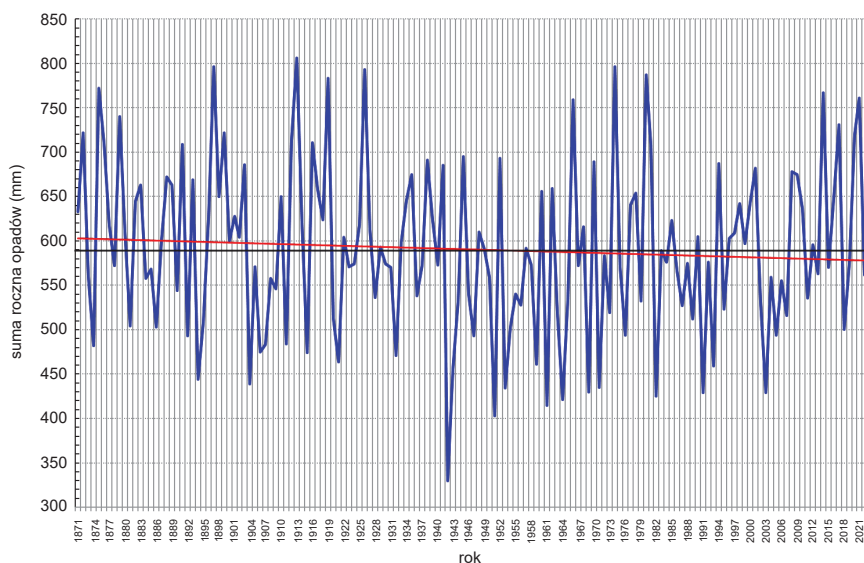
Jesień jest porą roku o najniższym przyroście temperatury w Puławach, Koszalinie (13) oraz w Krakowie (20).

Trend roczny temperatury powietrza wynosił w Puławach $1,4^{\circ}\text{C}$ na 100 lat, $1,7^{\circ}\text{C}$ w Krakowie (20) oraz $1,6^{\circ}\text{C}$ w Koszalinie (13).

W piątym raporcie IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (11) przedstawiono wielkość trendu liniowego temperatury powietrza na Ziemi dla okresu 133-letniego (1880–2012) jako $0,85 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, w Puławach dla okresu 152-letniego, dłuższego o 19 lat niż IPCC (11), trend wynosił $1,35^{\circ}\text{C}$. W Puławach trend wzrostu temperatury był wyższy o $0,3^{\circ}\text{C}$ niż podany przez IPCC (11). Jest to wynikiem ostatniego 10-letniego okresu (2013–2022) o najwyższej temperaturze w historii pomiarów w tej miejscowości. Wieloletni przebieg temperatury powietrza w Puławach potwierdza zatem wyniki przedstawiane dla innych miejsc na świecie (2, 3, 11, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 30) i świadczy, że jest typową miejscowością prezentującą wzrost ocieplenia klimatu na kuli ziemskiej.

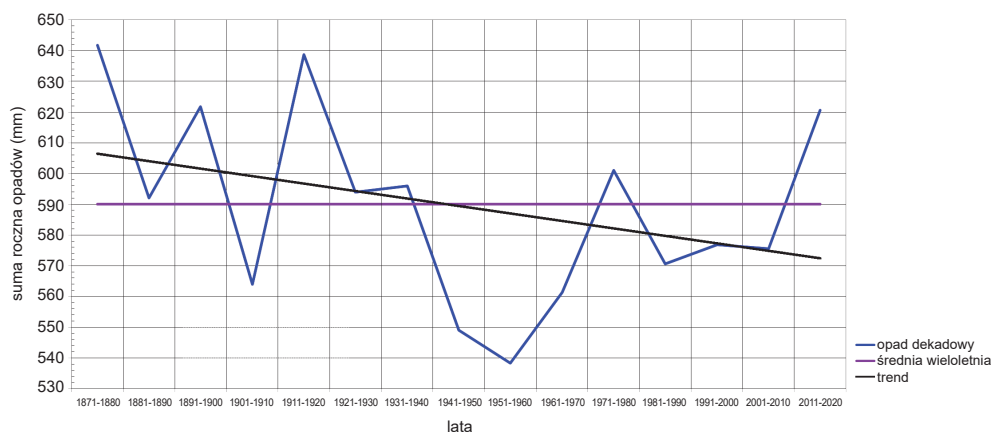
Na rysunkach 11–20 zamieszczono wykresy z przebiegiem wielkości opadów atmosferycznych dla Puław dla okresu 1871–2022.

Trend rocznej sumy opadów atmosferycznych w Puławach wynosi $-16,7$ mm na 100 lat (rys. 11) Na rysunku 12 również widoczne są duże zmiany pomiędzy poszczególnymi okresami dziesięcioletnimi, od 540 mm w okresie 1951–1960 do ok. 640 mm w okresach 1871–1880 oraz 1911–1920.



Rys. 11. Suma roczna opadów atmosferycznych w Puławach w latach 1871–2022

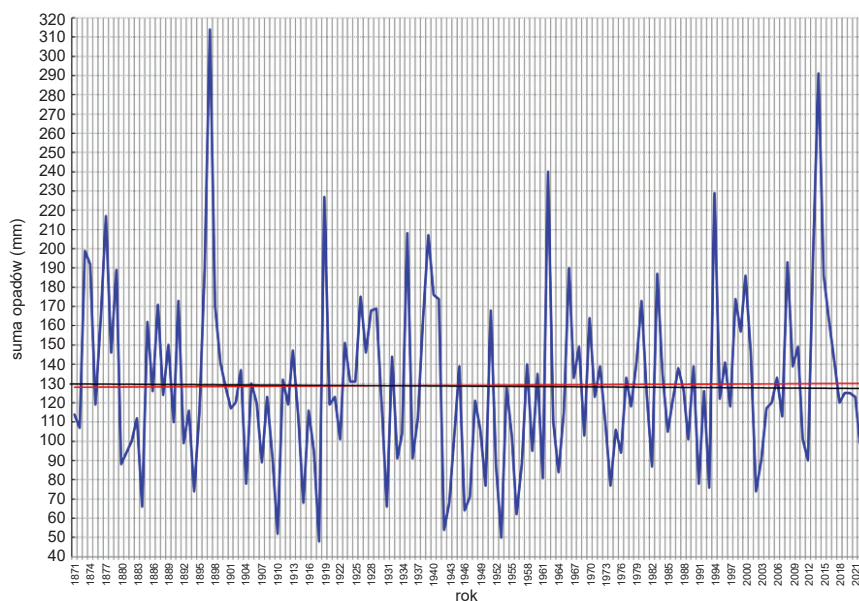
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Suma roczna opadów atmosferycznych w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

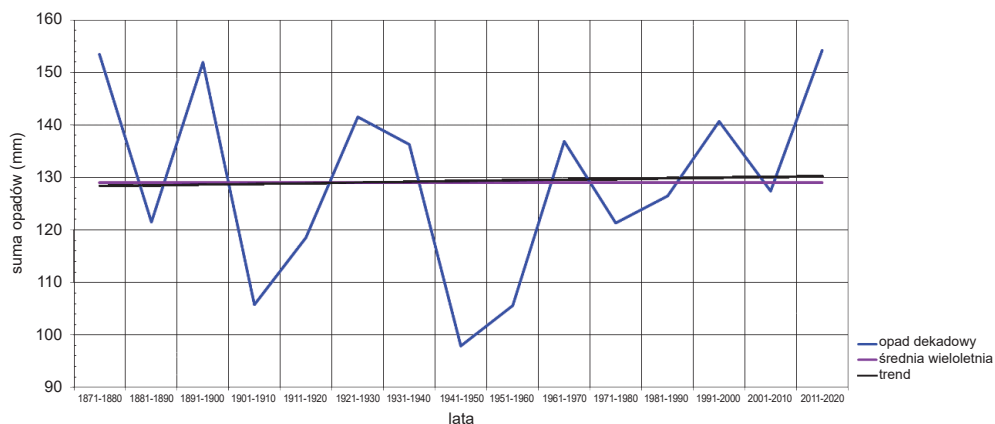
Źródło: opracowanie własne

Wiosną trend sumy opadów w Puławach wynosi 1,33 mm na 100 lat (rys. 13). Podobnie na wykresie przedstawiającym dane dziesięcioletnie trend wzrostowy dotyczący sumy opadów jest niewielki (rys. 14).



Rys. 13. Sumy opadów atmosferycznych wiosny (marzec-maj) w Puławach w latach 1871–2022

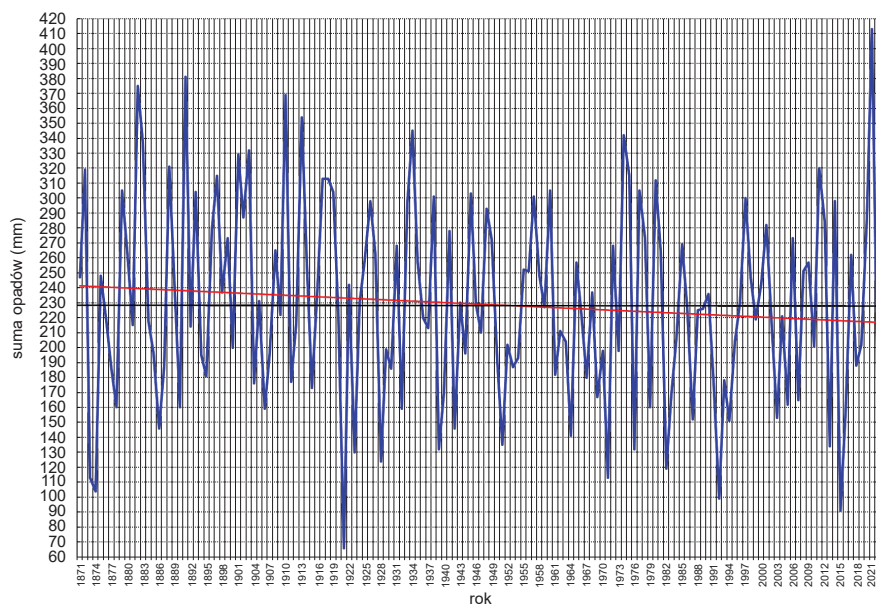
Źródło: opracowanie własne



Rys. 14. Sumy opadów atmosferycznych wiosny (marzec-maj) w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

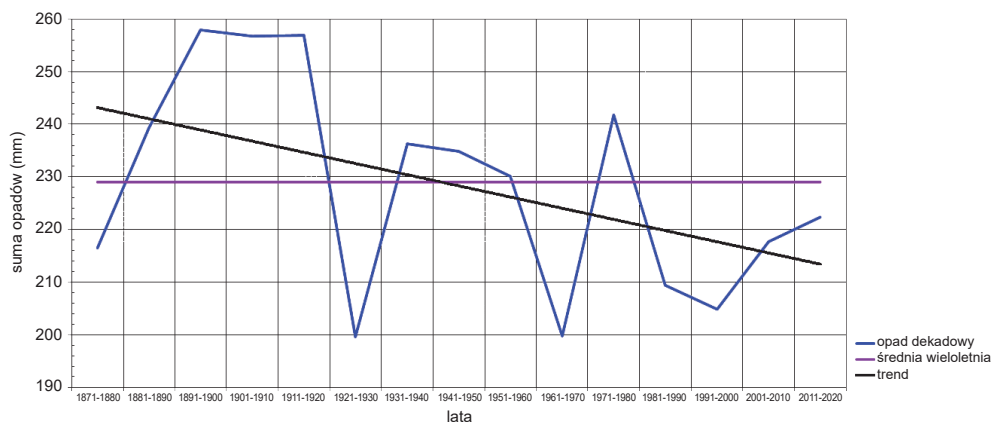
Źródło: opracowanie własne

Trend sumy opadów lata w Puławach wynosi $-16,25$ mm na 100 lat (rys. 15). Podobne relacje przedstawia wykres z danymi dla okresów dziesięcioletnich, przy czym należy zwrócić uwagę na małe opady występujące w ostatnich latach 1981–2020 (rys. 16).



Rys. 15. Sumy opadów atmosferycznych lata (czerwiec–sierpień) w Puławach w latach 1871–2022

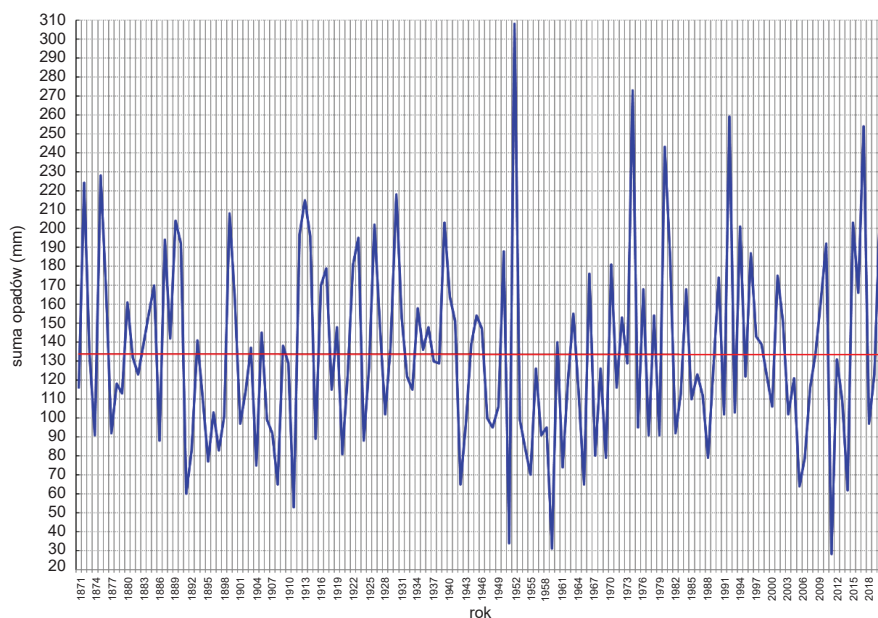
Źródło: opracowanie własne



Rys. 16. Sumy opadów atmosferycznych lata (czerwiec–sierpień) w okresach dziesięcioletnich w Puławach w latach 1871–2022

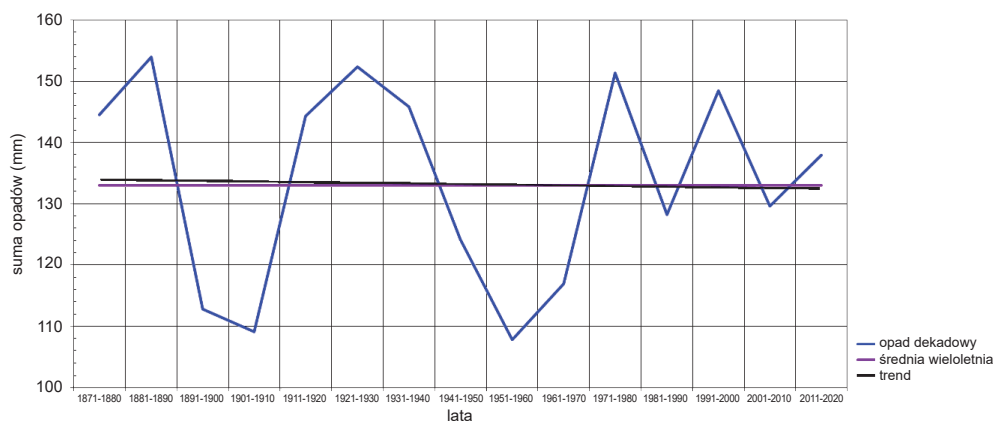
Źródło: opracowanie własne

Jesienią trend sumy opadów w Puławach wynosi $-0,08$ mm na 100 lat (rys. 17, 18).



Rys. 17. Sumy opadów atmosferycznych jesieni (wrzesień–listopad) w Puławach w latach 1871–2022

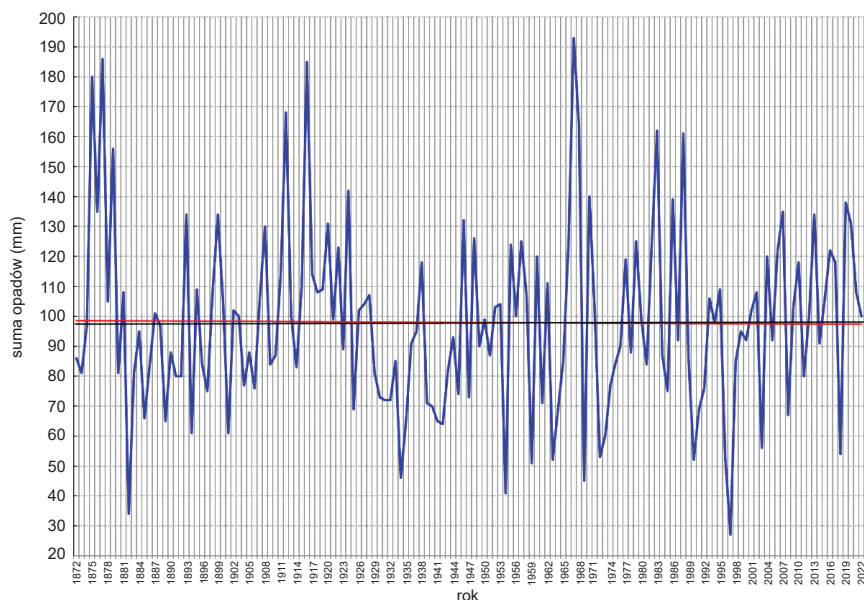
Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Sumy opadów atmosferycznych jesieni (wrzesień–listopad) w okresach dziesięcioletnich w Puławach w latach 1871–2022

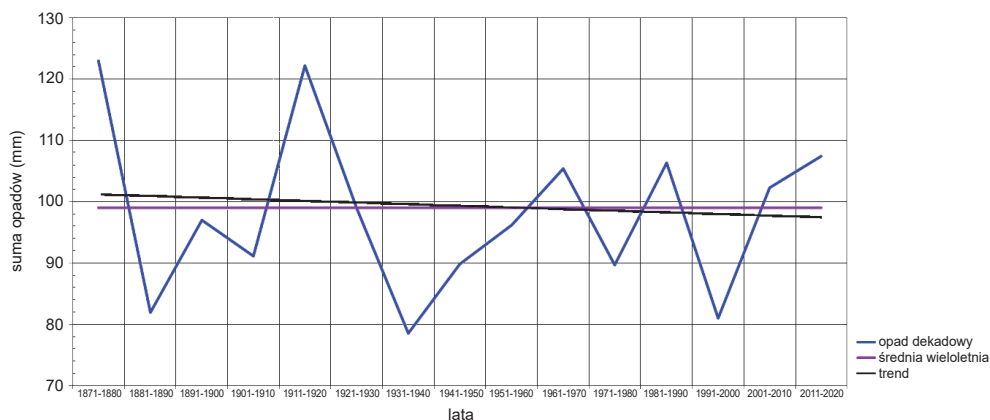
Źródło: opracowanie własne

Trend sumy opadów zimy w Puławach wynosi $-0,86$ mm na 100 lat (rys. 19, 20).



Rys. 19. Sumy opadów atmosferycznych zimy (grudzień–luty) w Puławach w latach 1871–2022

Źródło: opracowanie własne



Rys. 20. Sumy opadów atmosferycznych zimy (grudzień–luty) w Puławach w okresach dziesięcioletnich w latach 1871–2022

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wykresów zamieszczonych na rysunkach 11–20 można stwierdzić, że w Puławach dla okresu 152-letniego jedynie dla opadów rocznych oraz letnich notowano minusowy trend, wynoszący odpowiednio: $16,7$ oraz $16,2$ mm. Dla pozo-

stałych pór roku wartości trendu były bardzo małe i trudno jest stwierdzić o tendencjach zmian w wielkościach opadów atmosferycznych. Podobne wyniki uzyskały Czarnicka i Nidzgorska-Lencewicz (4), które stwierdziły, że opady w Polsce w okresie 1951–2010 nie wykazywały statystycznie istotnego trendu liniowego, nawet na poziomie $\alpha = 0,10$ oraz że zaznacza się niewielka tendencja do zwiększania opadów wiosną i jesienią, a zmniejszania latem. Natomiast Marosz i in. (19) stwierdzili na wiosnę obniżenie tych wielkości.

Badania przeprowadzone przez Szwed (25) również wykazały, że w całej Polsce w latach 1951–2013 następowało zmniejszenie udziału opadów letnich, a w latach 1961–2008 w środkowej części kraju (19). Podobnie jak w Puławach obniżenie wielkości opadów rocznych stwierdzono na dużej powierzchni kraju (19). Natomiast w okresie wegetacyjnym opady atmosferyczne nie ulegały znaczącej zmianie w latach 1966–2015 (26). Jednakże Żmudzka (34) stwierdziła, że w zależności od obserwowanego okresu roczne sumy opadów wykazują nieistotną statystycznie tendencję rosnącą, natomiast Mager i in. (18), że ta tendencja jest malejąca.

W literaturze wieloletnie wahania opadów atmosferycznych dla całej Polski przedstawiano wielokrotnie (4, 5, 12, 15, 16, 17, 18, 25, 28, 29, 31, 32, 33, 34), a także dla poszczególnych regionów kraju (1, 7, 10, 12, 23, 24, 27). Zagadnienia te nadal są przedmiotem wielu podejmowanych badań.

Podsumowanie

1. W latach z ekstremalnymi wartościami temperatury powietrza notowano ekstremalne susze.
2. W Puławach od dziesięcioletniego okresu 1981–1990 notowany jest stały wzrost temperatury powietrza. Szczególnie duży występował w okresie 2011–2020.
3. Największy wzrost temperatury powietrza w latach 1871–2022 notowano w zimie oraz na wiosnę, niższy w lecie, a najniższy jesienią.
4. Ujemny trend notowano w sumach opadów rocznych oraz letnich. W pozostałych porach roku nie stwierdzono zmian wielkości opadu atmosferycznego.

Literatura

1. Banaszkiewicz B., Grabowska K., Szwejkowski Z.: Characterisation of variability of atmospheric precipitation at selected stations of the Mazury Lake. *Acta Agrophysica*, 2008, **12(1)**: 19-27.
2. Beniston M., Stephenson D.B.: Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 2004, **44(1-4)**: 1-9, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.001.
3. Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**, D12106, DOI: 10.1029/2005JD006548.

4. Czarnecka M., Nidzgorska-Lencewicz J.: Wieloletnia zmienność sezonowych opadów w Polsce. ITP Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2012, (IV-VI), **12(2)(38)**: 45-60.
5. Degirmençi J., Kożuchowski K., Żmudzka E.: Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951–2000 and their relationship to atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 2004, **24(3)**: 291-310. DOI: 10.1002/joc.1010
6. Doroszewski A., Jadczyński J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E.: Podstawy Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej. Woda Środ. Obsz. Wiej. 2012, (IV-VI), t. 12, **2(38)**: 77-91.
7. Farat R.: Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce Północno-Zachodniej. W: *Klimat Polski na tle klimatu Europy*, E. Bednorz (red.). Warunki termiczne i opadowe, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2010, s. 117-130.
8. <http://www.susza.iung.pulawy.pl>
9. <http://www.susza.iung.pulawy.pl/KBW/>
10. Ilnicki P., Farat R., Górecki K., Lewandowski P.: Mit stepowienia Wielkopolski w świetle wieloletnich badań obiegu wody. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2012, Poznań, ss. 398.
11. IPCC: Summary for Policymakers. W: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.J. Plattner, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, NY, USA, 2013, ss. 1535.
12. Kirschenstein M., Baranowski D.: Sumy opadów atmosferycznych w Polsce w latach 1951–1995. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Ser. A. Geografia Fizyczna*, 2005, **56**: 55-72.
13. Kirschenstein M., Baranowski D.: Wahania roczne i tendencje zmian temperatury powietrza w Koszalinie. *Słupskie Prace Geograficzne*, 2009, **6**: 167-178.
14. Klein Tank A.M.G., Können G.P.: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999, *Journal of Climate*, 2003, **16(22)**: 3665-3680, DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIODT>2.0.CO;2
15. Kożuchowski K.: Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w stuleciu 1881–1980. *Acta Geographica Lodziensis*, 1984, **48**: 1-158.
16. Kożuchowski K.: Współczesne zmiany klimatyczne w Polsce na tle zmian globalnych. *Przegląd Geograficzny*, 1996, **68(1-2)**: 79-98.
17. Kożuchowski K.: Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w XX i XXI wieku. W: *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, K. Kożuchowski (red.). Wydawnictwo Biblioteka, Łódź 2004, ss. 47-58.
18. Mager P., Kaspróvicz T., Farat R.: Change o air temperature and precipitation in Poland in 1966–2006. In: *Climate change and agriculture in Poland – impacts, mitigation and adaptation measures*, J. Leśny (ed.). *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie*, 2009, **169(1)**: 19-38.
19. Marosz M., Wójcik R., Biernacik D., Jakusik E., Pilarski M., Owczarek M., Miętus M.: Zmienność klimatu Polski od połowy XX wieku. *Rezultaty projektu KLIMAT. Prace i Studia Geograficzne*, 2011, **47**: 51-66.
20. Matuszko D., Piotrowicz K.: Związek usłonecznienia i temperatury powietrza na podstawie wieloletniej serii klimatologicznej w Krakowie (1884–2016). *Przegląd Geofizyczny*, 2018, **LXIII(1-2)**: 15-29.
21. Michalska B.: Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne*, 2011, **47**: 67-75.
22. Moberg A., Jones P.D.: Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in Central and Western Europe analyzed 1901-1999, *International Journal of Climatology*, 2005, **25(9)**: 1149-1171, DOI: 10.1002/joc.1163

23. O t o p I.: Precipitation variability in the middle Odra River basin in the years 1951–2005. In: Climate change research. J. Leśny (ed.). Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie, 2010, **183(4)**: 50-57.
24. S z y g a-P l u t a K.: Zmienność czasowa i przestrzenna opadów atmosferycznych w Wielkopolsce w latach 1981–2014. Przegląd Geograficzny, 2018, **90(3)**: 495-516 <https://doi.org/10.7163/PrzG.2018.3.5>
25. S z w e d M.: Variability of precipitation in Poland under climate change, Theoretical and Applied Climatology, 2019, **135**: 1003-1015, doi.org/10.1007/s00704-018-2408-6.
26. T o m c z y k A.M., S z y g a-P l u t a K.: Variability of thermal and precipitation conditions in the growing season in Poland in the years 1966–2015. Theoretical and Applied Climatology, 2019, **135**: 1517-1530, doi.org/10.1007/s00704-018-2450-4
27. T w a r d o s z R.: Wieloletnia zmienność sum dobowych opadów w Krakowie w powiązaniu z sytuacjami synoptycznymi, Prace Geograficzne, 2000, **105**: 19-71.
28. W i b i g J.: The variability of daily precipitation totals in Poland (1951–2000). Geographia Polonica, 2009, **82(1)**: 21-32.
29. W o ś A.: Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 2010, ss. 489.
30. W ó j c i k R., M i ę t u s M.: Niektóre cechy wieloletniej zmienności temperatury powietrza w Polsce (1951–2010). Przegląd Geograficzny, 2014, **86(3)**: 339-364, doi.org/10.7163/PrzG.2014.3.3
31. Z a w o r a T., Z i e r n i c k a A.: Precipitation variability in time in Poland in the light of multi-annual mean values (1891–2000). Studia Geograficzne Nr 75, Acta Universitatis Wratislaviensis, 2003, **2542**: 123-128.
32. Z i e r n i c k a-W o j t a s z e k A.: Zmienność opadów atmosferycznych na obszarze Polski w latach 1971–2000. W: Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego, J. Trepińska, Z. Olecki (red.). Kraków, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, 2006, ss. 139-148.
33. Ż m u d z k a E.: O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. Wiadomości IMGW, 2002, **25(46)(4)**: 23-38.
34. Ż m u d z k a E.: Współczesne zmiany klimatu Polski. Acta Agrophysica. 2009, **13(2)**: 555-568.

Adres do korespondencji:

dr hab. Andrzej Doroszewski, prof. IUNG-PIB
Zakład Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 4786 750
email: ador@iung.pulawy.pl

AUTOR
Andrzej Doroszewski

ORCID
0000-0002-1429-4412

Andrzej Doroszewski, Piotr Koza

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

WYSTĘPOWANIE SUSZY ROLNICZEJ W POLSCE W LATACH 2006–2022*

Słowa kluczowe: klimatyczny bilans wodny, plony roślin uprawnych, susza rolnicza

Wstęp

W ostatnich 35 latach (1988–2022) obserwuje się w Polsce wzrost częstości i obszaru występowania suszy rolniczej, zwłaszcza po 1992 r. (6, 7, 24, 25). Jest to spowodowane zmianami klimatycznymi, od których rolnictwo jest w bardzo dużym stopniu uzależnione (15, 17, 18, 19, 20, 22, 37). Widoczna jest wyraźna tendencja wzrostu temperatury powietrza, co powoduje zmniejszenie bilansu wodnego (21).

Susza rolnicza jest istotnym problemem zarówno gospodarczym, jak i społecznym wynikającym z niesprzyjających warunków agrometeorologicznych, hydrologicznych oraz glebowych. Narasta ona powoli, a jej następstwa występują w długim okresie. Rolnictwo zaliczane jest do gałęzi gospodarki narodowej, która najbardziej odczuwa skutki suszy, przejawiające się znacznym zmniejszeniem wielkości i jakości plonów roślin uprawnych (1). Wzrost niedoborów wody w środowisku powoduje bardzo niekorzystne następstwa w rolnictwie, albowiem woda jest podstawowym czynnikiem żyzności gleby decydującym w dużej mierze o produktywności roślin uprawnych (31). Wpływ niedoboru wody na wielkość plonu roślin uprawnych był przedmiotem wielu badań (2, 3, 4, 10). Uzyskane wyniki wykazują, że po 2000 r. występują coraz mniejsze wartości klimatycznego bilansu wodnego (KBW), szczególnie wiosną i wczesnym latem (9), czego następstwem są okresy ze znacznym deficytem wody dla roślin. Zbiega się to z okresem największego zapotrzebowania na wodę przez rośliny uprawne, zwłaszcza przez zboża.

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

Rośliny charakteryzują się dużą wrażliwością na niedobory opadów atmosferycznych, zwłaszcza w okresach krytycznych występujących zazwyczaj w czasie intensywnego wzrostu ich masy. Niedobory te powstają w okresie, w którym zapotrzebowanie na wodę dla roślin nie jest w pełni pokrywane przez opady atmosferyczne oraz przez zasoby wody łatwo dostępnej w glebie.

O wystąpieniu suszy stanowi cały kompleks warunków meteorologicznych i glebowych. Do głównych elementów meteorologicznych decydujących o suszy należą: opad atmosferyczny, temperatura i wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne, prędkość wiatru. Oprócz opadu atmosferycznego pozostałe elementy wpływają na wielkość ewapotranspiracji potencjalnej. Istnieje szereg meteorologicznych wskaźników suszy, które w większości odnoszą się do sum opadu atmosferycznego i które nie są w pełni zadowalające do ich stosowania przy określaniu skutków suszy w rolnictwie. W Systemie Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR) warunki meteorologiczne, powodujące suszę są określane za pomocą KBW. Pomimo użyteczności wskaźnika KBW nie można określić skutków suszy bez uwzględnienia zmienności przestrzennej gleb. Gleby, w zależności od rodzaju, posiadają zróżnicowane możliwości retencji wodnej, która wyjaśnia duże lokalne zróżnicowanie strat w plonach w następstwie deficytu opadów. Ocena zjawiska suszy wyłącznie na podstawie KBW z pominięciem jakości gleb jest zdecydowanie nieodpowiednia dla warunków Polski.

Każdy gatunek roślin ma inne, specyficzne wymagania względem zasobów wodnych w czasie swojego rozwoju. Powyższe przesłanki skłoniły do poszukiwania najlepszych metod monitorowania zjawiska suszy rolniczej, zwiększających dokładność oceny zasobów wody dostępnych dla roślin, wykorzystując w tym celu cyfrową mapę glebowo-rolniczą.

Rozgraniczenie wpływu poszczególnych czynników plonotwórczych w warunkach polowych jest bardzo trudne. Natomiast na podstawie wieloletnich danych o plonach uzyskanych w różnych warunkach klimatyczno-glebowych, za pomocą metod statystyczno-empirycznych, można określić wpływ tylko deficytu wody na plon roślin uprawnych. W powszechnej opinii wystąpienie wysokiej temperatury, długotrwałego okresu bez opadu, dużego usłonecznienia, małego zachmurzenia czy dużej prędkości wiatru jest już powodem do twierdzenia, że występuje susza. Te wymienione zjawiska meteorologiczne są nieodłącznie związane z **suszą atmosferyczną**. Natomiast **suszę rolniczą** charakteryzuje niedostateczne uwilgotnienie gleby wywołujące stres wodny u roślin powodujący zmniejszenie biomasy (w tym również plonu). W konsekwencji długotrwałej suszy następuje zmniejszenie dopływu wody do zbiorników, jezior, wysychanie stawów, terenów podmokłych, doprowadzając do obniżenia lustra wody w tych ekosystemach. W wyniku zaistniałych zdarzeń oznacza to, że występuje kolejne stadium rozwoju suszy, czyli **susza hydrologiczna**.

Przejawem trendu występowania dużych niedoborów wody była ekstremalna susza w 2006 r., w wyniku której średnie krajowe plony niektórych upraw były niż-

sze nawet o 30% od plonów uzyskiwanych w przeciętnych warunkach wieloletnich. Do lat zaliczanych jako bardzo suche, powodujące bardzo duże straty w rolnictwie, należą niewątpliwie 2006, 2008, 2015, 2018, 2019 oraz 2022 (6, 12, 32, 36).

Zgodnie z ustawą o dopłatach do ubezpieczeń upraw rolnych i zwierząt gospodarskich (35) suszę rolniczą wyznacza się za pomocą KBW, który określa stan uwilgotnienia środowiska (bieżące zasoby wodne) na podstawie danych meteorologicznych. Na konieczność monitorowania zjawiska suszy z uwzględnieniem KBW wskazywali liczni autorzy (8, 16, 23, 27, 34).

W 2007 r. na wniosek Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi został opracowany i wdrożony przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy (IUNG-PIB) w Puławach System Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR). Zawiera on aplikacje komputerowe integrujące dane meteorologiczne potrzebne do obliczenia KBW oraz dane z cyfrowej mapy glebowo-rolniczej obrazującej przestrzenne zróżnicowanie retencji wodnej różnych kategorii agronomicznych gleb. System zawiera narzędzia służące do oceny suszy dla poszczególnych grup i gatunków roślin uprawnych.

W związku z pracami nad przyspieszeniem procedur związanych ze zgłoszeniem przez rolników wniosku suszowego a decyzją informującą o wyniku wystąpienia lub też o braku zjawiska suszy rolniczej na obszarze wszystkich działek rolniczych należących do zgłaszającego – Ministerstwo Cyfryzacji opracowało aplikację weryfikującą straty dla wszystkich upraw zgłaszanych przez rolnika. W tym celu został przygotowany „Słownik” określający wymagania wodne dla 925 grup i gatunków roślin funkcjonujących w systemach Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ARiMR). Informacja ta służy do wyznaczania suszy dla gatunków roślin znajdujących się w „Słowniku” w powiązaniu z uprawami dotychczas monitorowanymi przez prowadzony System.

Wyniki analiz Systemu są prezentowane na stronie internetowej w postaci map oraz tabel. Dla monitorowanych upraw rolniczych opracowywane są dane przedstawiające zagrożenie suszą dla wszystkich gmin Polski w okresie wegetacyjnym. System monitoringu suszy składa się z bazy danych pogodowych, glebowych, aplikacji GIS (ang. *Geographic Information System*) do przetwarzania i integracji danych przestrzennych oraz internetowego systemu prezentacji wyników.

Opracowany SMSR jest skierowany do instytucji ubezpieczeniowych, organów administracji państwowej i samorządowej, służby doradztwa rolniczego oraz rolników, którzy dla każdej gminy Polski mogą na bieżąco w okresie wegetacyjnym uzyskać informacje o zagrożeniu suszą.

Celem pracy była analiza występowania suszy rolniczej w uprawach rolniczych oraz wskazanie obszarów jej występowania w prowadzonym SMSR w latach 2007–2022.

Metody wyznaczania suszy

System przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych suszą dla poszczególnych grup i gatunków upraw uwzględnia dwa czynniki:

- ✓ warunki pogodowe;
- ✓ podatność gleby na suszę.

Wartości krytyczne KBW w sześciodekadowych okresach od 21 marca do 30 września zostały wyznaczone z wykorzystaniem statystyczno-empirycznych modeli prognoz plonów opracowanych w IUNG-PIB. Wystąpienie wartości krytycznej oznacza zmniejszenie plonów o 20% w skali gminy w danym roku w stosunku do plonów uzyskanych przy średnich wieloletnich warunkach pogodowych. Tabela 1 przedstawia szczegółowy wykaz dekad branych pod uwagę w każdym okresie sześciodekadowym. Natomiast w tabeli 2 przedstawiono okresy sześciodekadowe, wykaz grup i gatunków roślin branych pod uwagę w danym okresie sześciodekadowym oraz daty prezentacji raportów.

Tabela 1

Okresy sześciodekadowe KBW od 21 marca do 30 września

Okres	Liczba dekad w miesiącach
21 III–20 V	1 (III) + 3 (IV) + 2 (V)
1 IV–31 V	3 (IV) + 3 (V)
11 IV–10 VI	2 (IV) + 3 (V) + 1 (VI)
21 IV–20 VI	1 (IV) + 3 (V) + 2 (VI)
1 V–30 VI	3 (V) + 3 (VI)
11 V–10 VII	2 (V) + 3 (VI) + 1 (VII)
21 V–20 VII	1 (V) + 3 (VI) + 2 (VII)
1 VI–31 VII	3 (VI) + 3 (VII)
11 VI–10 VIII	2 (VI) + 3 (VII) + 1 (VIII)
21 VI–20 VIII	1 (VI) + 3 (VII) + 2 (VIII)
1 VII–31 VIII	3 (VII) + 3 (VIII)
11 VII–10 IX	2 (VII) + 3 (VIII) + 1 (IX)
21 VII–20 IX	1 (VII) + 3 (VIII) + 2 (IX)
1 VIII–30 IX	3 (VIII) + 3 (IX)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2

Okresy sześciodekadowe KBW oraz gatunki i grupy rozpatrywanych roślin

Okres sześciodekadowy	Raport na dzień	Numer raportu	Rośliny uwzględniane w raporcie
21 III–20 V 1 IV–31 V	21 V 31 V	1 2	zboża: ozime i jare, rzepak i rzepik, burak cukrowy, krzewy owocowe, drzewa owocowe, truskawki
11 IV–10 VI	10 VI	3	zboża: ozime i jare, rzepak i rzepik, ziemniak, burak cukrowy, krzewy owocowe, drzewa owocowe, truskawki
21 IV–20 VI 1 V–30 VI 11 V–10 VII	20 VI 30 VI 10 VII	4 5 6	zboża: ozime i jare, kukurydza na ziarno i na kiszonkę, rzepak i rzepik, ziemniak, burak cukrowy, chmiel, tytoń, warzywa gruntowe, krzewy owocowe, drzewa owocowe, truskawki, rośliny strączkowe
21 V–20 VII 1 VI–31 VII 11 VI–10 VIII	20 VII 31 VII 10 VIII	7 8 9	zboża: ozime i jare, kukurydza na ziarno i na kiszonkę, ziemniak, burak cukrowy, chmiel, tytoń, warzywa gruntowe, krzewy owocowe, drzewa owocowe, truskawki, rośliny strączkowe
21 VI–20 VIII 1 VII–31 VIII	20 VIII 31 VIII	10 11	kukurydza na ziarno i na kiszonkę, ziemniak, burak cukrowy, chmiel, tytoń, warzywa gruntowe, krzewy owocowe, drzewa owocowe, rośliny strączkowe
11 VII–10 IX	10 IX	12	kukurydza na ziarno i na kiszonkę, ziemniak, burak cukrowy, chmiel, tytoń, warzywa gruntowe, krzewy owocowe, drzewa owocowe
21 VII–20 IX	20 IX	13	rzepak i rzepik, ziemniak, burak cukrowy
1 VIII–30 IX	30 IX	14	rzepak i rzepik, burak cukrowy

Źródło: opracowanie własne

SMSR oparty jest na sześciodekadowych danych meteorologicznych. W przypadku jednostkowego opadu różnica sumy opadu pomiędzy bliskimi miejscowościami może się różnić, natomiast przy agregacji sumy opadu dla dłuższego okresu obejmującego 61–62 dni różnice są mniejsze i uprawniają do zastosowania procedury interpolacyjnej. Okres sześciu dekad do określenia suszy rolniczej został wybrany z powodu najlepszej oceny deficytu wody na plonowanie roślin. Agregacja okresu do sześciu dekad pozwala na lepsze określenie obniżenia plonu końcowego z powodu wystąpienia deficytu wody (26).

Susza meteorologiczna jest wyznaczana za pomocą KBW, to jest różnicy pomiędzy opadem atmosferycznym a ewapotranspiracją potencjalną:

$$KBW = P - ETP$$

gdzie:

P – opad atmosferyczny (mm);

ETP – ewapotranspiracja (mm).

Wartość ETP jest obliczana na podstawie wzoru Doroszewskiego i in. (5):

$$\text{ETP} = 161 + 19,57 d - 152,7 \ln d + 0,0004034 h^2 + 0,00186 (t + 5)^3 + 0,004192 (100 - f)^2 + 0,0003681 v (100 - f)^{2,5}$$

gdzie:

d – długość dnia (h);

h – uśłonecznienie (h);

t – średnia temperatura powietrza (°C);

f – wilgotność względna, godz. 13.00 (%);

v – średnia prędkość wiatru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

W wyznaczaniu suszy rolniczej istotną rolę odgrywa podatność gleb na niedobór wody, która uzależniona jest od składu granulometrycznego wyrażonego w kategoriach agronomicznych. W skali kraju wydzielono cztery kategorie podatności gleb na suszę, które różnicują przestrzennie retencję wodną i potencjalną dostępność wody dla roślin uprawnych.

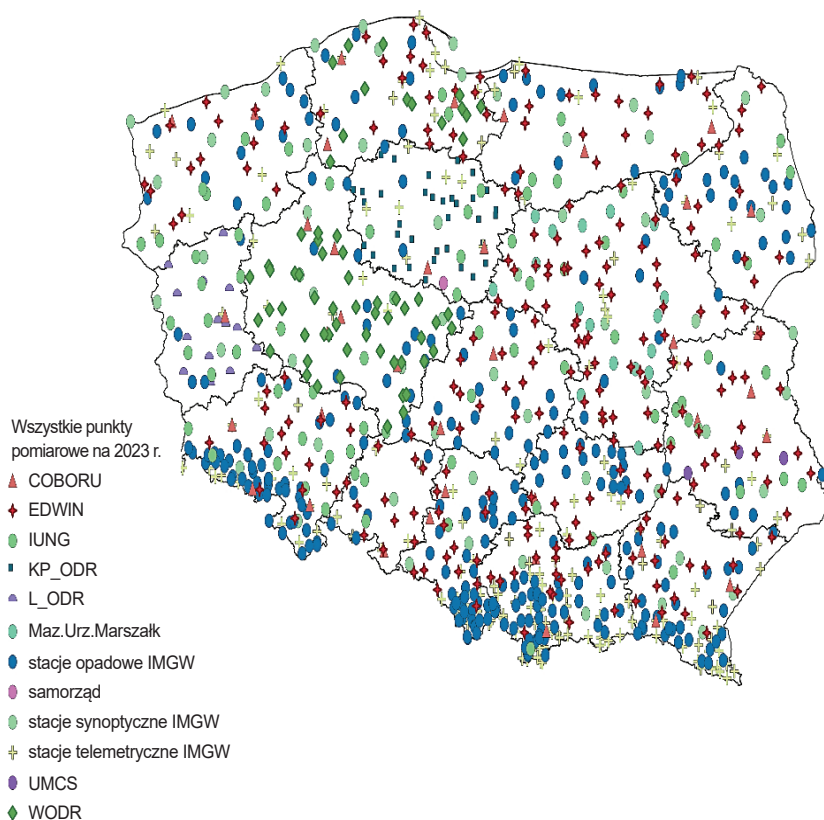
Podstawą opracowania mapy kategorii podatności gleb na suszę rolniczą jest uziarnienie profilu glebowego (skład granulometryczny), które decyduje o możliwości gromadzenia (retencji) wody w glebie i jej dostępności dla roślin (6, 29, 30).

W SMSR wykorzystywane są dane meteorologiczne z punktów pomiarowych: synoptycznych, telemetrycznych, opadowych z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB), Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych (COBORU), ośrodków doradztwa rolniczego (ODR) w woj. kujawsko-pomorskim, lubuskim oraz wielkopolskim, Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS) oraz z IUNG-PIB. Rysunek 1 przedstawia meteorologiczne punkty pomiarowe, z których dane wykorzystywane są w SMSR.

Każdorazowo przed ogłoszeniem kolejnego komunikatu dotyczącego aktualnego stanu zagrożenia suszą na terenie kraju dokonywana jest weryfikacja danych meteorologicznych.

W celu zachowania najwyższej jakości danych pomiarowo-obszarnych na stacjach IMGW-PIB, IUNG-PIB i ODR zainstalowane są zdublowane przyrządy pomiarowe, np. dwa deszczomierze. Pozwala to na wychwycenie błędów wynikających z awarii urządzenia.

Po kontroli danych meteorologicznych są one wykorzystywane do wyznaczania wartości KBW. Przestrzenne dane z pomiarów punktowych są interpolowane przy użyciu oprogramowania GIS (ArcGIS). Na każdą wyinterpolowaną wartość program wykorzystuje informacje z 12 najbliższych stacji meteorologicznych. Program ten przy tworzeniu interpolacji danych uwzględnia wpływ odległości stacji na tę wartość; im stacja położona jest bliżej interpolowanej danej, tym większy jest jej wpływ. System GIS uwzględnia następujące warstwy informacji: dane dotyczące opadów atmosferycznych, ewapotranspiracji, dane z cyfrowej mapy glebowo-rolniczej obrazującej przestrzenne zróżnicowanie retencji wodnej różnych kategorii agronomicznych gleb i jej wpływ na skutki suszy rolniczej oraz granice wszystkich gmin Polski.



Rys. 1. Rozmieszczenie wszystkich punktów pomiarowych wykorzystywanych w SMSR (stan na 1.01.2023 r.)

Źródło: opracowanie własne

Działania IUNG-PIB od początku utworzenia SMSR są ukierunkowane na systematyczne zwiększanie liczby stacji meteorologicznych. Dane pomiarowe są podstawą do określenia zasięgu suszy i starania Instytutu prowadzone są w tym kierunku od wielu lat. Działania te najlepiej odzwierciedlają dane przedstawione w tabeli 3. Sieć stacji, z których dane meteorologiczne wykorzystywane są do wyznaczania suszy rolniczej stale się zwiększa. Zwiększenie gęstości stacji meteorologicznej sprawia, że wzrasta dokładność oraz jakość prezentowanych wyników. Gęstsza sieć powoduje zmniejszenie błędów powstałych w wyniku interpolacji KBW. W 2007 r., tj. w pierwszym roku prowadzenia SMSR, dysponowano danymi meteorologicznymi pochodzącymi z 227 stacji. Obecnie (stan na 30.06.2023 r.) wykorzystywane są dane pochodzące z 1072 stacji, w ciągu ostatnich siedemnastu lat (2007–2023) baza danych meteorologicznych, na których oparty jest System została wzbogacona o 845 stacji (wzrost o 472%).

Tabela 3

Stacje meteorologiczne w SMSR (stan na 31.12.2022 r.)

Lp.	Rok	Synoptyczne IMGW-PIB	Posterunki opadowe i klimatyczne IMGW-PIB	COBORU	IUNG-PIB	ODR	Samorządy lokalne*	UMCS	EDWIN**	Razem
1.	2007	54	171	-	2					227
2.	2008	54	176	-	3					233
3.	2009	54	166	35	12					267
4.	2010	53	163	50	16					282
5.	2011	53	163	50	27					293
6.	2012	54	163	50	28					295
7.	2013	54	215	50	33					352
8.	2014	54	215	50	38					357
9.	2015	54	207	50	43					354
10.	2016	59	219	39	51	33				401
11.	2017	58	351	39	52	33				533
12.	2018	58	483	39	53	33	2			666
13.	2019	58	511	38	55	33	7			695
14.	2020	59	479	38	78	52	18	3		709
15.	2021	59	479	38	107	52	47	3		738
16.	2022	58	493	38	139	52	86	3		783
17.	2023	58	479	37	140	114	87	3	241	1072

*stacje oznaczone jako samorządy lokalne działają w sieci IUNG-PIB

**EDWIN – Internetowa Platforma Doradztwa i Wspomagania Decyzji w Integrowanej Ochronie Roślin

Źródło: opracowanie własne

W 2020 r. IUNG-PIB włączył do SMSR dane pochodzące z naziemnych radarów mierzących wielkość opadów atmosferycznych przez IMGW-PIB. Dane pochodzące z sieci POLRAD (polska sieć radarów meteorologicznych), które udostępniane są od października 2019 r. wykorzystane są w prowadzonym Systemie w modelowaniu map KBW. POLRAD jest siecią radarów meteorologicznych – naziemnych urządzeń teledetekcyjnych. Pozyskiwane dane generowane są z map o rozdzielczości przestrzennej 500 m × 500 m, a zatem System dysponuje 1 250 784 danymi o opadzie dla obszaru Polski pochodzącymi z radarów naziemnych. Pozyskiwane dane z tej sieci są niezwykle ważne z uwagi na istotny element, jakim jest opad atmosferyczny w klimatycznym bilansie wodnym, który w bardzo dużym stopniu decyduje o wielkości suszy rolniczej. Uzyskanie tych informacji pozwala na znaczne uszczegółowienie pola opadów dla całego kraju. Dzięki zastosowaniu nowej metody wyznaczania opadów,

uzyskano znacznie większą szczegółowość w określeniu KBW na terenie kraju, a tym samym zwiększyła się precyzja w wyznaczeniu obszarów objętych suszą rolniczą.

Na podstawie danych meteorologicznych po każdym skończonym sześciodekadowym okresie są wykreślane mapy przedstawiające rozkład KBW dla obszaru Polski, które następnie zamieszczane są na stronie internetowej (13).

Na podstawie zintegrowanych danych przestrzennych obliczane są dla każdego okresu sześciodekadowego aktualne wartości KBW dla każdej gminy Polski w okresie wegetacyjnym i porównywane z wartościami krytycznymi KBW zamieszczonymi w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi w sprawie wartości KBW dla poszczególnych gatunków roślin i gleb (30). Susza rolnicza występuje na obszarach, dla których obliczone wartości są mniejsze od przyjętych w rozporządzeniu z uwzględnieniem kategorii glebowych i rodzaju upraw. Dla wszystkich monitorowanych upraw co dekadę są opracowywane mapy przedstawiające zasięg suszy rolniczej w danym okresie sześciodekadowym.

Dla potrzeb SMSR opracowano mapę kategorii podatności gleb na suszę, która odzwierciedla potencjalną retencję i ilość wody ogólnie dostępnej dla roślin (WOD) w profilu glebowym. Kategorie podatności gleb na suszę wydzielono na podstawie informacji o uziarnieniu zawartej na mapie glebowo-rolniczej (33) (tab. 4).

Tabela 4

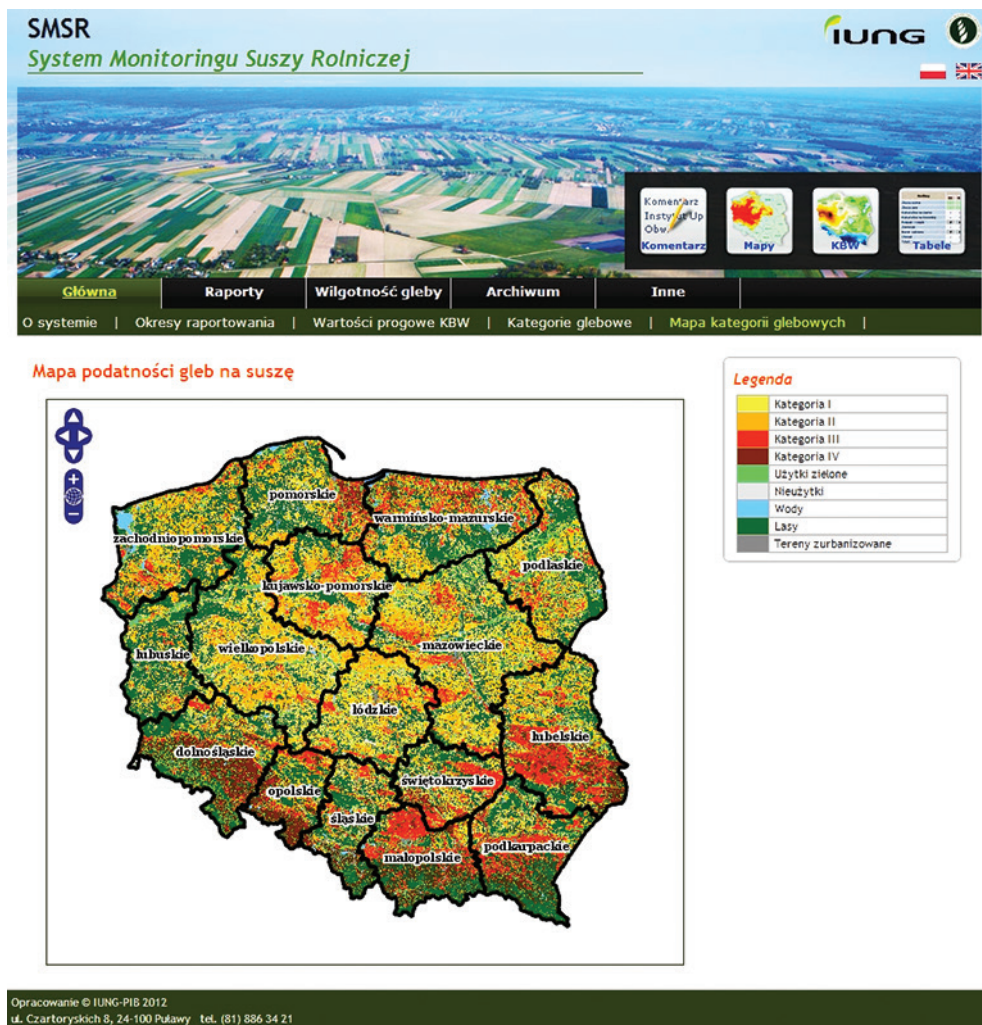
Podział gatunków gleb na kategorie podatności na suszę rolniczą

Kategoria gleby	Gatunek gleby
I – bardzo podatna na suszę (WOD* < 127,5 mm)	piasek luźny – pl piasek luźny pylasty – plp piasek słabo gliniasty – ps piasek słabo gliniasty pylasty – psp
II – podatna na suszę (WOD 127,5–169,9 mm)	piasek gliniasty lekki – pgl piasek gliniasty lekki pylasty – pglp piasek gliniasty mocny – pgm piasek gliniasty mocny pylasty – pgmp
III – średnio podatna na suszę (WOD 170–202,5 mm)	glina lekka – gl glina lekka pylasta – glp pył gliniasty – płg pył zwykły – płz pył piaszczysty – płp
IV – mało podatna na suszę (WOD > 202,5 mm)	glina średnia – gs glina średnia pylasta – gsp glina ciężka – gc glina ciężka pylasta – gcp pył ilasty – pli ił – i ił pylasty – ip

*WOD – woda ogólnie dostępna

Źródło: Ślusarczyk, 1979 (33)

Mapa kategorii podatności gleb na suszę rolniczą dostępna jest na stronie internetowej (14) stworzonej na potrzeby SMSR (rys. 2).



Rys. 2. Interfejs użytkownika mapy internetowej dotyczącej kategorii podatności gleb na suszę
Źródło: <http://www.susza.iung.pulawy.pl/mapa-kategorii/> (14)

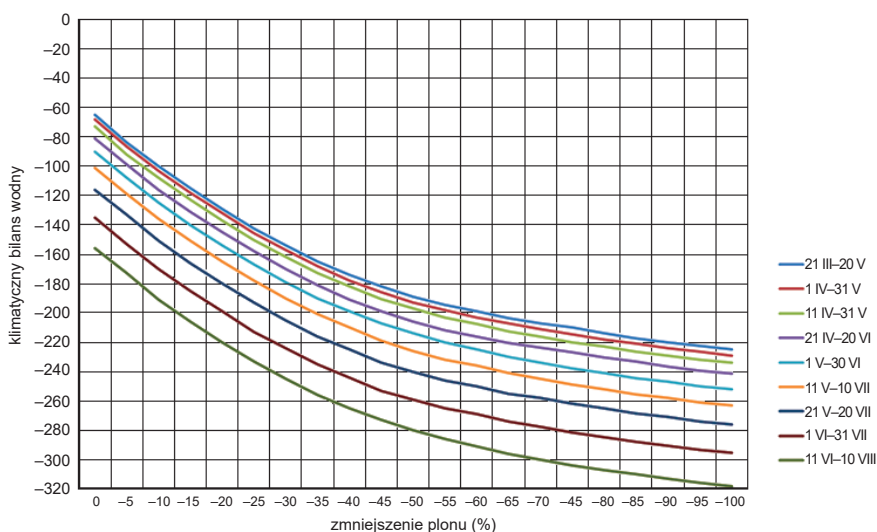
W ocenie wystąpienia suszy rolniczej ważną cechą jest określenie zmniejszenia plonu. IUNG-PIB w Puławach opracował wartości krytyczne KBW powodujące zmniejszenie plonów dla następujących grup i gatunków roślin:

- ✓ zbóż ozimych;
- ✓ zbóż jarych;
- ✓ kukurydzy na ziarno;
- ✓ kukurydzy na kiszonkę;

- ✓ rzepaku i rzepiku;
- ✓ ziemniaka;
- ✓ buraka cukrowego;
- ✓ chmielu;
- ✓ tytoniu;
- ✓ warzyw gruntowych;
- ✓ drzew i krzewów owocowych;
- ✓ truskawek;
- ✓ roślin strączkowych.

Wartości krytyczne KBW dla poszczególnych grup gatunków roślin uprawnych z uwzględnieniem kategorii gleb i okresów w rozwoju roślin są zawarte w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi w sprawie wartości KBW dla poszczególnych gatunków roślin i gleb (30). Progowe wartości KBW są prezentowane na stronie internetowej (13). Wystąpienie krytycznej wartości KBW oznacza wystąpienie suszy dla grup i gatunków roślin uprawnych powodującej zmniejszenie plonów w danym roku przynajmniej o 20% w skali gminy w stosunku do plonów uzyskanych w średnich wieloletnich warunkach pogodowych.

IUNG-PIB opracował wartości KBW określające straty w plonach w wyniku niedoborów wody. Obniżki plonów wyznaczono od 0% do 100% strat w wyniku deficytu wody dla monitorowanych 16 grup i gatunków roślin, dla 4 kategorii podatności gleb na suszę oraz dla 14 okresów sześciodekadowych. Przykładowo na rysunku 3 przedstawiono obniżenie plonu zbóż ozimych dla gleb I kategorii podatności na suszę rolniczą w zależności od KBW.



Rys. 3. Zmniejszenie plonu zbóż ozimych dla gleb I kategorii podatności na suszę rolniczą w zależności od KBW

Źródło: opracowanie własne

Omówienie wyników

Dla każdego monitorowanego roku przedstawiono mapy KBW z najniższymi wartościami deficytu wody w okresach sześciodekadowych (rys. 4–20) oraz wielkości strat plonów na tych obszarach.

W okresie od 1 VI do 31 VII 2006 r. (rys. 4) straty plonów wynoszące 100% w wyniku deficytu wody stwierdzono na obszarze Pojezierzy: Wielkopolskiego, Pomorskiego, Słowińskiego, Nizin: Wielkopolskiej, Mazowieckiej oraz na Wyżynie Lubelskiej (KBW: $-240 \div -299$ mm). Straty te wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach:

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Zbóż ozimych; | 7. Tytoniu; |
| 2. Zbóż jarych; | 8. Warzyw gruntowych; |
| 3. Kukurydzy na ziarno; | 9. Krzewów owocowych; |
| 4. Kukurydzy na kiszonkę; | 10. Truskawek; |
| 5. Ziemniaka; | 11. Roślin strączkowych; |
| 6. Chmielu; | 12. Traw. |

Tak duże niedobory wody spowodowały również obniżkę plonów o 100% na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich) w uprawach:

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1. Kukurydzy na ziarno; | 6. Tytoniu; |
| 2. Kukurydzy na kiszonkę; | 7. Warzyw gruntowych; |
| 3. Ziemniaka; | 8. Krzewów owocowych; |
| 4. Burka cukrowego; | 9. Roślin strączkowych; |
| 5. Chmielu; | 10. Traw. |

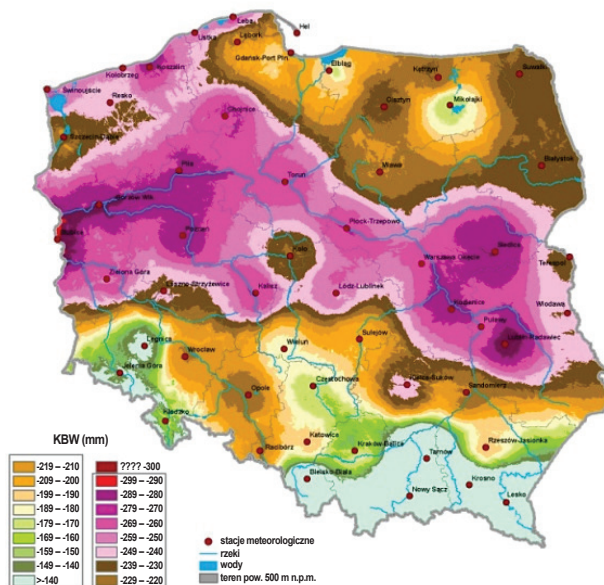
Straty plonów o 100% w wyniku suszy notowano także wśród upraw zlokalizowanych na glebach III kategorii podatności na suszę (średnich):

1. Tytoniu;
2. Warzyw gruntowych;
3. Traw.

Obniżkę plonów o 100% notowano nawet w uprawach na glebach najbardziej odpornych na suszę – IV kategorii, wśród:

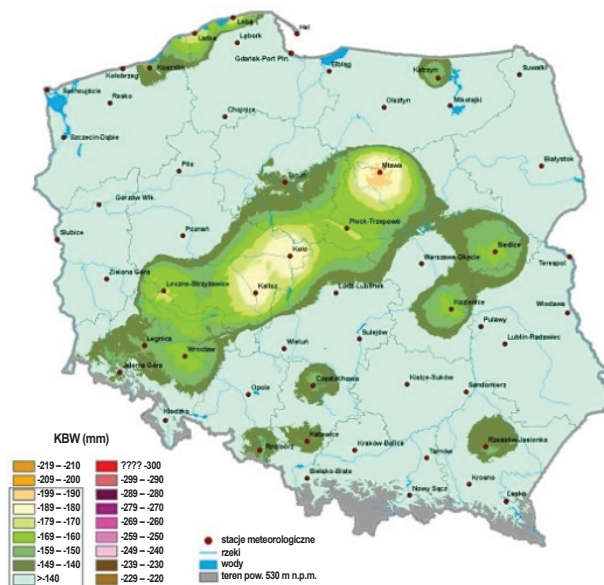
1. Tytoniu;
2. Traw.

W okresie od 21 IV do 20 VII 2007 r. największe straty plonów w wyniku niedoborów wody odnotowano na Wzniesieniach Mławskich wynoszące 55% dla zbóż jarych uprawianych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) (rys. 5).



Rys. 4. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 VI do 31 VII 2006 r.
 (minimalna wartość $-290 \div -299$ mm)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 21 IV do 20 VII 2007 r.
 (minimalna wartość $-190 \div -199$ mm)

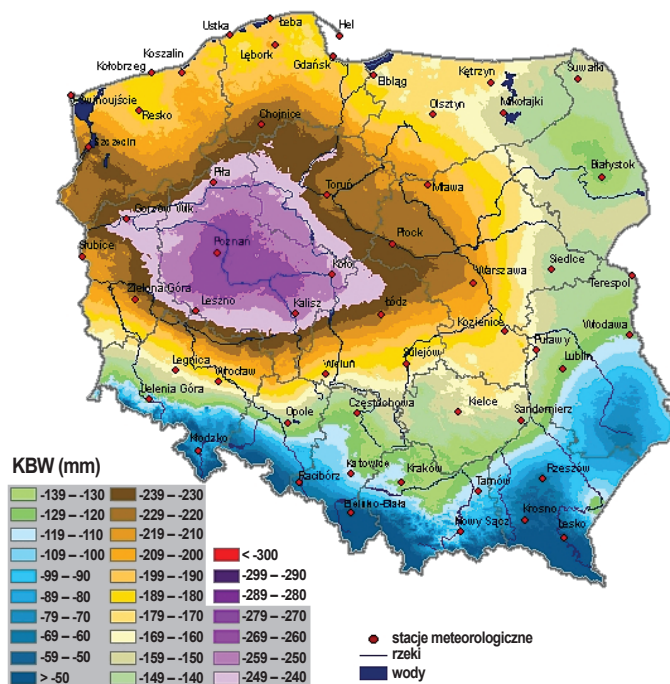
Źródło: opracowanie własne

W okresie od 11 V do 10 VII 2008 r. straty plonów w wyniku deficytu wody na obszarze Pojezierza Wielkopolskiego oraz Niziny Wielkopolskiej wynosiły 100% (rys. 6). Straty wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach:

1. Zbóż ozimych;
2. Zbóż jarych;
3. Kukurydzy na ziarno;
4. Kukurydzy na kiszonkę;
5. Rzepaku i rzepiku;
6. Tytoniu;
7. Warzyw gruntowych;
8. Krzewów owocowych;
9. Roślin strączkowych;
10. Traw.

Deficyt wody spowodował zmniejszenie plonów o 100% również na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich) w uprawach:

1. Zbóż jarych;
2. Rzepaku i rzepiku;
3. Tytoniu;
4. Traw.

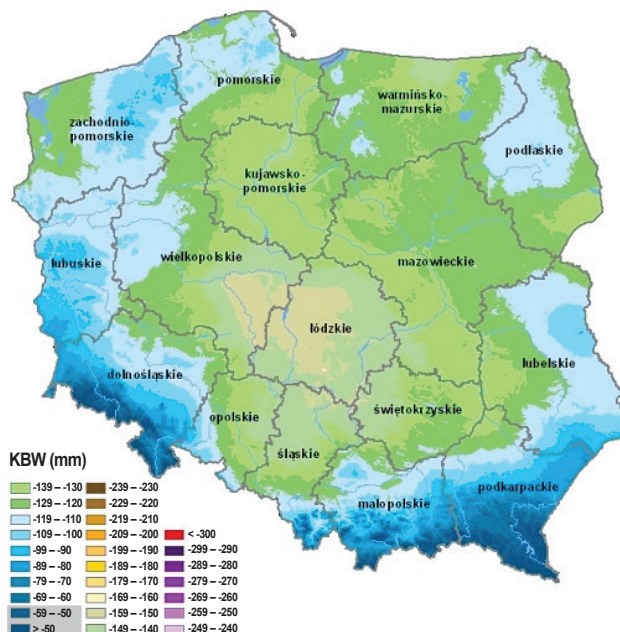


Rys. 6. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 11 V do 10 VII 2008 r.
(minimalna wartość $-260 \div -269$ mm)

Źródło: opracowanie własne

W okresie od 1 IV do 31 V 2009 r. największe straty plonów w wyniku deficytu wody odnotowano na Wysoczyznach Tureckiej i Łaskiej. Wynosiły one 30% w upra-

wach zbóż ozimych i jarych oraz truskawek zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) (rys. 7).



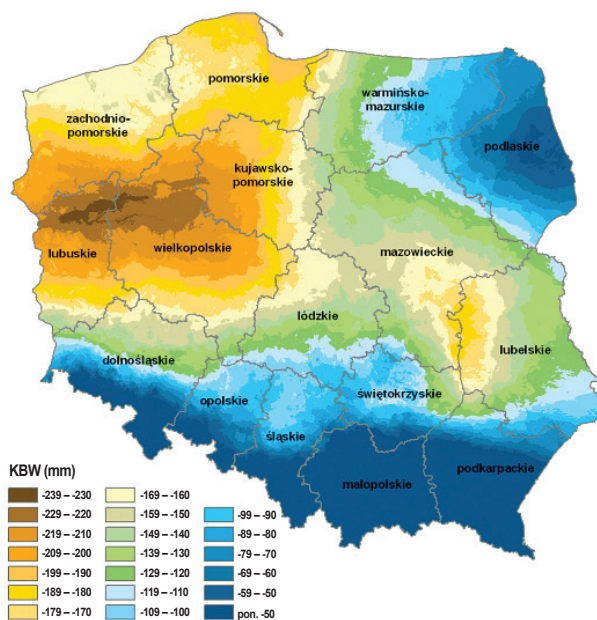
Rys. 7. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 IV do 31 V 2009 r.
(minimalna wartość $-150 \div -159$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W 2010 r. w okresie od 21 V do 20 VII straty plonów wynoszące 100% w wyniku deficytu wody wystąpiły na terenie Kotliny Gorzowskiej. Tej wielkości straty notowano na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach traw zlokalizowanych na glebach mineralnych (rys. 8).

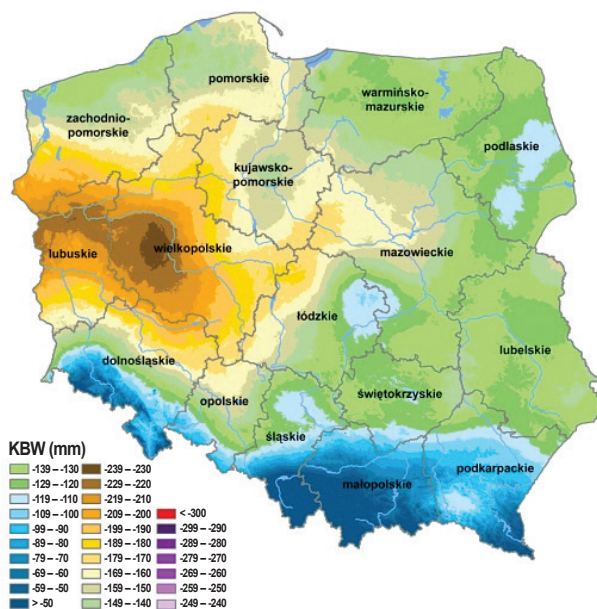
W 2011 r. w okresie od 21 IV do 20 VI odnotowano obniżenie plonów o 100% w wyniku niedoborów wody w okolicach Poznania. Straty o tej wielkości wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach traw zlokalizowanych na glebach mineralnych (rys. 9).

W 2012 r. w okresie od 1 IV do 31 V największe straty w wyniku deficytu wody odnotowano na Wysoczyźnie Kłodawskiej, wynoszące 30% plonów w uprawach zbóż ozimych i jarych oraz truskawek zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 10).



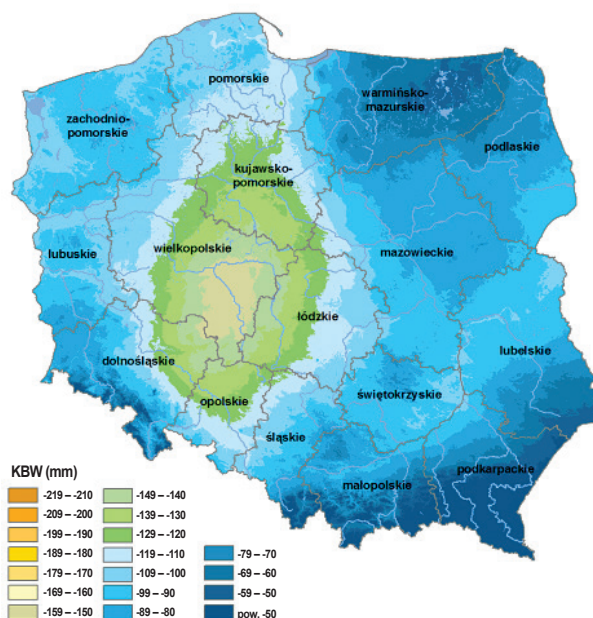
Rys. 8. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 21 V do 20 VII 2010 r.
(minimalna wartość $-230 \div -239$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 9. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 21 IV do 20 VI 2011 r.
(minimalna wartość $-230 \div -239$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 10. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 IV do 31 V 2012 r.
(minimalna wartość $-150 \div -159$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

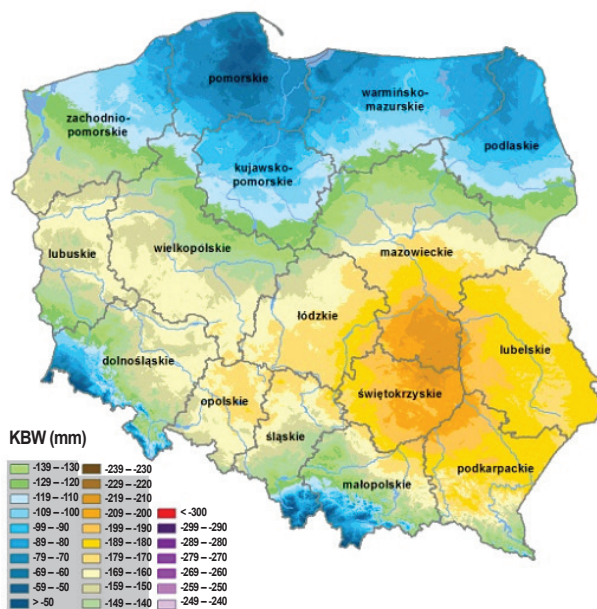
W 2013 r. w okresie od 1 VII do 31 VIII największe straty w wyniku niedoborów wody odnotowano na terytorium Równin Kozienickiej i Radomskiej oraz Przedgórze Iłżeckiego, wynoszące 55% plonów w uprawach traw zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 11).

W 2014 r. w okresie od 21 VI do 20 VIII największe straty plonów w wyniku niedoborów wody odnotowano na terytorium Równiny Inowrocławskiej oraz Kotliny Toruńskiej, wynoszące 30% w uprawach traw zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 12).

W 2015 r. w okresie od 1 VII do 31 VIII 2008 r. straty plonów w wyniku deficytu wody odnotowano na obszarze Nizin Mazowieckiej i Wielkopolskiej oraz na Polesiu Lubelskim; wynosiły one 100%. Wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach:

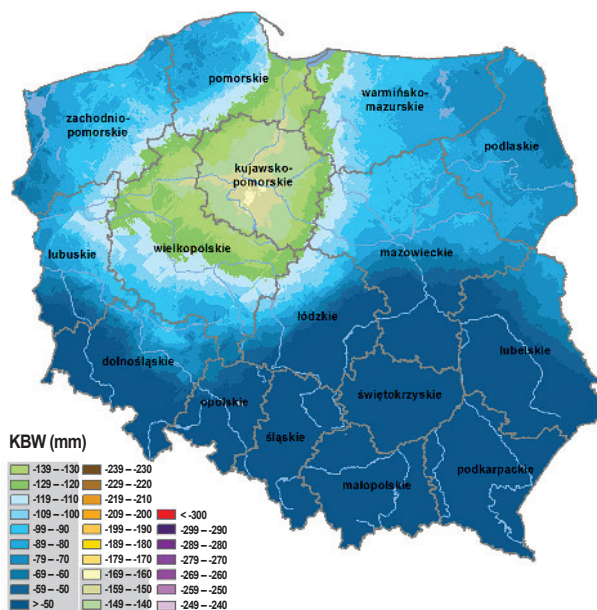
1. Kukurydzy na ziarno;
2. Kukurydzy na kiszonkę;
3. Ziemniaka;
4. Chmielu;
5. Warzyw gruntowych;
6. Krzewów owocowych;
7. Traw.

Deficyt wody spowodował zmniejszenie plonów o 100% również na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich) w uprawach ziemniaka (rys. 13).



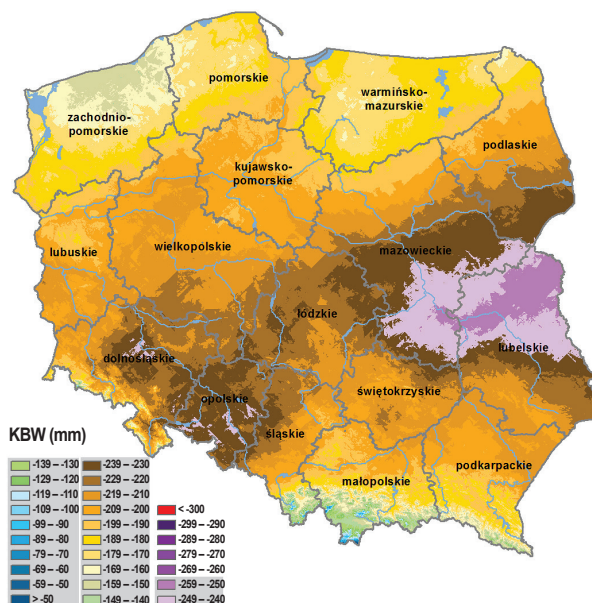
Rys. 11. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 VII do 31 VIII 2013 r.
(minimalna wartość $-210 \div -219$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 12. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 21 VI do 20 VIII 2014 r. (minimalna wartość $-160 \div -169$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 13. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 VII do 31 VIII 2015 r.
(minimalna wartość $-250 \div -259$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W 2016 r. w okresie od 1 V do 30 VI największe straty w wyniku niedoborów wody odnotowano na Wysoczyznach Łaskiej i Tureckiej oraz w południowych rejonach Niziny Mazowieckiej; wynosiły 35% plonów w uprawach rzepaku i rzepiku zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 14).

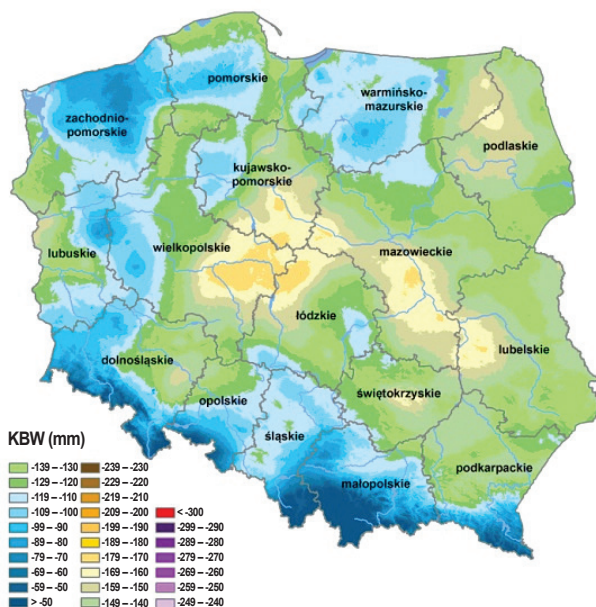
W 2017 r. w okresie od 11 V do 10 VII największe straty w wyniku niedoborów wody odnotowano na Równinie Łęczyńsko-Włodawskiej oraz na Obniżeniach Dubieńskich, które wynosiły 80% plonów w uprawach rzepaku i rzepiku zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 15).

W okresie od 11 V do 10 VII 2018 r. odnotowano duże straty w wyniku deficytu wody na obszarze Pojezierza Poznańskiego, Wysoczyzny Żarnowieckiej oraz na Wybrzeżu Trzebiatowskim, które wynosiły 100% plonów (rys. 16). Straty wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach:

1. Zbóż ozimych;
2. Zbóż jarych;
3. Kukurydzy na ziarno;
4. Kukurydzy na kiszonkę;
5. Rzepaku i rzepiku;
6. Tytoniu;
7. Warzyw gruntowych;
8. Krzewów owocowych;
9. Roślin strączkowych;
10. Traw.

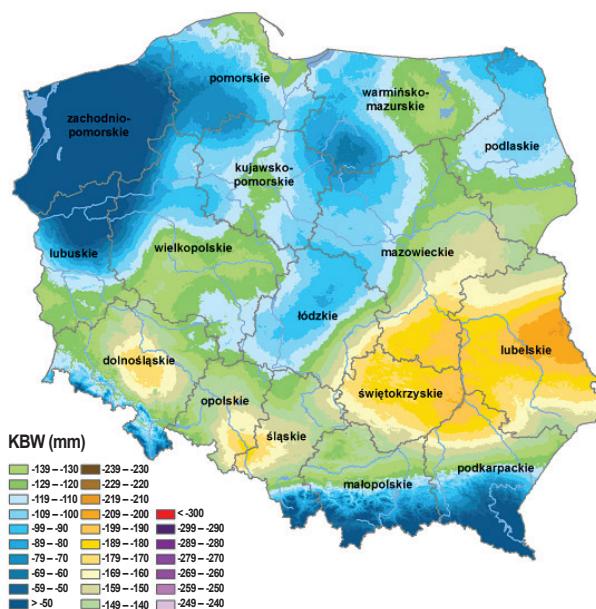
Deficyt wody spowodował zmniejszenie plonów o 100% również na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich) w uprawach:

1. Zbóż jarych;
2. Rzepaku i rzepiku;
3. Traw.



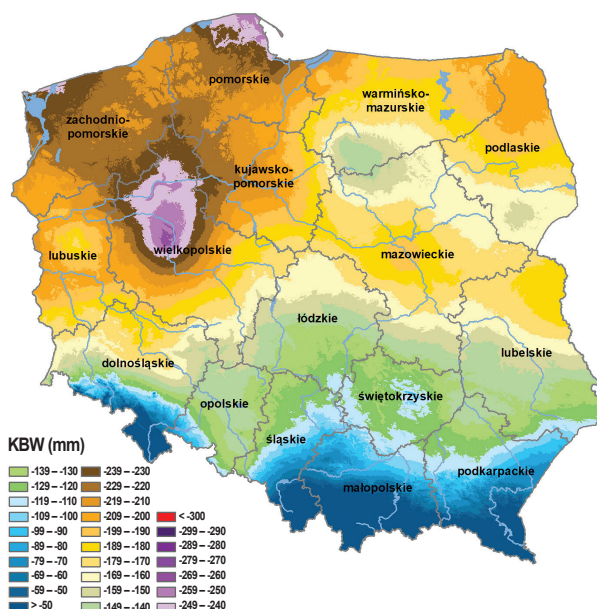
Rys. 14. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 V do 30 VI 2016 r.
(minimalna wartość $-170 \div -179$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 15. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 11 V do 10 VII 2017 r.
(minimalna wartość $-210 \div -219$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



Rys. 16. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 11 V do 10 VII 2018 r.
(minimalna wartość $-260 \div -269$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W 2019 r. w okresie od 1 VI do 31 VII odnotowano duże straty w wyniku deficytu wody na obszarze zachodniej części Pojezierza Wielkopolskiego, na Wysoczyźnie Łaskiej oraz na Równinie Opolskiej; wynosiły 100% plonów (rys. 17). Straty wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) w uprawach:

1. Kukurydzy na ziarno;
2. Kukurydzy na kiszonkę;
3. Ziemniaka;
4. Chmielu;
5. Tytoniu;
6. Warzyw gruntowych;
7. Krzewów owocowych;
8. Roślin strączkowych;
9. Traw.

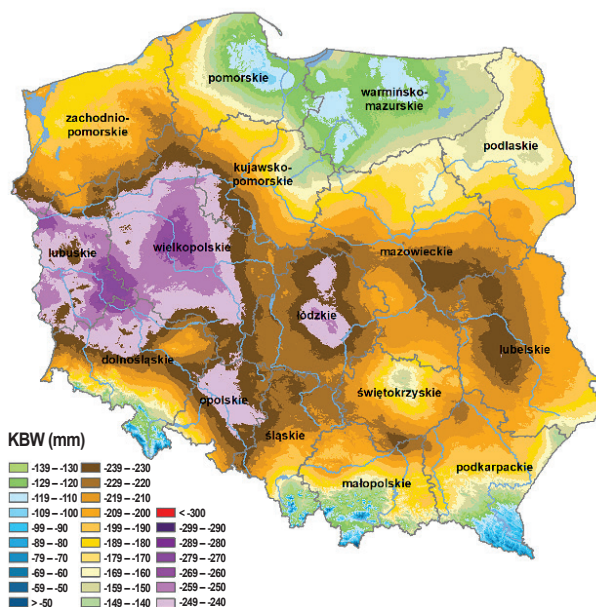
Deficyt wody spowodował także zmniejszenie plonów o 100% również na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich) w uprawach:

1. Tytoniu;
2. Warzyw gruntowych;
3. Traw.

Występujące niedobory wody spowodowały zmniejszenie plonów o 100% w wyniku suszy również wśród upraw traw zlokalizowanych na glebach III kategorii podatności na suszę (średnich).

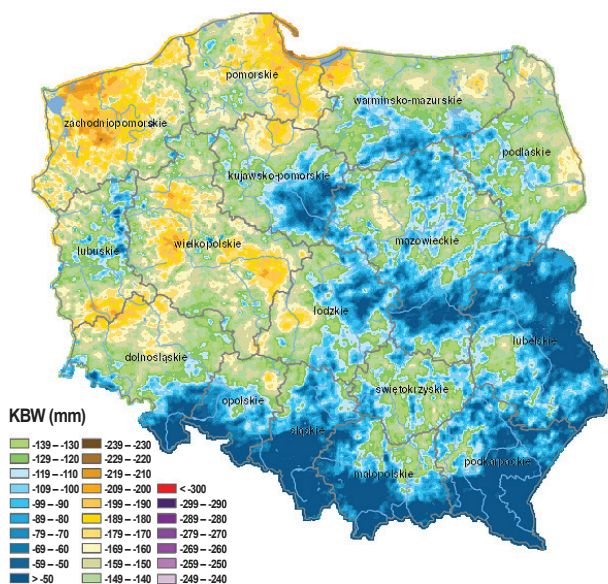
W 2020 r. w okresie od 21 VI do 20 VIII największy deficyt wody odnotowano na terenie Pobrzeża Szczecińskiego (Uznam, Wolin, Równin: Wkrzańska, Wełyńska, Pyrzycka, Wzgórze Bukowe), Pobrzeża Kaszubskiego oraz na Żuławach Wiślanych.

Straty w wyniku niedoborów wody wynosiły 65% plonów w uprawach traw zlokalizowanych na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą (rys. 18).



Rys. 17. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 VI do 31 VII 2019 r.
(minimalna wartość $-270 \div -279$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)



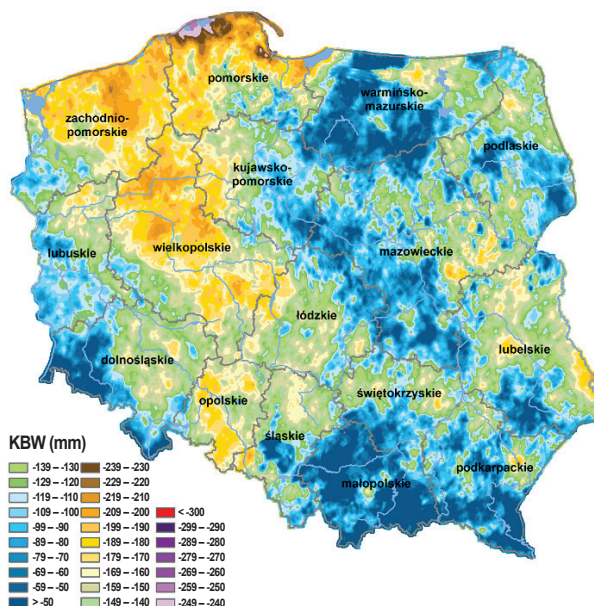
Rys. 18. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 21 VI do 20 VIII 2020 r.
(minimalna wartość $-210 \div -219$ mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W 2021 r. w okresie od 1 VI do 31 VII odnotowano duże straty w wyniku deficytu wody na obszarze środkowej części Wybrzeża Słowińskiego; wynosiły 100% pło-
nów (rys. 19). Straty wystąpiły na glebach I kategorii podatności na suszę rolniczą
w uprawach:

1. Kukurydzy na ziarno;
2. Kukurydzy na kiszonkę;
3. Chmielu;
4. Tytoniu;
5. Warzyw gruntowych;
6. Krzewów owocowych;
7. Traw.

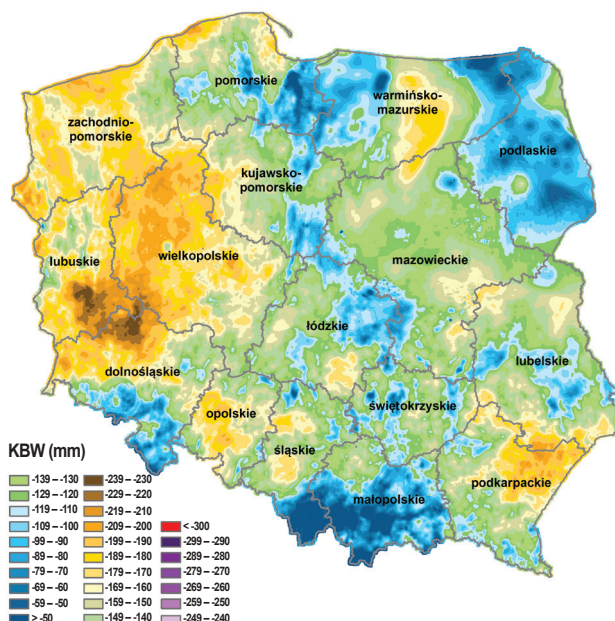
Deficyt wody na tych terenach spowodował zmniejszenie pło-
nów traw o 100%
również na glebach II kategorii podatności na suszę rolniczą (lekkich).



Rys. 19. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 1 VI do 31 VII 2021 r.
(minimalna wartość –250 ÷ –259 mm)

Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W 2022 r. w okresie od 11 VI do 10 VIII największy deficyty wody notowano na terenie Wału Trzebnickiego i Lubuskiego Przełomu Odry. Straty pło-
nów w wyniku
deficytu wody na tym terenie wynosiły 90% wśród traw uprawianych na glebach
I kategorii podatności na suszę rolniczą (bardzo lekkich) (rys. 20).



Rys. 20. Klimatyczny bilans wodny (KBW) w okresie od 11 VI do 10 VIII 2022 r.
(minimalna wartość $-230 \div -239$ mm)

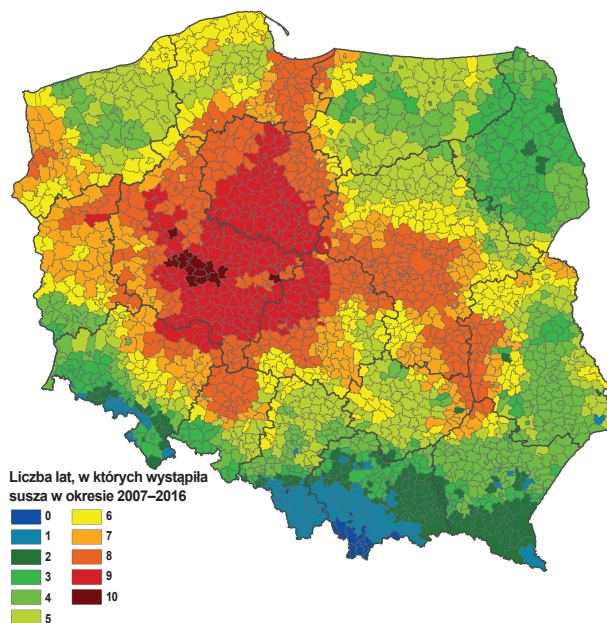
Źródło: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/> (13)

W latach 2007 i 2008 wyznaczano straty z powodu niedoborów wody jako 15% obniżenie plonów, natomiast z uwagi na zmieniające się kryteria oceny wystąpienia suszy zaistniała potrzeba ponownego przeliczenia strat na obecnie obowiązujące 20% w stosunku do plonów uzyskiwanych w przeciętnych warunkach pogodowych (30). Takie podejście zapewniło porównywalność danych z poszczególnych lat.

Na poniższych mapach (rys. 21–24) zaprezentowano wskaźniki występowania suszy w gminach: liczbę lat, w których wystąpiła susza oraz czas jej trwania liczony jako udział procentowy okresów sześciodekadowych, w których stwierdzono niedobory wody w stosunku do wszystkich raportowanych okresów (rys. 25–28). Dane zestawiono w okresach 10-letnich, co dwa lata, czyli: 2007–2016, 2009–2018, 2011–2020, 2013–2022.

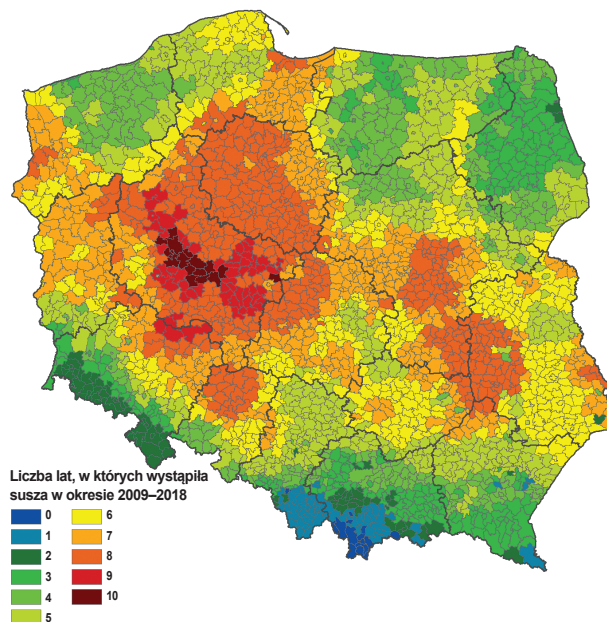
Suszę odnotowano na prawie całym obszarze Polski. Najmniej zagrożone obszary występowały na terenach górskich i podgórskich, gdzie w ogóle nie odnotowano suszy lub występowała 1–2 razy w ciągu 10 lat.

W dwóch pierwszych analizowanych okresach: 2007–2016 oraz 2009–2018 (rys. 21, 22), susza najczęściej (nawet co roku) występowała w środkowej Polsce, głównie w województwie wielkopolskim. W województwach: kujawsko-pomorskim, łódzkim, dolnośląskim, lubuskim oraz mazowieckim odnotowano ją 9 razy na 10 lat. Tylko nieco rzadziej (w ośmiu latach) występowała na terenie województw: pomorskiego, zachodniopomorskiego, lubelskiego, opolskiego oraz świętokrzyskiego.



Rys. 21. Liczba lat, w których wystąpiła susza w okresie 2007–2016

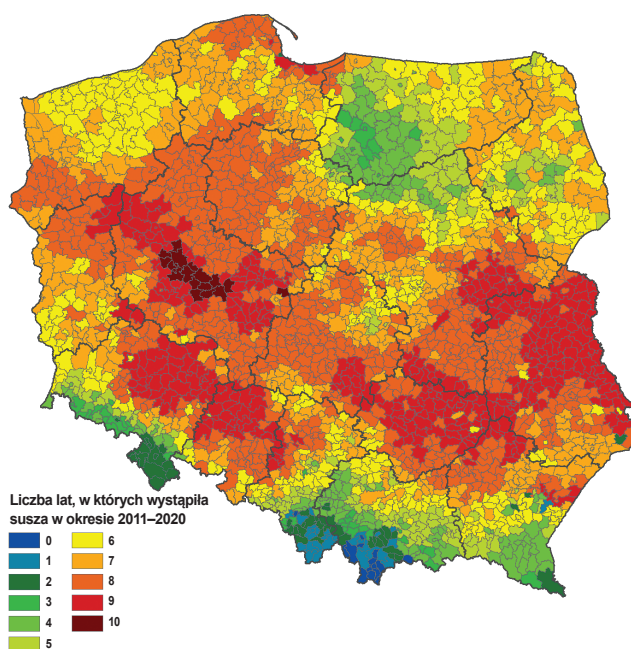
Źródło: opracowanie własne



Rys. 22. Liczba lat, w których wystąpiła susza w okresie 2009–2018

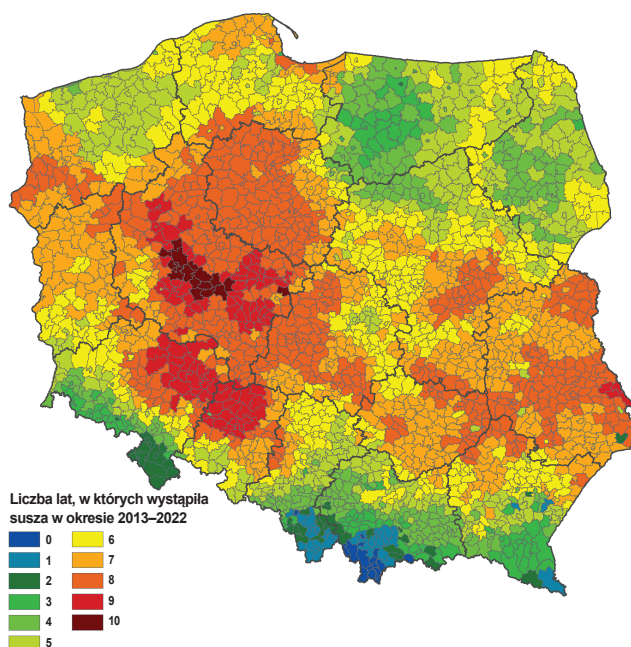
Źródło: opracowanie własne

Analiza kolejnych lat: 2011–2020 oraz 2013–2022, wskazuje na wyraźne zwiększenie częstotliwości występowania suszy na terenie całego kraju (rys. 23, 24). Najbardziej widoczne jest to w województwach lubelskim i świętokrzyskim, gdzie na większości obszaru w tych województwach w latach 2007–2016 susza występowała tylko 4–5 razy na 10 lat, systematycznie zwiększając tę częstotliwość do 8–9 na 10 lat w okresie 2013–2022 r. Wyraźny wzrost częstości występowania suszy widoczny jest również w województwach: podlaskim, podkarpackim, zachodniopomorskim, pomorskim, lubuskim oraz dolnośląskim.



Rys. 23. Liczba lat, w których wystąpiła susza w okresie 2011–2020

Źródło: opracowanie własne



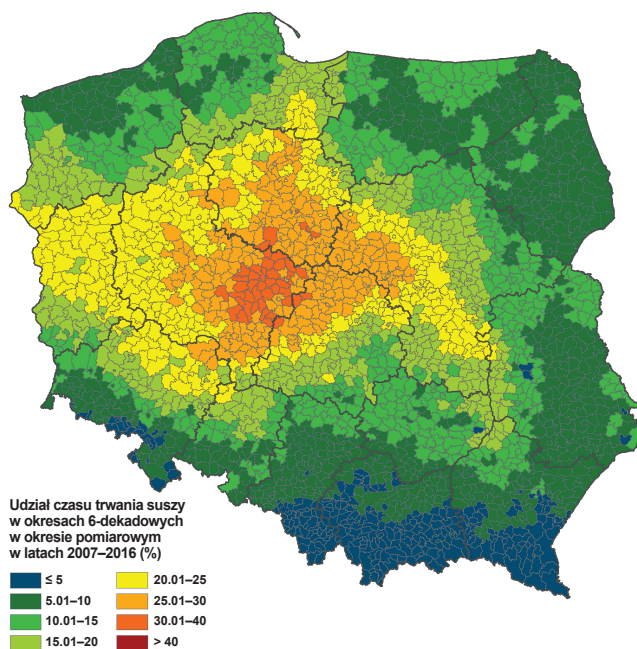
Rys. 24. Liczba lat, w których wystąpiła susza w okresie 2013–2022

Źródło: opracowanie własne

Przedstawiony powyżej wskaźnik występowania suszy w ujęciu rocznym informuje o wystąpieniu suszy w danym roku, jednak może ona być krótkotrwała i dotyczyć tylko niektórych upraw.

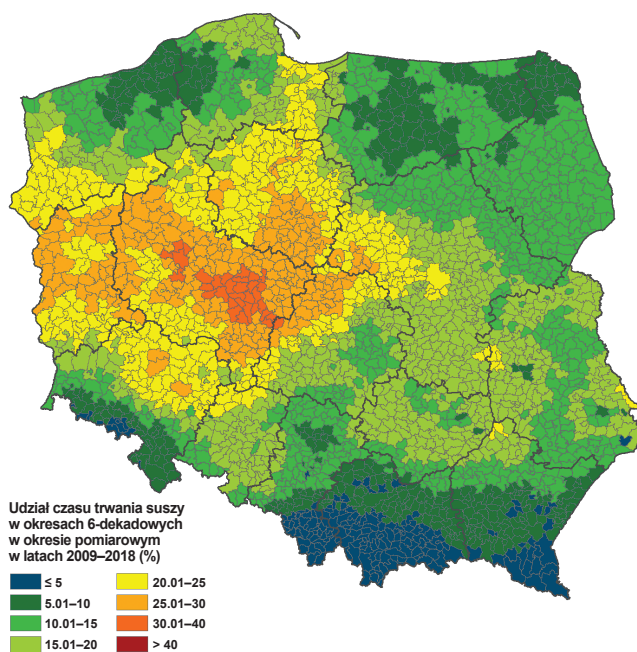
Drugi wskaźnik prezentowany za pomocą map dotyczy czasu trwania suszy (rys. 25–28). Wskazuje on na możliwość objęcia nią większej liczby upraw. W latach 2007–2016 oraz 2009–2018 (rys. 25, 26) obszarami o największej częstotliwości występowania suszy były Wielkopolska i Kujawy, gdzie notowano ją od 20 do maksymalnie 40% w raportowanych okresach sześciodekadowych. Natomiast lata 2011–2020 oraz 2013–2022 (rys. 27, 28) wskazują na wyraźne zwiększenie długości trwania suszy. W Wielkopolsce udział czasu trwania suszy zwiększył się z 20–30% do 30–40% i powyżej 40% na całym obszarze tego regionu. Czas trwania suszy zdecydowanie wydłużył się w zachodniej Polsce (woj. zachodniopomorskie, lubuskie, dolnośląskie), w latach 2007–2016 udział okresów sześciodekadowych wynosił w granicach od 5 do 15%, a w okresie 2013–2022 już powyżej 30%. Należy też zaznaczyć, że również w województwach lubelskim i świętokrzyskim czas trwania suszy znacznie wzrósł, z 5–15% do 15–30%.

Poza tym obszary o najkrótszym okresie występowania suszy (na południu Polski), które notowane są zwłaszcza w województwach małopolskim i podkarpackim, ulegają wyraźnemu zmniejszeniu.



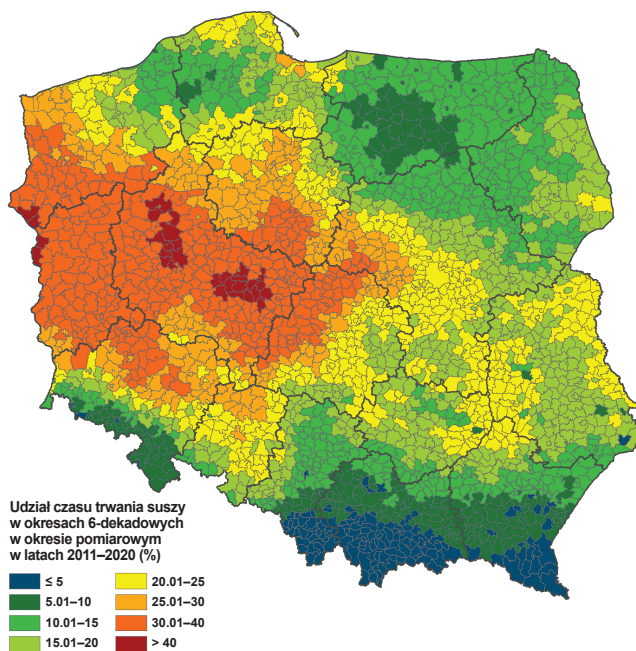
Rys. 25. Czas trwania suszy w okresach sześciodekadowych w okresie 2007–2016

Źródło: opracowanie własne



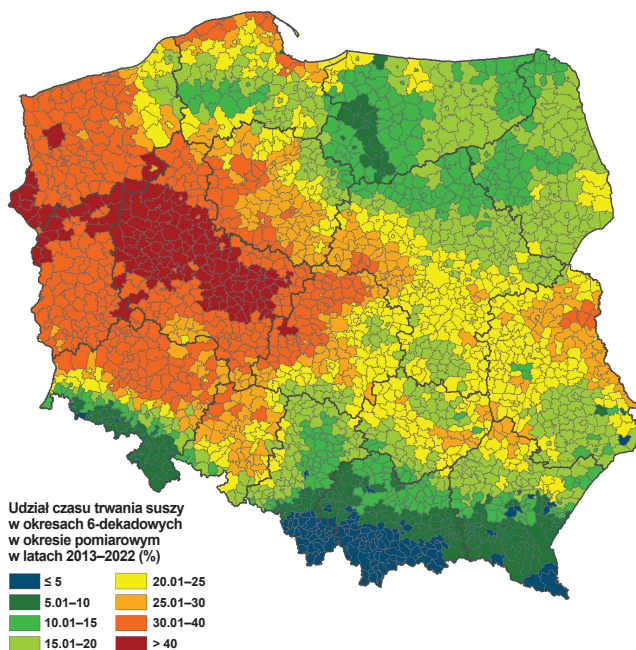
Rys. 26. Czas trwania suszy w okresach sześciodekadowych w okresie 2009–2018

Źródło: opracowanie własne



Rys. 27. Czas trwania suszy w okresach sześciodekadowych w okresie 2011–2020

Źródło: opracowanie własne



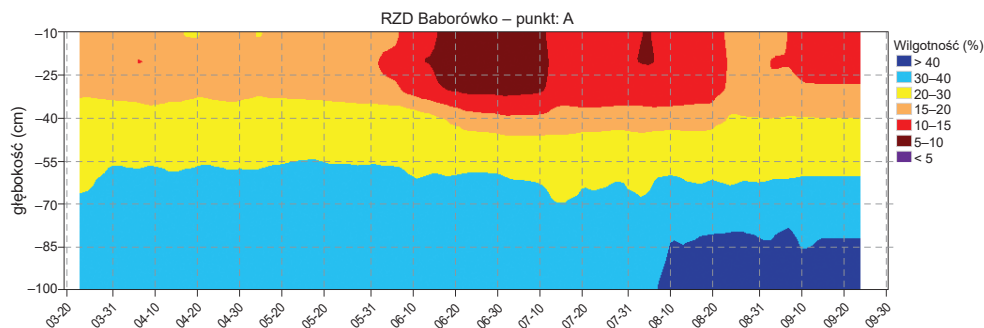
Rys. 28. Czas trwania suszy w okresach sześciodekadowych w okresie 2013–2022

Źródło: opracowanie własne

IUNG-PIB w prowadzonym Systemie dokonał weryfikacji prac związanych z monitoringiem suszy rolniczej. Na obszarze, w którym zanotowano suszę, odnotowano też zmniejszenie plonów według GUS (Główny Urząd Statystyczny) (11, 23). Dane dotyczące plonów uzyskane na podstawie KBW porównywano z danymi przedstawianymi przez GUS (14). Obliczenia dokonano dla 2008 r., w którym odnotowano dużą suszę w skali kraju. Straty plonów dla pszenicy ozimej na poziomie województw były zbieżne ze zmniejszeniem plonów według GUS (11). Wykazano pełną zgodność wyników w przypadku zmniejszenia plonów wyznaczonego za pomocą KBW (z uwzględnieniem podatności gleb na niedobór wody) oraz według GUS (11). Natomiast w 2009 r., w którym nie stwierdzono suszy rolniczej na podstawie KBW, nie stwierdzono również zmniejszenia plonu według GUS (11, 23).

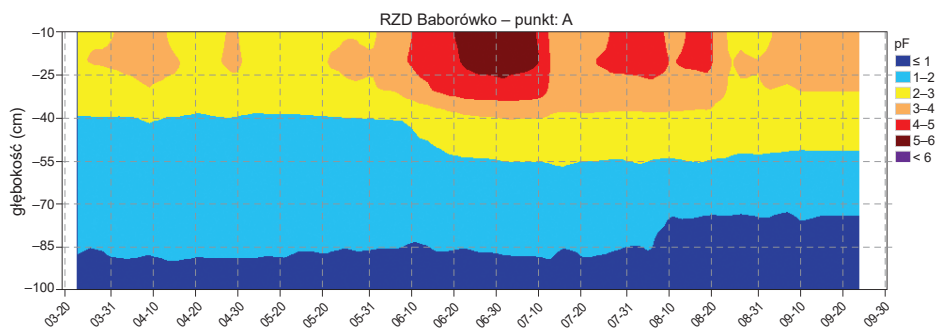
W IUNG-PIB wykonywano przez kilka kolejnych lat loty samolotem mające za zadanie weryfikację wartości KBW za pomocą zdjęć lotniczych oraz naziemnych pomiarów określających stan roślin uprawnych (28). Przeprowadzone badania potwierdziły, że posługiwanie się KBW dobrze odzwierciedla stan upraw w zależności od zasobów wodnych dostępnych dla roślin uprawnych.

SMSR jest weryfikowany również poprzez konfrontację wyników obliczonych na podstawie danych meteorologicznych z pomiarami wilgotności gleby na polach referencyjnych i wynikami bezpośrednich obserwacji łanu roślin. W celu oceny rzeczywistego wpływu suszy na plonowanie roślin prowadzony jest monitoring wilgotności gleby w 20 reprezentatywnych gospodarstwach rolnych w kraju rozmieszczonych głównie w strefie największego niedoboru wody. W każdym gospodarstwie pomiary realizowane są na 3–5 polach referencyjnych rozmieszczonych na glebach o różnej kategorii podatności na suszę i znajdujące się pod różnymi uprawami (rys. 29, 30).



Rys. 29. Uwilgotnienie profilu glebowego
(gospodarstwo referencyjne RZD IUNG-PIB Baborówko, rzepak ozimy, 2021 rok)

Źródło: www.susza.iung.pulawy (18)



Rys. 30. Dostęp do wody w glebie, wartości siły ssącej (pF)
(gospodarstwo referencyjne RZD IUNG-PIB Baborówko, rzepak ozimy, 2021 rok)

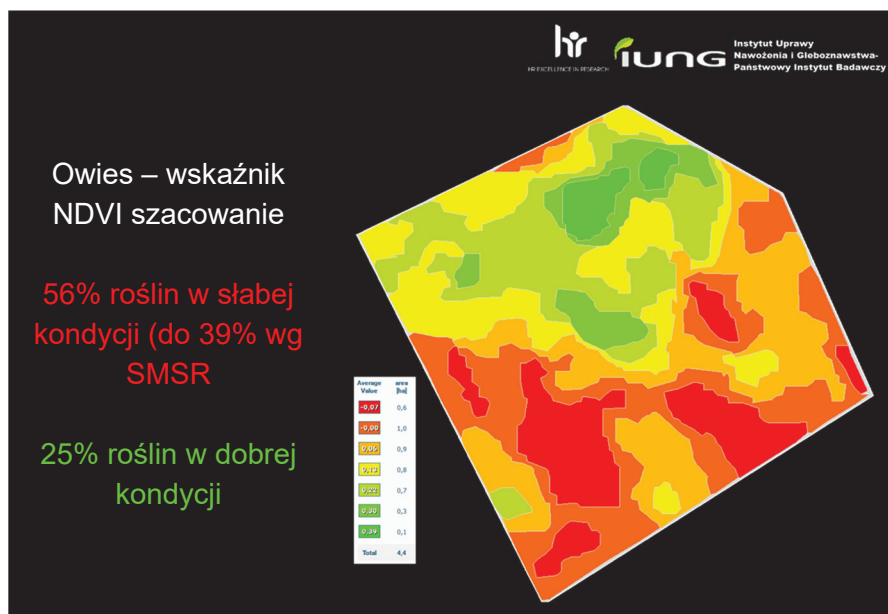
Źródło: www.susza.iung.pulawy.pl (18)

Prowadzona jest także weryfikacja wystąpienia suszy rolniczej za pomocą bezzałogowych statków powietrznych (BST, dronów) (rys. 31, 32)



Rys. 31. Szacowanie strat w plonie owsa – ortofotomapa (gmina Sianów, woj. zachodniopomorskie)

Źródło: opracowanie własne



cd. tab. 6

Rok	Liczba gmin	% gmin	Grunty orne (%)	Grunty orne (tys. ha)	Liczba okresów 6-dekadowych	Liczba upraw	Uprawy z suszą w okresie wegetacyjnym
2007	930	30,4	15,1	2 279	5	7	zboża jare* i ozime, rośliny strączkowe, rzepak i rzepik, truskawki, tytoń, warzywa gruntowe (15% strat plonów)
2008	2 091	68,4	57,9	8 185	8	13	zboża jare* i ozime, burak cukrowy, chmiel, rośliny strączkowe, rzepak i rzepik, truskawki, tytoń, warzywa gruntowe, ziemniak, kukurydza, drzewa i krzewy owocowe (15% strat plonów)
2009	1 303	42,5	11,6	1 641	4	6	krzewy* i drzewa owocowe, zboża ozime i jare, truskawki, rośliny strączkowe (20% strat plonów)
2010	390	12,7	4,0	566	4	10	krzewy* i drzewa owocowe, zboża ozime i jare, ziemniak, chmiel, tytoń, warzywa gruntowe, truskawki, rośliny strączkowe (20% strat plonów)
2011	900	40,9	24,4	3 461	4	5	zboża jare* i ozime, drzewa i krzewy owocowe, truskawki (20% strat plonów)
2012	214	7,0	2,7	378	2	5	krzewy* i drzewa owocowe, zboża ozime i jare, truskawki (20% strat plonów)
2013	1 993	65,0	26,6	3 774	2	9	rośliny strączkowe*, ziemniak, krzewy owocowe, chmiel, tytoń, kukurydza na kiszonkę, warzywa gruntowe, burak cukrowy, drzewa owocowe (20% strat plonów)
2014	335	10,9	2,5	355	3	3	rośliny strączkowe*, ziemniak, krzewy owocowe (20% strat plonów)
2015	3 037	99,1	79,0	10 916	10	14	rośliny strączkowe*, zboża jare i ozime, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, rzepak i rzepik, warzywa gruntowe, tytoń, ziemniak, chmiel, burak cukrowy, kukurydza na kiszonkę i ziarno (20% strat plonów)
2016	472	19,0	4,2	457	7	9	zboża jare* i ozime, krzewy owocowe, truskawki, rośliny strączkowe, rzepak i rzepik, burak cukrowy, kukurydza na kiszonkę i ziarno (20% strat plonów)

cd. tab. 6

Rok	Liczba gmin	% gmin	Grunty orne (%)	Grunty orne (tys. ha)	Liczba okresów 6-dekadowych	Liczba upraw	Uprawy z suszą w okresie wegetacyjnym
2017	548	22,1	4,1	457	4	11	rzepak i rzepik, zboża jare i ozime, rośliny strączkowe, krzewy owocowe, truskawki, tytoń, warzywa gruntowe, kukurydza na kiszonkę i ziarno, ziemniak (20% strat plonów)
2018	2 287	94,0	70,3	10 078	13	14	zboża jare* i ozime, rośliny strączkowe*, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, rzepak i rzepik, warzywa gruntowe, tytoń, ziemniak, chmiel, burak cukrowy, kukurydza na kiszonkę i ziarno (20% strat plonów)
2019	2 233	90,2	61,8	10 302	14	14	warzywa gruntowe*, kukurydza na kiszonkę* i ziarno*, zboża jare i ozime, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, rośliny strączkowych, rzepak i rzepik, tytoń, ziemniak, chmiel, burak cukrowy (20% strat plonów)
2020	1 024	41,3	12,2	1 663	14	14	zboża jare* i ozime, kukurydza na kiszonkę* i ziarno, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, rośliny strączkowe, rzepak i rzepik, warzywa gruntowe, tytoń, ziemniak, chmiel, burak cukrowy (20% strat plonów)
2021	1 212	48,9	14,3	1 945	11	14	rzepak i rzepik*, zboża jare i ozime, rośliny strączkowe, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, tytoń, warzywa gruntowe, kukurydza na kiszonkę i ziarno, ziemniak, chmiel, burak cukrowy (20% strat plonów)
2022	2 096	84,6	38,2	5 182	13	14	zboża jare* i ozime, krzewy i drzewa owocowe, truskawki, rośliny strączkowe, rzepak i rzepik, warzywa gruntowe, tytoń, ziemniak, chmiel, burak cukrowy, kukurydza na kiszonkę i ziarno (20% strat plonów)

*dotyczy upraw, których susza osiągnęła największy zasięg

Źródło: opracowanie własne

Wszystkie wyniki dotyczące występowania suszy rolniczej w okresie wegetacyjnym co 10 dni, od 20 maja do 30 września, dla każdej gminy w kraju (2477 gmin), dla 14 grup i gatunków roślin oraz 4 kategorii glebowych zamieszczane są w Internecie (12). Prezentacja wyników prowadzona jest w postaci 14 raportów w okresie wegetacyjnym obejmujących:

- Komentarz agrometeorologa – zawierający opis sytuacji meteorologicznej panującej w każdym okresie sześciodekadowym oraz aktualny stan zagrożenia suszą rolniczą.
- Mapy – prezentujące zagrożenia suszą dla Polski dla poszczególnych grup roślin uprawnych w poszczególnych okresach raportowania.
- Tabele – przedstawiające szczegółowe zestawienie informacji o zagrożeniu suszą we wszystkich gminach i województwach Polski. W tabeli wielostopniowej z rozwijalnym poziomem szczegółowości (województwo, powiat, gmina) podawane są informacje dla kolejnych sześciodekadowych okresów raportowania. Na poziomie gminy tabela zawiera szczegółową informację o zagrożeniu suszą z podziałem na kategorie glebowe i poszczególne gatunki roślin uprawnych oraz informacje o procentowym udziale gleb zagrożonych suszą. Taka konstrukcja tabeli pozwala na prześledzenie sytuacji o zagrożeniu suszą w wybranej gminie w poszczególnych okresach raportowania.

Literatura

1. Chmura A., Chylińska E., Dmowski Z., Nowak L.: Rola czynnika wodnego w kształtowaniu plonu wybranych roślin polowych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. 2009, 9: 33-44.
2. Demidowicz G., Doroszewski A., Górski T.: Wpływ niedoboru opadów na straty w produkcji ziemniaka i buraka cukrowego. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*, 1996, **438**: 43-52.
3. Demidowicz G., Doroszewski A., Górski T.: Metodyka szacunku strat w produkcji roślinnej powodowanych deficytem opadów. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 1997, **CCXCI**: 233-243.
4. Doroszewski A., Demidowicz G., Górski T.: Wpływ niedoboru opadów na straty w produkcji zbóż jarych w Polsce. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 1997, **CCXCI**: 223-231.
5. Doroszewski A., Jadczyński J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopata A., Koza P., Górski T., Wróblewska E.: Podstawy Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej. *Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie*, 2012, (IV-VI), t. 12, **2(38)**: 77-91.
6. Doroszewski A., Jóźwicki T., Wróblewska E., Kozyra J.: Susza rolnicza w Polsce w latach 1961–2010. Puławy, IUNG-PIB, 2014, ss. 144, ISBN 978-83-7562-171-6.
7. Doroszewski A., Wróblewska E., Pudełko R., Żyłowska K., Koza P., Nieróbca A.: Krajowy system monitoringu suszy rolniczej jego podstawy metodyczne i możliwości wykorzystania. W: *Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie*, W. Dembek, J. Kuś, M. Wiatkowski, G. Żurek (red.). Brwinów 2006, ss. 105-128.
8. Farat R., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczyk P., Mager P.: Susze na obszarze Polski w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze IMGW, Gospodarka Wodna i Ochrona Wód*, 1995, **16**: 1-141.

9. G ó r s k i T.: Zmiany warunków agroklimatycznych i długość okresu wegetacji roślin w ostatnim stuleciu. W: Długookresowe przemiany krajobrazu Polski w wyniku zmian klimatu i użytkowania ziemi, M. Gutry-Korycka, A. Kędziora, L. Starkel, L. Ryszkowski (red.). Komitet Narodowy IGBP – Global Change, Poznań 2006, ss. 65-77.
10. G ó r s k i T., Doroszewski A.: Wpływ opadów atmosferycznych na plonowanie ziemniaków w Polsce. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych, 1986, **284**: 369-375.
11. GUS. Produkcja upraw rolnych i ogrodnich w 2008 roku. Warszawa 2009, ss. 154.
12. <http://www.susza.iung.pulawy.pl>
13. <http://www.susza.iung.pulawy.pl/KBW/>
14. <http://www.susza.iung.pulawy.pl/mapa-kategorii/>
15. K a c a E., Ł a b ę d z k i L., L u b b e L.: Gospodarowanie wodą w rolnictwie w obliczu ekstremalnych zjawisk pogodowych. Postępy Nauk Rolniczych, 2011, **1**: 37-49.
16. K a n e c k a-Gesze E., Smarzyńska K.: Ocena suszy meteorologicznej w wybranych regionach agroklimatycznych Polski przy użyciu różnych wskaźników. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, 2007, **6(2)**: 41-50.
17. K a s p r o w i c z T.: Ocieplenie klimatu Polski na przykładzie Poznania, na podstawie występowania najcieplejszych i najchłodniejszych miesięcy , pór roku i lat w wieloleciu 1848–2018. W: Współczesne problemy klimatu Polski, L. Chojnackiej-Ożga i H. Lorenc, IMGW-PIB, seria publikacji naukowo-badawczych IMGW-PIB, Warszawa 2019, ss. 41 -51
18. K o z y r a J., Doroszewski A., Nieróbca A.: Zmiany klimatyczne i ich przewidywany wpływ na rolnictwo w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2009, **14**: 243-257.
19. K o z y r a J., G ó r s k i T.: Wpływ zmian klimatu na uprawę roślin w Polsce. W: Klimat–Środowisko –Człowiek. Wrocław, Polski Klub Ekologiczny, Okręg Dolnośląski, 2004, ss. 41-50.
20. K o z y r a J., G ó r s k i T.: Wpływ zmian klimatycznych na rolnictwo w Polsce. Zmiany klimatu, a rolnictwo i obszary wiejskie. FDPA, 2008, s. 35-40.
21. Kundzewicz Z.: Gdyby mała wody miarka ... Zasoby wodne dla trwałego rozwoju. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000, ss. 195.
22. K u n d z e w i c z Z., K o z y r a J.: Ograniczenie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. Polish Journal of Agronomy, 2011, **7**: 68-81.
23. M i z a k K., Pudełko R., Kozyra J., Nieróbca A., Doroszewski A., Świtaj Ł., Ł opatka A.: Wyniki monitoringu suszy rolniczej w uprawach pszenicy ozimej w Polsce w latach 2008–2010. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2011, **11(2) (34)**: 95-107.
24. Ł a b ę d z k i L.: Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. Woda- Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie, 2006, **17(6)**: 1-107. ISBN 83-88763-63.
25. Ł a b ę d z k i L.: Przewidywane zmiany klimatyczne a rozwój nawodnień w Polsce. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Polska Akademia Nauk, 2009, **3**: 7-18.
26. Ł a b ę d z k i L., Adamski P.: Związek między opadami uprzednimi a uwilgotnieniem gleby w uprawie buraków cukrowych na Kujawach. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2010, **10**, **3(31)**: 165-174.
27. Ł a b ę d z k i L., Bąk B.: Standaryzowany klimatyczny bilans wodny jako wskaźnik suszy Acta Agrophysica, 2004, **3(1)**: 117-124.
28. P u d e ł k o R., K o z y r a J., Mizak K., Nieróbca A., Doroszewski A., Świtaj Ł., Jóźwicki T.: Low altitude remote sensing of agricultural drought, Agrometeorology research, Acta Agrophysica, Rozprawy i monografie, 2010, **185**: 56-64.
29. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 czerwca 2009 r w sprawie wartości klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin i gleb (Dz.U. z 2010 r. nr 75, poz. 480).

30. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi, z dnia 11 kwietnia 2019 r w sprawie wartości klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin i gleb Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Dz.U. z 2019 r., poz. 739).
31. Skrabka H.: Roślina a środowisko. Wybrane działy z fizjologii roślin. Skrypty Akademii Rolniczej, Wrocław, 1992, **374**: 41-47. ISSN 0239-576.
32. Somowska U.: Changes in Drought Conditions in Poland over the Past 60 Years Evaluated by the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. *Acta Geophysica*, 2016, **64(6)**: 2530-2549, DOI: 10.1515/acgeo-2016-0110.
33. Ślusarczyk E.: Określenie retencji użytecznej gleb mineralnych – dla prognozowania i projektowania nawodnień. *Melioracje Rolne*, 1979, **3**: 1-10.
34. Tokarczyk T.: Wskaźniki oceny suszy stosowane w Polsce i na świecie. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Polska Akademia Nauk, 2008, **7**: 167-182.
35. Ustawa z dnia 7 lipca 2005 roku o ubezpieczeniach upraw rolnych i zwierząt gospodarskich (Dz.U. z 2005 r. nr 150 poz. 1249).
36. Van Lanen H.A.J., Laaha G., Kingston D.G., Gauster T., Ionita M., Vidal J.P., Vlnas R., Tallaksen L.M., Stahl K. i in.: Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), 2016, **30**: 3097-3104, DOI: 10.1002/hyp.10838.
37. Żyłowska K., Kozyra J.: Zmiany warunków agroklimatycznych w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2022, **67(21)**: 9-23.

Adres do korespondencji:

dr hab. Andrzej Doroszewski, prof. IUNG-PIB¹; mgr Piotr Koza²

¹Zakład Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki

²Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów

IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8,

24-100 Puławy

tel. 81 4786 750; 777

email: ador@iung.pulawy.pl

Piotr.Koza@iung.pulawy.pl

AUTOR

ORCID

Andrzej Doroszewski

0000-0002-1429-4412

Piotr Koza

0000-0002-0243-7631

Katarzyna Żyłowska, Jerzy Kozyra

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

ZMIANY KLIMATYCZNEGO BILANSU WODNEGO OKRESU
WEGETACYJNEGO W POLSCE W LATACH 1971–2020*

Słowa kluczowe: klimatyczny bilans wodny, okres wegetacyjny, susza

Wstęp

Obserwowane zmiany warunków klimatycznych w XXI wieku mają wpływ na niemal wszystkie dziedziny działalności człowieka (3, 14, 15). Obszarem gospodarki, który w pierwszej kolejności odczuwa zachodzące zmiany jest rolnictwo, głównie ze względu na częstsze i bardziej intensywne występowanie susz. Skutkiem suszy są straty w plonach, które w modelach pogoda–plon dobrze określa wskaźnik klimatycznego bilansu wodnego (KBW) (2, 9, 10, 11, 18). Znalazł on zastosowanie w Systemie Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR) (<https://susza.iung.pulawy.pl/>) (6, 7).

Klimatyczny bilans wodny określa różnicę pomiędzy sumą opadu atmosferycznego a sumą ewapotranspiracji potencjalnej (ETP) (16). W trakcie prac nad SMSR odpowiednie progi KBW określające 20% zmniejszenie plonów w tych modelach zostały zróżnicowane dla czterech gatunków gleb oraz 14 gatunków roślin uprawnych, przez co stworzono matrycę decyzyjną do określenia obszarów zagrożonych suszą (6). Wskaźnik KBW był również wykorzystywany do analiz warunków suszy przez Farata (8), Rojka (22), Łabędzkiego i Bąka (16) oraz Kanecką-Geszke i Smarzyńską (12).

Opad atmosferyczny jest mierzony na wszystkich stacjach meteorologicznych, a także w posterunkach opadowych. Sieć posterunków opadowych jest bardzo do-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

brze rozbudowana, głównie wzdłuż cieków wodnych, gdyż jej głównym zadaniem jest dostarczanie danych o wielkości opadu w kontekście zagadnień zagrożenia powodziowego. Zmienność opadu atmosferycznego w skali kraju w różnym ujęciu czasowym była szeroko opisywana w literaturze (4, 19, 23, 24, 25). Dostępność coraz to liczniejszych serii czasowych z pomiarów oraz danych satelitarnych i radarowych najprawdopodobniej przyczyni się do powstania kolejnych prac dotyczących tego elementu pogody.

Ewapotranspiracja to druga składowa KBW będąca wskaźnikiem, który nie jest bezpośrednio mierzony na stacjach meteorologicznych, a obliczany na podstawie innych elementów meteorologicznych. W zależności od wyboru metody obliczania ewapotranspiracji wykorzystywane są różne parametry zarówno zmienne, jak i stałe (1, 17). Pierwszy wzór na obliczenie wielkości parowania opublikował Penman w 1948 r. (20). W kolejnych latach wzór ten był modyfikowany, jedną z bardziej popularnych metod obliczania ewapotranspiracji opiera się na wzorze Penmana-Monteitha. Metoda ta jest zalecana do obliczeń ewapotranspiracji przez FAO. Ponieważ obie metody wykorzystują różne parametry, to wartości ewapotranspiracji obliczone dla tych samych punktów różnią się. Badania przeprowadzone przez Kasperską-Wołowicz i Łąbedzkiego (13) wykazały, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej liczone według Penmana są większe od wartości obliczonych metodą Penmana-Monteitha o około 80–100 mm w okresie wegetacyjnym. A zatem sam wybór metody obliczeniowej może spowodować uzyskanie różnych wyników. Zastosowanie wzoru Penmana wymaga wielu danych wejściowych, które są trudno dostępne. Grupa badaczy z IUNG-u zajmująca się określaniem wpływu pogody na roślinę podjęła próbę modyfikacji tego wzoru. W 1995 r. Doroszewski i Górski (5) opublikowali pracę, w której przedstawili wzór do obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej wykorzystujący temperaturę powietrza, usłonecznienie oraz długość dnia. Ponieważ parametry wejściowe do tego wzoru są standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, może być on powszechnie stosowany.

Celem pracy jest analiza zmian klimatycznego bilansu wodnego na wybranych stacjach meteorologicznych w Polsce w latach 1971–2020 w okresie wegetacyjnym kwiecień–wrzesień.

Materiały i metody

W pracy zostały wykorzystane dobowe dane meteorologiczne z lat 1971–2020 dla 30 stacji meteorologicznych w Polsce (tab. 2), udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) na stronie <https://danepubliczne.imgw.pl>.

Dane dobowe zostały zagregowane do wartości miesięcznych (od kwietnia do września) dla średniej temperatury powietrza, sumy usłonecznienia oraz sumy opadu

atmosferycznego. Do obliczenia wielkości ewapotranspiracji potencjalnej wykorzystano wzór opublikowany przez Doroszewskiego i Górskiego (5):

$$ETP = -89,6 + 0,0621t^2 + 0,00448h^{1,66} + 9,1f$$

gdzie:

ETP – miesięczna ewapotranspiracja potencjalna (mm);

t – średnia miesięczna temperatura powietrza na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu (°C);

h – suma usłonecznienia miesięcznego (h);

f – długość środkowego dnia w miesiącu (h).

Przy użyciu tego wzoru wyznaczono wartości ewapotranspiracji potencjalnej w miesiącach od kwietnia do września. Na podstawie wartości miesięcznych wyznaczono następnie wartość ewapotranspiracji i sumy opadu atmosferycznego okresu wegetacyjnego w poszczególnych dziesięcioleciach (1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010, 2011–2020).

W kolejnym kroku na podstawie różnicy pomiędzy miesięczną sumą opadu atmosferycznego a ewapotranspiracją potencjalną w poszczególnych miesiącach obliczona została wielkość klimatycznego bilansu wodnego według wzoru:

$$KBW = P - ETP$$

gdzie:

KBW – klimatyczny bilans wodny (mm);

P – suma opadu atmosferycznego (mm);

ETP – ewapotranspiracja potencjalna (mm).

Wartości miesięczne KBW zostały zagregowane dla wieloleci, a następnie wyznaczono różnice pomiędzy nimi.

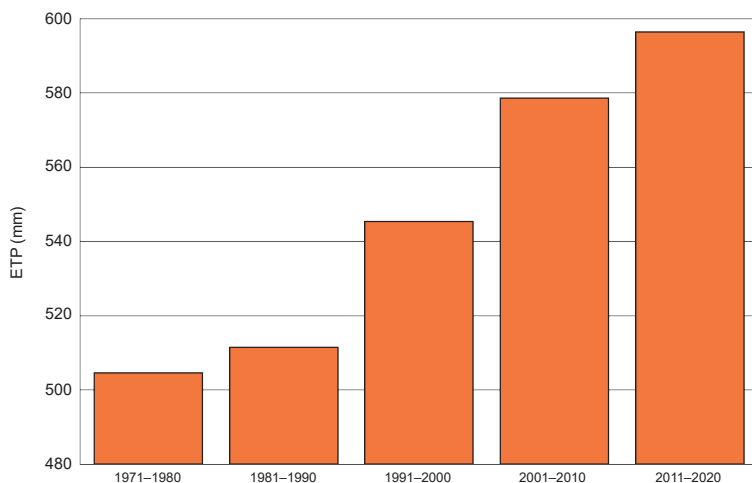
Wyniki

Ewapotranspiracja potencjalna

W okresie wegetacyjnym (kwiecień–wrzesień) w latach 1971–2020 suma ewapotranspiracji określona dla 30 punktów w Polsce wynosiła 548 mm. Najmniejsze wartości ETP w Polsce wystąpiły w miesiącach wrzesień i kwiecień; odpowiednio: 54 mm i 62 mm. W miesiącach letnich, w lipcu i czerwcu parowanie jest największe i w analizowanym okresie wynosiło odpowiednio: 118 mm i 114 mm. W pozostałych miesiącach okresu wegetacyjnego ETP uzyskało wartości średnie dla Polski wynoszące 100 mm.

Analizując wielkość średniej ewapotranspiracji potencjalnej dla Polski w poszczególnych dekadach, widać wyraźny wzrost wielkości parowania w okresie kwiecień–wrzesień (rys. 1). W latach 1971–1980 suma ewapotranspiracji w okresie wegetacyjnym wynosiła 505 mm, zaś w latach 2011–2020 – 596 mm. W porównaniu

z latami 70. XX w. nastąpił wzrost wielkości parowania w okresie wegetacyjnym o 92 mm, co średnio daje wzrost o 15 mm w każdym miesiącu. W porównaniu z okresem 1971–1980 w latach 2011–2020 nastąpił wzrost wartości sumy ewapotranspiracji potencjalnej w okresie wegetacji o 18%. Średnie wielkości ewapotranspiracji dla poszczególnych miesięcy w wieloletniach zaprezentowano w tabeli 1.



Rys 1. Średnia suma ewapotranspiracji potencjalnej w okresie kwiecień–wrzesień w Polsce w dziesięcioleciach (lata 1971–2020)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1

Średnie miesięczne wartości ewapotranspiracji potencjalnej oraz suma w okresie wegetacyjnym (kwiecień–wrzesień) w poszczególnych 10-leciach okresu 1971–2020

Wielolecie	Miesiąc						Kwiecień–Wrzesień
	kwiecień	maj	czerwiec	lipiec	sierpień	wrzesień	
1971–1980	53	93	109	106	92	50	505
1981–1990	56	99	102	112	93	49	512
1991–2000	59	102	112	120	100	52	545
2001–2010	70	101	123	127	102	57	579
2011–2020	71	105	124	123	110	63	596
Średnia	62	100	114	118	100	54	548

Źródło: opracowanie własne

Wielkość ewapotranspiracji od kwietnia do września w poszczególnych dekadach okresu 1971–2020 była najmniejsza na stacjach położonych w południowej części kraju, zaś największe wartości wystąpiły w punktach położonych w centralnej i zachodniej Polsce. Szczegółowe wartości ETP dla poszczególnych stacji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Wielkość ewapotranspiracji potencjalnej (ETP), sumy opadu atmosferycznego (P) i klimatycznego bilansu wodnego (KBW) w mm w okresie wegetacyjnym kwiecień–wrzesień dla 30 punktów w Polsce w dekadach dla okresu 1971–2020

Lp.	Stacja	1971–1980			1981–1990			1991–2000			2001–2010			2011–2020		
		ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW
1.	Białystok	519	401	-118	519	347	-172	560	356	-204	587	387	-200	598	409	-189
2.	Bielsko-Biała	466	639	173	471	619	148	506	662	156	544	696	152	581	662	81
3.	Chojnice	531	340	-191	521	307	-231	596	337	-232	598	399	-199	606	350	-256
4.	Gorzów Wielkopolski	514	326	-188	532	301	-231	566	311	-256	599	323	-276	599	328	-271
5.	Jelenia Góra	452	466	14	459	437	-23	499	451	-48	525	479	-46	574	452	-122
6.	Kalisz	510	345	-166	539	305	-234	556	323	-234	597	321	-276	596	293	-303
7.	Katowice	457	516	59	473	427	-45	538	448	-90	558	470	-88	571	421	-150
8.	Kętrzyn	529	358	-171	515	371	-144	553	355	-198	604	381	-223	594	403	-191
9.	Kielce	490	380	-110	501	353	-148	529	395	-134	556	418	-137	575	378	-198
10.	Kraków	462	452	-10	485	421	-64	520	432	-88	550	467	-83	578	418	-160
11.	Lesko	541	574	123	475	526	51	497	525	28	522	630	108	549	518	-32
12.	Leszno	517	326	-191	530	315	-215	555	343	-212	587	318	-269	608	342	-266
13.	Lublin	515	389	-104	525	337	-196	569	341	-188	588	355	-196	598	345	-231
14.	Łódź	512	411	-124	517	329	-180	544	380	-204	581	392	-225	598	367	-253
15.	Mława	523	357	-167	503	320	-182	527	358	-169	587	337	-250	578	338	-239
16.	Olsztyn	534	400	-133	524	356	-168	570	365	-205	600	377	-223	609	391	-218
17.	Opole	487	430	-58	510	400	-110	558	390	-168	587	393	-194	605	352	-253
18.	Poznań	522	308	-214	536	298	-238	580	339	-240	607	310	-297	623	315	-308
19.	Racibórz	455	440	-16	490	383	-107	504	419	-85	552	426	-127	591	374	-217
20.	Siedlce	538	434	-167	544	383	-211	574	446	-216	598	489	-251	622	346	-244

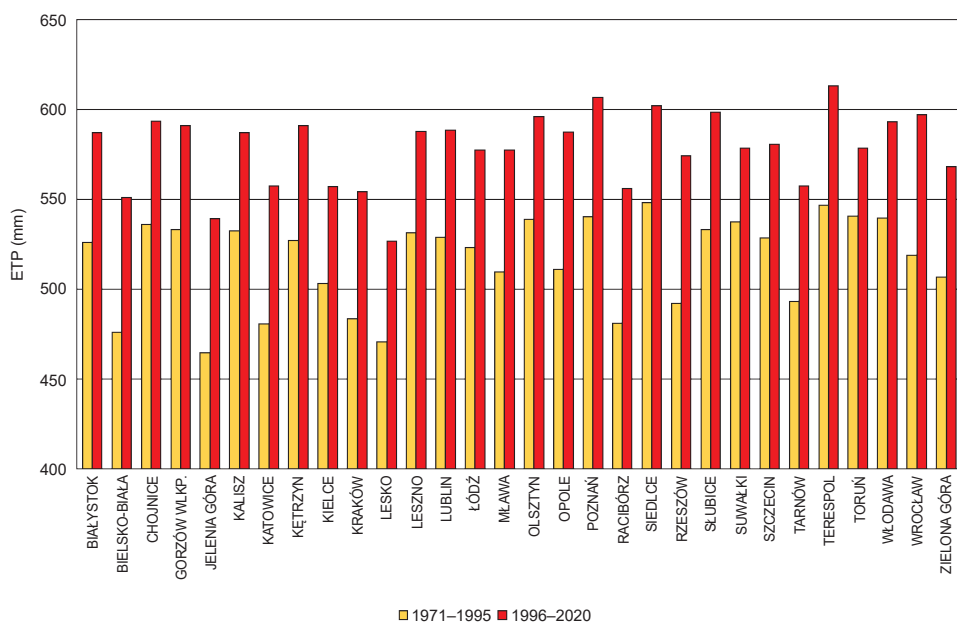
cd. tab. 2

Lp.	Stacja	1971–1980			1981–1990			1991–2000			2001–2010			2011–2020		
		ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW	ETP	P	KBW
21.	Rzeszów	489	372	-54	489	333	-106	508	358	-62	588	347	-99	593	378	-246
22.	Ślubice	514	338	-175	532	329	-203	565	316	-250	597	349	-248	621	320	-301
23.	Suwałki	537	376	-161	529	375	-155	559	332	-227	588	378	-210	578	384	-195
24.	Szczecin	525	296	-229	512	282	-231	561	343	-218	578	333	-245	597	315	-282
25.	Tarnów	476	529	53	490	446	-44	526	478	-48	551	541	-10	583	431	-151
26.	Terespol	540	361	-179	546	310	-236	569	341	-228	605	355	-251	640	346	-294
27.	Toruń	537	368	-169	532	318	-214	553	338	-215	574	396	-205	602	333	-269
28.	Włodawa	534	378	-155	535	312	-223	567	346	-221	589	381	-209	607	395	-211
29.	Wrocław	499	441	-58	515	353	-162	560	340	-219	593	363	-230	624	363	-261
30.	Zielona Góra	504	333	-171	497	330	-167	521	359	-162	570	327	-243	595	342	-254

Źródło: opracowanie własne

W pierwszej dekadzie analizowanego okresu najmniejsze wartości ETP w okresie wegetacyjnym były w Jeleniej Górze oraz Lesku i wynosiły odpowiednio: 452 mm i 451 mm. W tej samej dekadzie największe wartości ETP obliczono dla stacji w Terespolu, wyniosły one 540 mm. A zatem różnica między największą i najmniejszą wartością tego wskaźnika wynosi prawie 90 mm w okresie kwiecień–wrzesień.

O tym, jak duże zmiany zachodzą w wartościach ETP można zobaczyć na rysunku 2, gdzie przedstawiono średnie sumy ewapotranspiracji w okresie kwiecień–wrzesień dla dwóch wieloleci. Widać wyraźny wzrost wielkości parowania w ostatnim 25-leciu. Do 1995 r. parowanie na wybranych stacjach nie przekraczało 550 mm. W kolejnym okresie tylko na stacji w Jeleniej Górze i Lesku wartość 550 mm nie została przekroczona, natomiast w Poznaniu, Siedlcach i Terespolu ETP przekroczyła wartość 600 mm.



Rys. 2. Średnia suma ewapotranspiracji potencjalnej w okresie kwiecień–wrzesień dla 30 punktów w Polsce w wieloleciu 1971–1995 oraz 1996–2020

Źródło: opracowanie własne

Opad atmosferyczny

Opad atmosferyczny jest zjawiskiem, którego rozkład przestrzenny jak i czasowy jest bardzo zmienny. W okresie wegetacyjnym średnia wielkość opadu atmosferycznego w latach 1971–2020 wynosiła 386 mm. Najniższe opady zostały zanotowane w dekadzie 1981–1990 i wynosiły 363 mm średnio dla 30 opisywanych w artykule

punktów. Najwyższa średnia suma opadów w okresie wegetacyjnym wystąpiła w dwóch dekadach: 2001–2010 (402 mm) oraz 1971–1980 (401 mm).

Wielkość opadów w poszczególnych dekadach analizowanego okresu dla każdej stacji zaprezentowano w tabeli 2. Najwyższe opady notowane były w punktach zlokalizowanych na południu Polski – Bielsko-Biała i Lesko. Najniższe opady zaś wystąpiły w Polsce centralnej i zachodniej (Kalisz, Poznań, Szczecin). Różnica pomiędzy najniższą i najwyższą sumą opadu atmosferycznego jest znacznie większa niż w przypadku ewapotranspiracji i wynosi około 300 mm.

W okresie wegetacyjnym miesiącem z najniższymi opadami był kwiecień (tab. 3). Średnia suma opadu dla tego miesiąca w latach 1971–2020 wyniosła 37,8 mm. Najniższe opady w kwietniu były w dekadzie 2001–2020, zaś najwyższe w dekadzie 1991–2000. Różnica pomiędzy tymi wartościami wyniosła 16,3 mm, co stanowi ok. 50% sumy opadu kwietnia. Miesiącem z największą sumą opadu był lipiec ze średnią wynoszącą 86,4 mm. Jedynie w dekadzie 1981–1990 średni miesięczny opad w lipcu nie był najwyższy. Największy opad w tej dekadzie wystąpił w czerwcu, ale tylko o 7,2 mm był wyższy od opadu w lipcu. Opad w maju i wrześniu notowano na podobnym poziomie, a jego średnia wartość dla analizowanych lat wyniosła odpowiednio: 62,9 mm oraz 56,0 mm.

Tabela 3

Średnia miesięczna suma opadu atmosferycznego (mm) w latach 1971–2020

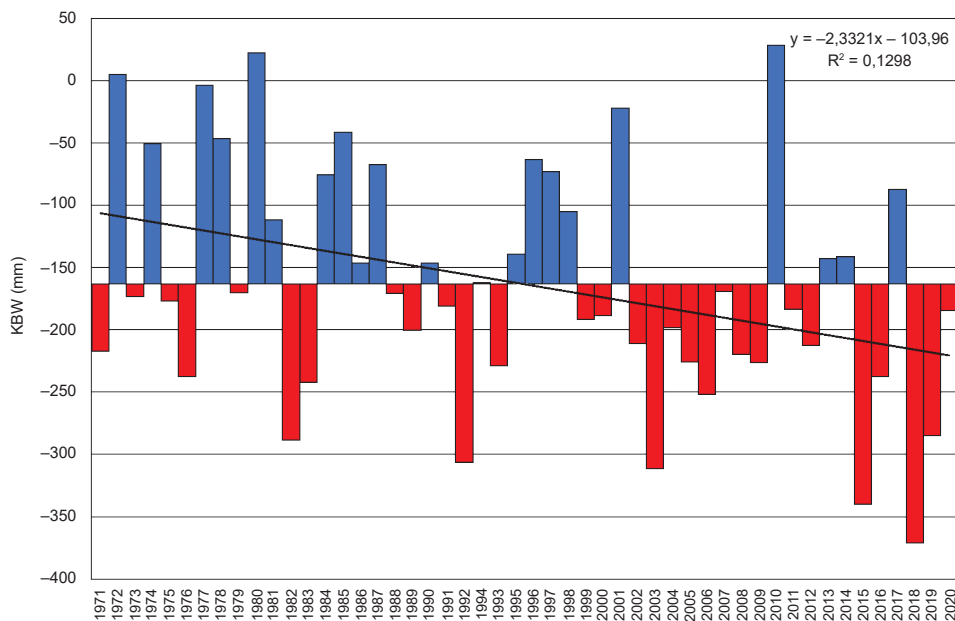
Miesiąc	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020	Średnia 1971–2020
Kwiecień	42,6	35,3	46,7	30,4	34,2	37,8
Maj	56,0	58,2	58,5	74,5	67,4	62,9
Czerwiec	80,6	79,7	71,6	66,9	72,9	74,3
Lipiec	91,0	72,5	86,8	91,5	90,4	86,4
Sierpień	74,7	67,1	60,3	81,8	56,1	68,0
Wrzesień	56,1	50,1	60,1	55,4	58,3	56,0
Kwiecień–wrzesień	401,0	363,0	383,9	400,5	379,2	385,5

Źródło: opracowanie własne

Klimatyczny bilans wodny (KBW)

Analizując sumę klimatycznego bilansu wodnego okresu wegetacyjnego (od kwietnia do września) w latach 1971–2020, możemy zaobserwować wyraźny trend malejący (rys. 3). Średnia wielkość KBW od kwietnia do września w analizowanym okresie wyniosła –163 mm. W ostatnim dwudziestoleciu tylko w pięciu latach wartość KBW była powyżej średniej (2001, 2010, 2013, 2014 i 2017). W pozostałych 15 latach wartości KBW były poniżej średniej, a największy deficyt opadów odno-

towano w 2018 r., gdzie KBW wyniosło -371 mm. Zatem wartość KBW była niższa od wartości średniej o 208 mm.



Rys. 3. Suma klimatycznego bilansu wodnego od kwietnia do września w latach 1971–2020.

Oś pionowa przecina oś poziomą w wartości średniej dla wielolecia 1971–2020, która wynosi -163 mm

Źródło: opracowanie własne

Analizując wartości KBW w poszczególnych dekadach, widać wyraźne obniżenie sumy KBW w okresie kwiecień–wrzesień. W pierwszej dekadzie analizowanego okresu (1971–1980) suma KBW wynosiła -105 mm, zaś w ostatniej z analizowanych dekad -219 mm. Porównując wartości miesięczne KBW w tym samych okresach czasowych (tab. 4), możemy zauważyć, że jedynie w maju wartości te były na zbliżonym poziomie. W pozostałych miesiącach wartości KBW zmniejszają się w każdej kolejnej analizowanej dekadzie. Miesiącem o najmniejszym deficycie wody był wrzesień, w którym średnie KBW dla analizowanego okresu wynosiły 2 mm. Z kolei miesiącami z największym niedoborem wody były maj i czerwiec, gdzie średnie wartości KBW wyniosły odpowiednio: -38 mm oraz -40 mm. Wielkości KBW dla poszczególnych punktów w Polsce zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 4

Średnie wartości klimatycznego bilansu wodnego (mm) w poszczególnych miesiącach okresu wegetacyjnego oraz suma w dekadach okresu 1971–2020

Miesiąc	Dekada					Średnia
	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020	
Kwiecień	–11	–21	–15	–35	–37	–24
Maj	–38	–41	–41	–32	–38	–38
Czerwiec	–29	–22	–43	–53	–52	–40
Lipiec	–16	–40	–33	–37	–33	–32
Sierpień	–18	–26	–39	–21	–55	–32
Wrzesień	6	1	8	–2	–4	2
Kwiecień–Wrzesień	–105	–149	–164	–181	–219	–163

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wskazała, że w wyniku zwiększenia wartości wskaźnika ewapotranspiracji potencjalnej znacząco zmniejszyły się wartości klimatycznego bilansu wodnego. Istotnych zmian nie zanotowano natomiast w przypadku sumy opadu atmosferycznego. Ten element KBW wykazuje dużą zmienność zarówno czasową, jak i przestrzenną. Niekorzystna dla rolnictwa zmiana, jaką jest zmniejszenie wartości KBW w okresie wegetacyjnym prowadzi do powstawania częstszych i bardziej intensywnych susz na terenie naszego kraju. Obserwowana tendencja zmian wartości KBW oraz prognozy klimatyczne przedstawiane w scenariuszach klimatycznych (21) pozwalają na wysunięcie wniosku, iż zjawisko suszy będzie stanowiło coraz większe wyzwanie w kolejnych latach. Zasadne wydaje się więc promowanie wszelkich działań, nie tylko w rolnictwie, mających na celu racjonalne gospodarowanie wodą. Ponadto w przypadku rolnictwa istotne będzie stosowanie praktyk umożliwiających zwiększenie możliwości retencyjnych wody w glebie.

Literatura

1. B a c S.: Metody określania ewapotranspiracji rzeczywistej i potencjalnej w warunkach polowych. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1968, **88**: 45-55.
2. B a r t o s i e w i c z B., J a d c z y s z y n J.: The impact of drought stress on the production of spring barley in Poland. Polish Journal of Agronomy, 2021, **45**: 3-11.
3. C h o j n i c k a-O Ź g a L., L o r e n c H. (red.): Współczesne problemy klimatu Polski. Warszawa 2019, ss. 260.
4. C z a r n e c k a M., N i d z g o r s k a-L e n c e w i c z J.: Wieloletnia zmienność opadów w Polsce. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2012 (IV–VI), t. 12, **2(38)**: 45-60.

5. Doroszewski A., Górski T.: Prosty wskaźnik ewapotranspiracji potencjalnej. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCLXXI*, 1995, Melior. Inż. Środ., **16**: 3-8.
6. Doroszewski A., Jadczyzsyn J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E.: Podstawy Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2012 (IV-VI), t. 12, **2(38)**: 77-91.
7. Doroszewski A., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Jadczyzsyn J., Koza P., Łopatka A.: Monitoring suszy rolniczej w Polsce. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 2008, t. LI, **1(416)**: 35-38.
8. Farat R., Kępińska-Kasprzak M., Magier P.: Susze na obszarze Polski w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze IMGW, Gospodarka Wodna i Ochrona Wód, IMGW, Warszawa 1995*, **16**: 1-141.
9. Górski T., Demidowicz G., Deputat T., Górski K., Krakowiak A., Marcinkowska I., Spoz-Pać W.: Empiryczny model plonowania ziemniaka w funkcji czynników meteorologicznych. W: *Materiały XXV Zjazdu Agrometeorologów. Olsztyn–Mierki, 27–29 IX 1994 r.*, AR Olsztyn, ss. 43-46.
10. Górski T., Demidowicz G., Deputat T., Górski K., Marcinkowska I., Spoz-Pać W.: Empiryczny model plonowania pszenicy ozimej w funkcji czynników meteorologicznych. *Zeszyty Naukowe AR Wrocław*, 1997, **313**: 99-109.
11. Górski T., Kozyra J., Doroszewski A.: Field crop losses in Poland due to extreme weather conditions – case studies. W: *The Influence of extreme phenomenon on the natural environment and human living conditions*, Liszewski S. (ed.). Łódź. ŁTN, 2008, pp. 35-49.
12. Kanecka-Geszke E., Smarzyńska K.: Ocena suszy meteorologicznej w wybranych regionach agroklimatycznych Polski przy użyciu różnych wskaźników. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 2007, **6(2)**: 41-50.
13. Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L.: Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2004, t. 4, **2a(11)**: 123-136.
14. Kundzewicz Z.W., Kozyra J.: Ograniczenie wpływu zagrożeń klimatycznych w odniesieniu do rolnictwa i obszarów wiejskich. *Polish Journal of Agronomy*, 2011, **7**: 68-81.
15. Kundzewicz Z.W., Hov O., Okruszko T. (red.): *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*. Poznań 2017, ss. 273.
16. Łabędzki L., Bąk B.: Standaryzowany Klimatyczny Bilans Wodny jako wskaźnik suszy. *Acta Agrophysica*, 2004, **3(1)**: 117-124.
17. Łabędzki L., Szajda J., Szuniewicz J.: Ewapotranspiracja upraw rolniczych – terminologia, definicja, metody obliczania. *Przegląd stanu wiedzy. Mater. Inf., Falenty, IMUZ*, 1996, **33**: 1-15.
18. Mizak K., Pudełko R., Kozyra J., Nieróbca A., Doroszewski A., Świtaj Ł., Łopatka A.: Wyniki monitoringu suszy rolniczej w uprawach pszenicy ozimej w Polsce w latach 2008–2010. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2011, t. 11, **2(34)**: 95-107.
19. Musiał E., Rojek M.S.: Ewapotranspiracja potencjalna i opady atmosferyczne we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1965–2000. *Acta Agrophysica*, 2007, **9(3)**: 685-698.
20. Penman H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*, 1948, **193**: 120-146.
21. Raport skrócony: Zmiany temperatury i opadu na obszarze Polski w warunkach przyszłego klimatu do roku 2100. IOŚ-PIB, Warszawa, 2020, ss. 31.
22. Rojek M.: Klimatyczny bilans wodny. W: *Atlas klimatycznego ryzyka uprawy roślin w Polsce*. Mapa 27. Szczecin. Wyd. AR, 2001.
23. SzYGa-Pluta K.: Zmienność czasowa i przestrzenna opadów atmosferycznych w Wielkopolsce w latach 1981–2014. *Przegląd Geograficzny*, 2018, **90(3)**: 495-516.

24. Wibig J., Radziun W.: Opady atmosferyczne w województwie łódzkim w latach 1961–2015. *Acta Geographica Lodziensia*, 2019, **109**: 29-47.
 25. Żyłowska K., Kozyra J.: Zmiany warunków agroklimatycznych w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2022, **67(21)**: 9-23.
-

Adres do korespondencji:

dr Katarzyna Żyłowska; dr hab. Jerzy Kozyra
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 4786 768; 764
email: Katarzyna.Zylowska@iung.pulawy.pl
Jerzy.Kozyra@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Katarzyna Żyłowska	0000-0002-6019-034X
Jerzy Kozyra	0000-0002-7082-8765

Krzysztof Jończyk

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

**ORGANIZACJA PRODUKCJI ROŚLINNEJ,
PŁODOZMIAN A GOSPODARKA WODNA***

Słowa kluczowe: gospodarka wodna, płodozmian, retencja wodna, agrotechnika

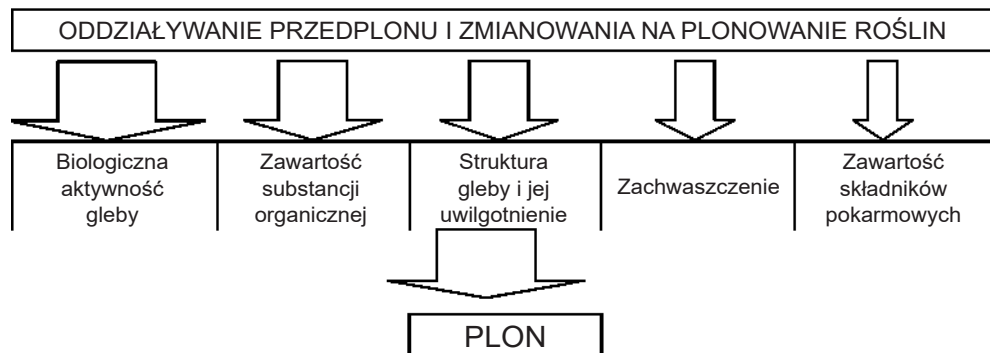
Wstęp

Poprawa gospodarki wodnej na gruntach ornych wymaga działań kompleksowych. Jednym z elementów agrotechniki, który ma taki charakter jest stosowanie płodozmianu. Poprawnie skonstruowany płodozmian przyczynia się do zwiększenia retencji wody oraz lepszego wykorzystania jej zasobów w glebie. Efekty te uzyskuje się poprzez: zwiększenie zasobów materii organicznej oraz bardziej efektywne wykorzystanie dostępnej wody w zmianowaniu, kształtowanie warunków do efektywnego jej wykorzystania – m.in. dbając o stan fitosanitarny łąnów, optymalne odżywienie i kształtowanie konkurencyjnych łąnów roślin uprawnych, stosowanie mulczu z resztek pozbiorowych i międzyplonów.

Płodozmian jest to ściśle określone następstwo roślin zaplanowane na szereg lat dla danego obszaru. Płodozmian jest podstawowym elementem organizacji produkcji roślinnej w gospodarstwie i poprzez odpowiedni dobór roślin, dostosowany do warunków siedliskowych oraz profilu produkcji, umożliwia optymalne wykorzystanie zasobów gospodarstwa (ziemi, siły roboczej, wyposażenia technicznego). Gospodarka płodozmianowa obejmuje obok doboru roślin ich następstwo uwzględniające wymagania roślin w stosunku do stanowiska oraz właściwości biologiczne, m.in. potrzeby pokarmowe, budowę systemu korzeniowego, długość okresu wegetacji oraz wymagania wodne (8, 10, 11, 12).

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.1. pt. „Ochrona gleb użytkowanych rolniczo” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

Znaczenie płodozmianu polega na jego wielostronnym oddziaływaniu na produktywność roślin (rys. 1). Dodatkowo determinuje on stosowanie pozostałych elementów agrotechniki – nawożenia, uprawy roli czy ochrony roślin.



Rys. 1. Wielostronne oddziaływanie płodozmianu na plonowanie roślin

Źródło: Kuś, 1995 (12)

Poprawa gospodarki wodnej i zwiększenie zasobów wody w siedlisku w kontekście gospodarki płodozmianowej i całokształtu organizacji produkcji roślinnej polega na:

- kształtowaniu zasobów materii organicznej w glebie;
- całokształcie agrotechniki związanej z doбором uprawianych roślin minimalizującej bezproduktywne parowanie wody bezpośrednio z powierzchni gleby (ewapotranspiracja);
- doborze do uprawy gatunków roślin i odmian dostosowanych do warunków siedliska;
- zwiększeniu efektywności wykorzystania wody przez rośliny (nawożenie, ochrona przed chwastami, chorobami i szkodnikami);
- mulczowaniu powierzchni gleby.

Ekonomiczno-organizacyjne uwarunkowania w stosowaniu płodozmianu

Z punktu widzenia ekonomiczno-organizacyjnego płodozmian stanowi podstawowy element systemu organizacji produkcji roślinnej w gospodarstwie. Na dobór roślin uprawianych obok zespołu warunków przyrodniczych w coraz większym stopniu wpływają czynniki ekonomiczno-organizacyjne (11, 14). Mając na uwadze te dwie kategorie czynników, gospodarstwa muszą uwzględniać ryzyko i bariery związane ze stosowaniem wielokierunkowych, rozbudowanych płodozmianów lub uproszczeń w tym zakresie.

Z wielostronną produkcją i stosowaniem tradycyjnych wielopolowych płodozmianów wiąże się, m.in.:

- pełniejsze wykorzystanie możliwości produkcyjnych gleby poprzez dobór gatunków roślin o dużym potencjale plonowania;
- lepsze wykorzystanie zasobów pokarmowych gleby poprzez uprawę i następstwo roślin o różnej zdolności wykorzystywania składników pokarmowych z gleby;
- równomierne wykorzystanie sprzętu i siły roboczej w ciągu roku;
- zapewnienie odpowiedniej ilości pasz na okres żywienia letniego i zimowego;
- zmniejszenie ryzyka dzięki wielokierunkowości produkcji.

Uproszczenia w produkcji roślinnej i specjalizacja gospodarstw wiąże się z następującymi zależnościami:

- wzrostem wymagań w stosunku do wdrożenia zaawansowanych rozwiązań technicznych i reżimu technologicznego w produkcji poszczególnych ziemio-plodów i całego gospodarstwa;
- ograniczeniem kosztów sprzętu technicznego – gospodarstwo nie jest w stanie w odpowiedni sposób zmechanizować technologii produkcji różnych gatunków roślin;
- wymaganiami rynkowymi – presją na sprzedaż odpowiednio dużych i jednolitych partii towaru;
- koniecznością spełnienia wymagań w zakresie dobrej praktyki w produkcji rolniczej i standardów ochrony środowiska przyrodniczego (tzw. warunkowość).

Zwiększenie zasobów materii organicznej gleby przez płodozmian

Płodozmian obok nawożenia organicznego i uprawy roli jest głównym elementem agrotechniki decydującym o zawartości materii organicznej w glebie. Zawartość materii organicznej w glebie traktuje się jako podstawowy wskaźnik żyzności, a jej bilans stanowi ocenę poprawności gospodarowania (1, 4, 6, 9, 11).

Poszczególne gatunki roślin uprawnych zostawiają różne ilości resztek poźniwnych (tab. 1). Z punktu widzenia oddziaływania na bilans materii organicznej w glebie uprawiane rośliny można podzielić na trzy grupy:

1. Wzbogacające glebę w substancję organiczną. Należą tu przede wszystkim wieloletnie rośliny pastewne bobowate i ich mieszanki z trawami oraz trawy w uprawie polowej. Dodatkowo z uwagi na optymalny stosunek węgla do azotu ich wpływ na jakość związków próchnicznych jest korzystny. Także rośliny strączkowe oraz międzyplony przyorywane jako zielone nawozy mają dodatni wpływ na bilans próchnicy;
2. Zubożające glebę. Do tej grupy zalicza się głównie rośliny okopowe, warzywa korzeniowe i kukurydzę. Pozostawiają one bardzo mało resztek poźniwnych,

a ich wysiew w szerokie rzędy, międzyrzędowe zabiegi pielęgnacyjne oraz późne zwarcie ładu (zakrycie międzyrzędzi) zwiększa rozkład próchnicy i nasila erozję. Szacuje się, że w trakcie uprawy roślin okopowych ulega mineralizacji ok. $1,0\text{--}1,5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ próchnicy. Aby ten ubytek wyrównać, trzeba zastosować ok. $15\text{--}16\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika;

3. Rośliny o małym ujemnym wpływie na bilans materii organicznej lub neutralne pod tym względem. Należą tu zboża i rośliny oleiste. Wcześniej zboża traktowano jako rośliny degradujące substancję organiczną gleby, jednak zmiany w ich agrotechnice (zagęszczenie łąnów dzięki skróceniu słomy) oraz kombajnowy zbiór, przy którym pozostaje dużo resztek poźniwnych, znacznie zmniejszyły ich ujemne oddziaływanie na bilans substancji organicznej w glebie. Należy podkreślić, że jakość resztek poźniwnych zbóż jest gorsza z uwagi na niekorzystny stosunek węgla do azotu.

Tabela 1

Sucha masa ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) resztek poźniwnych

Gatunek roślin	Resztki poźniwne ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)
Pszenica ozima	3,31
Żyto ozime	3,22
Jęczmień jary	2,54
Owies	2,86
Bobik na nasiona	3,14
Ziemniak	0,91
Lucerna	8,22
Koniczyna czerwona	5,23
Międyplon z gorczycy	1,42
Międyplon z facelii	1,57
Wsiewka koniczyny białej	3,65

Źródło: Tyburski, 2004 (15)

Jeżeli bilans materii organicznej jest ujemny, niezbędne są zmiany w strukturze zasiewów, tj.: wprowadzenie roślin wzbogacających glebę w próchnicę z dodatnim współczynnikiem reprodukcji (tab. 2); zwiększenie dawek nawozów organicznych (przyorywanie słomy) lub uprawa międzyplonów na przyoranie.

Tabela 2

Współczynniki reprodukcji i degradacji glebowej materii organicznej

Roślina lub nawóz organiczny	Współczynnik reprodukcji (+) lub degradacji (–) w t substancji organicznej na ha dla gleb		
	lekkich	średnich	ciężkich
Okopowe, warzywa korzeń 1 ha	–1,26	–1,40	–1,54
Kukurydza, warzywa liściowe 1 ha	–1,12	–1,15	–1,22
Zboża, oleiste, włókniste 1 ha	–0,49	–0,53	–0,56
Strączkowe 1 ha	+0,32	+0,35	+0,38
Trawy 1 ha	+0,95	+1,05	+1,16
Motylkowe, mieszańki 1 ha	+1,89	+1,96	+2,10
Międzyplony na ziel. nawóz 1 ha	+0,63	+0,70	+0,77
Obornik, 1 t suchej masy*	+0,35		
Gnojowica, 1 t suchej masy**	+0,28		
Słoma 1 t suchej masy	+0,21		
Liście buraka, międzyplony	+0,14		

*przeciętna dawka obornika 40 t·ha⁻¹ o zawartości s.m. – 25%**przeciętna dawka gnojowicy 40 t·ha⁻¹ o zawartości s.m. ok. 6–8%

Źródło: Fotyma i Mercik, 1992 (3)

Zawartość glebowej materii organicznej w glebie decyduje o:

- zdolności gleby do zatrzymywania i uwalniania składników mineralnych do roztworu glebowego (pojemność sorpcyjna gleby). Próchnica glebowa poprzez swoją koloidalną strukturę pozwala na sorpcję składników pokarmowych roślin w stopniu 4–12 razy większym niż frakcja mineralna gleby, a dodatkowo są one łatwo dostępne dla roślin;
- zdolności gleby do zatrzymywania i gromadzenia wody, gdyż próchnica zatrzymuje 3–5-krotnie więcej wody dostępnej dla roślin w stosunku do swojej masy;
- strukturze gruzelkowej gleby ułatwiającej mechaniczną uprawę roli i zmniejszającej jej podatność na erozję, ponieważ stanowi ona lepsze dla fazy stałej gleby;
- ciemnej barwie i właściwościach cieplnych gleby (szybkości ogrzewania się wiosną);
- zdolności adsorpcji na swojej powierzchni metali ciężkich i toksycznych substancji (np. pestycydów), aż do czasu ich rozkładu przez mikroorganizmy glebowe;
- aktywności biologicznej gleby, gdyż materia organiczna jest źródłem węgla i innych składników pokarmowych dla mikroorganizmów żyjących w glebie.

Poprawnie skonstruowany płodozmian, dostosowany do warunków siedliskowych i ekonomiczno-organizacyjnych, powinien zapewniać dodatni bilans materii organicznej. Dodatni wynik bilansu świadczy o prawidłowej gospodarce substancją organiczną i w dłuższym czasie zapewnia stabilizację zawartości próchnicy na optymalnym poziomie. Nawet stosunkowo małe zmiany w zawartości próchnicy w glebie powodują znaczące modyfikacje jej właściwości. Wyniki wieloletnich doświadczeń wskazują, że wieloletnie stosowanie nawożenia organiczno-mineralnego połączonego z wapnowaniem zwiększyło zawartość węgla organicznego w glebie z 0,42 do 0,72% oraz jej zdolności do retencji wody (tab. 3).

Tabela 3

Wpływ długotrwałego stosowania zróżnicowanego nawożenia na zawartość węgla organicznego i zdolność retencyjną wody

Nawożenie	Zawartość węgla organicznego (%)	Polowa pojemność wodna gleby (%)	Woda dostępna dla roślin (%)
Bez nawożenia	0,42 a*	21,6 a	17,8 a
NPK + Ca	0,48 b	22,6 a	18,8 a
Obornik ($10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)	0,57 b	23,5 a	19,3 b
Obornik ($10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) + NPK i Ca	0,72 c	25,5 b	20,5 b

*wyniki oznaczone różnymi literami różnią się istotnie

Źródło: Körchens, 2010 (9)

Dobór roślin i odmian

Oddziaływanie płodozmianu w kontekście wykorzystania zasobów wodnych przejawia się również w umiejętnym doborze roślin i ich uprawie na polach płodozmianu o mniejszej retencji wody (2, 5, 8, 9). Elementem lepszego wykorzystania glebowych zasobów wodnych w produkcji roślinnej jest również ograniczenie w strukturze zasiewów udziału zbóż jarych. Z uprawą tej grupy roślin wiąże się większa wrażliwość na niedobory wody wiosną. Oзимiny lepiej wykorzystują zapasy zgromadzone w okresie jesienno-zimowym i w niektórych stanowiskach ich uprawa obciążona jest mniejszym ryzykiem.

Dodatkowym rozwiązaniem poprawiającym wykorzystanie zasobów wody w przypadku uprawy zbóż jest uprawa odmian przewodkowych. Zboża przewodkowe w wyniku prac hodowlanych uzyskały większą odporność na niskie temperatury i mogą być wysiewane w okresie późnojesiennym. Rozwiązanie to jest korzystne w przypadku siewów zbóż po późno zbieranych przedplonach, np.: kukurydzy na nasiona, późnych odmianach ziemniaka, buraku cukrowym. W warunkach utrud-

niających przygotowanie stanowiska pod siewy zbóż ozimych oraz coraz częściej występujących niedoborach wilgoci wiosną, odmiany przewódkowe lepiej wykorzystują zapasy wody z opadów jesienno-zimowych i lepiej plonują w porównaniu ze zbożami wysiewanymi wiosną.

Do odmian zbóż o cechach przewódkowych zaliczane są m.in.:

- pszenica jara: Arabella, Bombona, Mandaryna, Waluta, Struna, Dublet, Cytra, Koksa, Nawra, Ostka Smolicka, Tybalt, KWS Chamsin, KWS Scirocco, Mon-sun, Izera, Parabola Żura, Ethos, Granus, Lennox, Matthus;
- pszenżyto jare: Dublet, Mazur, Nagano, Andrus, Kargo, Milewo, Milkaro, Matejko;
- żyto jare: Bojko.

Zwiększenie w zmianowaniu udziału roślin o większych wymaganiach termicznych i efektywniej gospodarujących wodą ogranicza wykorzystanie zasobów wodnych gleby, a dodatkowo zmniejsza ryzyko ograniczenia produktywności w warunkach okresowej suszy. Takie rośliny, jak: kukurydza, proso, sorgo, należące do grupy roślin o typie fotosyntezy C4, lepiej wykorzystują wodę (tab. 4).

Tabela 4

Zużycie wody w różnych grupach roślin w przeliczeniu na 1 kg przyrostu suchej masy

Gatunek rośliny	Typ fotosyntezy	Zużycie wody (l·kg ⁻¹ przyrostu suchej masy)
Pszenica, ziemniak, gryka	C3	500–600
Jęczmień, żyto		400–500
Burak cukrowy		350–450
Owies, rzepak, groch, koniczyna czerwona		600–700
Lucerna, soja, len		>700
Kukurydza	C4	300–400
Proso, sorgo		200–300

Źródło: Dębski, 1970 (2)

Ochrona roślin poprzez płodozmian

Zmniejszenie presji agrofagów poprzez właściwie skonstruowany płodozmian polega na ograniczeniu ich wstępowania (choroby, szkodniki) i zwiększeniu konkurencyjności roślin uprawnych w stosunku do chwastów. Łany zdrowe, o optymalnym zagęszczeniu lepiej konkurują o zasoby siedliska: wodę, składniki pokarmowe, światło. Zwarte łany lepiej zacieniają powierzchnię gleby, ograniczając straty wody poprzez ewapotranspirację (6, 9).

Właściwie skonstruowany płodozmian wpływa korzystnie na wzrost biologicznej aktywności gleby. Pod tym pojęciem rozumie się zasiedlenie jej przez liczne gatunki flory i fauny glebowej. Zachwaszczenie w różnych zmianowaniach jest wypadkową odchwaszczającego i zachwaszczającego wpływu poszczególnych roślin i stosowanych w ich uprawie zabiegów pielęgnacyjnych. Odchwaszczająco działają te rośliny, które dobrze zacieniają glebę, mają długi okres wegetacji lub wymagają intensywnego pielęgnowania. Poprzez włączenie do płodozmiannu roślin o zróżnicowanych wymaganiach: jarych, ozimych, pastewnych, można ograniczyć występowanie uciążliwych chwastów (8, 11). Każdemu gatunkowi roślin uprawnych towarzyszy zespół chwastów, których wzrost i rytm rozwojowy są zbliżone do uprawianej rośliny. W związku z tym częsty powrót na dane pole tego samego gatunku rośliny lub gatunków pokrewnych prowadzi do kompensacji określonych gatunków chwastów. Do grupy roślin o właściwościach fitosanitarnych należą, m.in.: owies, który hamuje rozwój patogenów wywołujących choroby podstawy żdźbła; gryka, gorczyca biała – hamujące rozwój drutowców, nicieni i nasion niektórych chwastów.

Nawożenie roślin poprzez płodozmian

Zrównoważona gospodarka składnikami pokarmowymi, uwzględniająca z jednej strony zasoby glebowe z drugiej wszystkie możliwe źródła składników odżywczych (m.in. zawarte w resztkach poźniwnych, nawozach naturalnych i organicznych), wpływa na stan odżywienia roślin. Szczególnie ważną rolę w gospodarce wodnej roślin spełnia potas i fosfor.

Potas jest odpowiedzialny za pobieranie wody przez rośliny. Wyższe jego stężenie w soku komórkowym oznacza większe ciśnienie osmotyczne, które umożliwia pobieranie większych ilości wody. Pierwiastek ten bierze udział w procesach otwierania i zamykania szparek liściowych. Potas w przeciwieństwie do azotu i fosforu nie buduje podstawowych substancji organicznych roślin, ale pełni ważną rolę w procesach biologicznych, takich jak: fotosynteza, oddychanie i regulacja uwodnienia tkanek.

Fosfor. Związki fosforu odgrywają główną rolę w gospodarce energetycznej roślin, a poprzez to biorą udział we wszystkich procesach życiowych: asymilacji CO_2 , oddychania, syntezie białka, węglowodanów i tłuszczów. Prawidłowe żywienie fosforem stymuluje rozwój systemu korzeniowego, tym samym zwiększając odporność roślin na mróz, suszę i niektóre choroby.

Rośliny w optymalny sposób zaopatrzone w składniki pokarmowe zużywają mniej wody na wyprodukowanie jednostki suchej masy (tab. 5).

Tabela 5

Wpływ nawożenia potasem na plon buraka, zawartość cukru i zużycie wody

Nawożenie (g K·wazon ⁻¹)	Plon (g s.m·wazon ⁻¹)		Cukier (%)	Zużycie wody (l·kg ⁻¹ s.m.)
	korzenie	liście		
0,20	42	56	15,1	522
0,78	78	64	16,6	364
2,72	109	59	17,6	314

Źródło: Kuś 2016 (10)

Mulczowanie

Mulcz (matowanie) jest to zabieg polegający na pokryciu powierzchni gruntu materiałem organicznym w celu przeciwdziałania erozji wodnej i wietrznej. Dodatkowym efektem mulczowania jest efekt nawozowy. Nieobsiane powierzchnie gruntów ornych, szczególnie na zboczach, zaleca się przykrywać na okres jesienno-zimowy wszystkimi dostępnymi w gospodarstwie materiałami osłaniającymi glebę, jak: słoma, łęty, liście, międzyplony. Materiały te spełniają rolę mulczu i chronią glebę przed destrukcyjnym działaniem kropel deszczu, zatrzymują śnieg i ograniczają zmywy wiosenne (6, 7, 15).

Pozostawiona na powierzchni gruntu masa organiczna poddana działaniu czynników biologicznych i atmosferycznych poprawia strukturę gleby, zmniejsza jej zlewność i reguluje stosunki wodne poprzez usprawnienie podsiąkania wody, ograniczenie parowania.

Literatura

1. Dąbek-Szreniawska M., Wyczółkowski A., Jończyk K., Kuś J.: Współzależność między nawożeniem, systemem uprawy, wodoodpornością agregatów glebowych a liczebnością drobnoustrojów. *Acta Agrophysica*, 2000, **38**: 47-57.
2. Dębski K.: *Hydrologia*. Arkady, Warszawa 1970, ss. 368.
3. Fotyła M., Mercik S.: *Chemia rolna*. Wyd. PWN, 1992, ss. 342.
4. Jończyk K.: Rolnictwo zrównoważone ochrona gleb i wód. W: Program rolnośrodowiskowy aktualnie i w przyszłości. Materiały szkoleniowe IUNG-PIB Puławy, 2006, ss. 28-36.
5. Jończyk K.: Zabiegi przeciwozyjne. W: Woda na obszarach wiejskich, W. Mioduszeński, W. Dembek (red.). MRiRW, IMiUZ, Warszawa Falenty, 2009, ss. 237-242. ISBN 978-61875-09-3.
6. Jończyk K., Kuś J., Stalenga J.: Produkcyjne i środowiskowe skutki różnych systemów gospodarowania. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2007, **1(55)**: 13-22.
7. Jończyk K., Red. Mioduszeński W.: *Gospodarowanie wodą w rolnictwie w obliczu ekstremalnych zjawisk pogodowych*. Warszawa, 2012, Fundacja Na Rzecz Zrównoważonego Rozwoju.
8. Könncke G.: *Zmianowanie*. PWRiL, Warszawa 1974, ss. 393.
9. Körschen S.: Der organische Kohlenstoff im Boden (C-org) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2010, **56**, **4**: 375-392.
10. Kuś J.: Gospodarowanie wodą w rolnictwie. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2016, **47(1)**: 83-104.

11. Kuś J.: Dobra praktyka rolnicza w gospodarce płodozmianowej i uprawie roli. IUNG-PIB, Puławy 1998, Seria K /15/ 1: 279-300.
 12. Kuś J.: Rola zmianowania roślin we współczesnym rolnictwie. Wyd. IUNG, Puławy 1995.
 13. Kuś J., Jończyk K.: Effect of tillage systems and soil mulching with intercrops on mineral nitrogen content in soil and plant yield. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*, 1997, 2a: 407-410.
 14. Kuś J., Jończyk K.: Produkcyjne i środowiskowe skutki stosowania różnych systemów gospodarowania w Osinach. W: *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce*, M. Marks (red.). Olsztyn 2018. ISBN 978-83-8100-132-8: 133-156.
 15. Tyburski J.: Nawożenie w gospodarstwach ekologicznych. Radom 2004.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Krzysztof Jończyk
Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 807
e-mail: kjonczyk@iung.pulawy.pl

AUTOR
Krzysztof Jończyk

ORCID
0000-0002-5262-8858

Janusz Smagacz

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

ZNACZENIE KONSERWUJĄCEJ UPRAWY ROLI W KSZTAŁTOWANIU ŻYZNOŚCI GLEBY*

Słowa kluczowe: środowisko przyrodnicze, konserwująca uprawa roli, próchnica, woda w glebie, chemiczne właściwości gleby

Wstęp

W ostatnich latach problem zachowania żyzności i urodzajności gleb nabiera szczególnego znaczenia. Ochrona gleb przed degradacją została uwzględniona w wielu dokumentach i deklaracjach, w tym w deklaracji przyjętej na Szczycie Ziemi w Rio de Janeiro w 1992 r., Tematycznej Strategii Ochrony Gleb UE z 2003 r. i Strategii Zrównoważonego Rozwoju obowiązującej w Polsce od 2001 r. (5). Głównymi zagrożeniami dla żyzności gleb w Polsce są: wyraźny spadek zawartości materii organicznej, erozja wodna i wietrzna, spadek bioróżnorodności oraz zanieczyszczenia ze źródeł lokalnych i rozproszonych.

Podstawowym wskaźnikiem żyzności gleby jest zawartość próchnicy, która stabilizuje jej strukturę, zmniejsza podatność gleby na zagęszczenie oraz erozję, sprzyja gromadzeniu wody łatwo dostępnej dla roślin. Z mineralizacją glebowej materii organicznej wiąże się również zwiększona emisja CO₂ do atmosfery, co nasila efekt cieplarniany. Czynniki te powodują, że zawartość próchnicy w glebach jest powszechnie traktowana jako ważny wskaźnik poprawności gospodarowania w rolnictwie (10).

Spadek zawartości glebowej materii organicznej związany jest z takimi działaniami, jak:

- uproszczanie zmianowań;
- zaniechanie uprawy roślin wieloletnich (traw lub ich mieszanek z roślinami bobowatymi drobnonasiennymi pozostawiającymi dużą ilość biomasy w formie resztek roślinnych);

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

- zaniechanie uprawy międzyplonów z przeznaczeniem na zielony nawóz;
- brak stosowania nawozów naturalnych w gospodarstwach bezinwentarzowych;
- zmiana stosunków wodnych gleb spowodowana odwodnieniami melioracyjnymi;
- technika uprawy roli – uprawa płużna.

Z żyznością gleby wiąże się nierozzerwalnie życie biologiczne. Organizmy glebowe (bakterie, promieniowce, grzyby oraz dżdżownice) pełnią wiele bardzo ważnych funkcji w środowisku, wśród których najważniejszą jest rozkład resztek pozbiorowych roślin uprawnych, w tym słomy. W wyniku ich działalności uwalniane są mineralne formy składników odżywczych dla roślin. W rezultacie przemian mikrobiologicznych tworzona jest również próchnica glebowa, której zawartość jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o zdolności gleby do magazynowania wody (retencja glebowa) i jej zasobności w składniki pokarmowe (zawiera ona ok. 6% azotu, 1,2% fosforu, 0,9% siarki oraz wiele mikroelementów niezbędnych dla roślin) (16).

W ostatnich latach, z uwagi na postępujące zmiany klimatu i konieczność ochrony gleby przed degradacją, zadania uprawy roli uległy pewnemu przewartościowaniu i polegają w szczególności na:

- gromadzeniu wody (retencja glebowa) i ograniczeniu bezproduktywnych jej strat;
- zwiększeniu biologicznej aktywności gleby;
- ograniczeniu nasilenia erozji wodnej i wietrznej;
- wymieszaniu z glebą resztek poźniwnych rośliny przedplonowej oraz nawozów naturalnych, organicznych i mineralnych;
- osiągnięciu optymalnego zagęszczenia oraz poprawie jej struktury;
- stworzeniu warunków do uzyskania szybkich i wyrównanych wschodów oraz ograniczaniu konkurencji ze strony chwastów i samosiewów rośliny przedplonowej, szczególnie w początkowym okresie wzrostu rośliny uprawnej (23).

Obecnie w rolnictwie wyróżniamy zasadniczo trzy systemy uprawy roli:

- tradycyjny – plużny (orkowy);
- bezorkowy – bezplużny, pług zastępowany jest tu innymi narzędziami uprawowymi, np. broną talerzową, kultywatorem ścierniskowym, spulchniaczem obrotowym;
- uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni, tj. siew w rolę nieuprawioną – od zbioru przedplonu do wysiewu rośliny następczej nie wykonuje się żadnych zabiegów uprawowych.

W polskim rolnictwie dominuje tradycyjny – plużny system uprawy roli. Do jego zalet należy m.in. głębokie przykrycie osypanych nasion chwastów i nasion rośliny przedplonowej, ograniczanie wzrostu chwastów wieloletnich oraz dokładne przykrycie nawozów naturalnych i organicznych. Ważne jest również równomierne rozmiesz-

czenie składników pokarmowych w warstwie ornej gleby, dobre jej napowietrzenie oraz likwidacja głębokich kolein (19).

Orka jest jednak zabiegiem energo- i kosztochłonnym, a dodatkowo taki system uprawy roli może prowadzić do wielu negatywnych zmian w środowisku glebowym, nasilających się przy obserwowanych zmianach klimatu. Duża głębokość i intensywność spulchniania przyspiesza proces mineralizacji próchnicy, a jej straty po wieloletniej intensywniej uprawie mogą sięgać nawet 50% (8). Ubytek substancji organicznej niekorzystnie oddziałuje na strukturę gleby, pojemność wodną, aktywność biologiczną i obieg składników pokarmowych. Wzrasta również podatność na erozję wodną i wietrzną, szczególnie na dużych polach pozbawionych zadrzewień śródpolnych lub w dużych odległościach od obszarów leśnych, zwiększa się zwięzłość i gęstość gleby, a stosowanie ciężkich ciągników do prac uprawowych często powoduje nadmierne zagęszczenie zarówno ornej, jak i podornej warstwy gleby. Po orce konieczne jest doprowadzenie roli, a przyorane nasiona chwastów i zainfekowane resztki poźniwne są w następnym roku wyorywane na powierzchnię pola (3, 20).

Znaczna degradacja środowiska glebowego spowodowana przez intensywne oddziaływanie maszyn i narzędzi uprawowych wręcz wymusza poszukiwanie nowych technik uprawy sprzyjających ochronie gleby i bioróżnorodności oraz odtwarzaniu naturalnych biocenoz na obszarach o intensywnej produkcji rolnej. Dodatkowo z uwagi na narastający w ostatnich latach w skali światowej deficyt energii oraz systematyczny wzrost cen podstawowych jej nośników, praktyka rolnicza ciągle poszukuje różnych sposobów modyfikacji w uprawie roli i roślin oraz ograniczenia nakładów. Istotne jest tu również zwiększenie efektywności ekonomicznej i energetycznej produkcji rolniczej (18, 21).

W związku z powyższym w wielu krajach UE, w tym również w Polsce, propaguje się w coraz większym zakresie różne techniki bezpługowej uprawy roli, określane mianem uprawy zachowawczej lub konserwującej. Taka uprawa jest koncepcją produkcji rolniczej, której głównym celem jest ochrona środowiska przyrodniczego, wzrost żyzności gleby oraz racjonalne zmniejszenie nakładów bez wyraźnego ujemnego wpływu na plonowanie roślin. Uprawa ta bazuje na wspieraniu naturalnych procesów biologicznych w glebie. Wszelkiego rodzaju zabiegi uprawowe są zredukowane do niezbędnego minimum. Środki produkcji pochodzenia naturalnego lub syntetycznego w bezorkowym systemie uprawy są stosowane w taki sposób, aby nie naruszać procesów odtwarzających życie biologiczne i naturalnej struktury gleby. Taka forma uprawy znakomicie wpisuje się w ochronę środowiska przyrodniczego, sprzyja łagodzeniu skutków zmian klimatu oraz efektywnemu wykorzystaniu zasobów ze szczególnym uwzględnieniem racjonalnego gospodarowania wodą (3). Konserwująca uprawa roli charakteryzuje się następującymi cechami (4):

- długotrwała, znacznie ograniczona intensywność spulchniania roli;
- całoroczne przykrycie powierzchni gleby przez uprawy oraz mulcz z resztek poźniwnych lub roślin okrywowych (międzyplonów);

- zróżnicowane zmianowanie uwzględniające również rośliny bobowate i międzyplony.

Podstawową zaletą uprawy konserwującej jest brak odwracania wierzchniej warstwy gleby, co w praktyce przekłada się na eliminację z uprawy pługa. W zależności od intensywności i głębokości uprawy na powierzchni gleby lub w przypowierzchniowej jej warstwie pozostawione są resztki pozbiorowe rośliny przedplonowej lub międzyplonu.

Definicja konserwującej – zachowawczej uprawy roli nie jest ujednolicona (21):

- w ujęciu amerykańskim to taka uprawa, która w porównaniu z konwencjonalną (płużną) uprawą roli pozostawia na powierzchni gleby przynajmniej 30% resztek roślinnych;
- w ujęciu niemieckim uprawa konserwująca obejmuje tylko te uprawy, których intensywność jest mniejsza od uprawy konwencjonalnej, a większa od zerowej; resztki pozbiorowe są istotnym elementem takiej uprawy;
- w literaturze polskiej – to sposób uprawy z wykorzystaniem mulczowania i mający na celu ochronę gleby przed degradacją oraz zachowanie jej urodzajności.

Podstawowym wymogiem konserwującej uprawy roli jest pozostawienie na powierzchni gleby, również na okres zimy, resztek poźniwnych lub międzyplonów w formie mulczu w celu ochrony przed erozją wodną i wietrzną, poprawy struktury gleby oraz ograniczenia jej zlewności i podatności na zaskorupianie. Takie działania sprzyjają zwiększeniu biologicznej aktywności gleby i zasiedleniu jej przez różnorodną faunę glebową, w tym głównie dżdżownice. Poprawia się porowatość gleby, co ułatwia wsiąkalność wody w głąb profilu glebowego i ogranicza jej spływy oraz parowanie z powierzchni pola. Ważne dla konserwującej uprawy roli są poniższe elementy:

- stosowanie narzędzi uprawowych, które jedynie spulchniają wierzchnią warstwę gleby, ale jej nie odwracają;
- ograniczenie do niezbędnego minimum liczby i głębokości zabiegów uprawowych;
- osiągnięcie optymalnego zagęszczenia poszczególnych warstw gleby z płynnym przejściem warstwy uprawnej w podglebie.

Zaletą uprawy konserwującej jest mniejsze zużycie paliwa, a co za tym idzie mniejsze koszty i emisja CO₂ oraz większa wydajność pracy (21).

Interesującym rozwiązaniem w polowej produkcji roślinnej ostatnich lat jest uprawa pasowa. Polega ona na spulchnianiu pasa gleby wzdłuż przyszłych rzędów rośliny uprawnej, a po pasowym spulchnieniu (nawet do 30 cm) wykonuje się nawożenie i siew nasion. Oczywiście wszystkie te zabiegi można przeprowadzić w trakcie jednego przejazdu zestawem składającym się z maszyny spulchniającej glebę, siewnika i aplikatora umożliwiającego rzędowe (zlokalizowane) stosowanie nawozu. Taki system uprawy wykorzystywany jest w szczególności pod rośliny uprawiane w szerokich

rzędach, np. pod kukurydzę, rzepak, burak cukrowy, słonecznik, a ostatnio nawet pod zboża i rośliny bobowate.

Uprawa pasowa, w której tylko niewielka część gleby jest uprawiana, charakteryzuje się następującymi zaletami (21):

- gromadzenie węgla organicznego oraz małe zagrożenie erozją wodną i wietrzną;
- zminimalizowanie bezproduktywnych strat wody, gdyż mniejsze jest parowanie z gleby pokrytej mulczem i tylko częściowo uprawianej;
- zachowanie właściwej struktury gleby;
- przeciwdziałanie ugniataniu (zagęszczeniu) wskutek przejazdu maszyn i narzędzi uprawowych – lepsza nośność gleby;
- zoptymalizowane nawożenie i bardziej efektywne wykorzystanie składników pokarmowych przez rośliny uprawne (nawożenie wgłębnе);
- zdecydowanie mniejsze nakłady energetyczne (zużycie paliwa) i czasu pracy w porównaniu z uprawą tradycyjną;
- dotrzymanie terminów agrotechnicznych podczas spiętrzenia prac polowych – podczas jednego przejazdu roboczego wykonuje się uprawę roli, wysiewa się nawozy i siewa nasiona, a w przypadku zbóż – ziarniaki.

W wielu gospodarstwach, a nawet całych rejonach kraju dominuje system produkcji oparty jedynie na uprawie roślin technologicznie podobnych, tj. zbóż, kukurydzy i rzepaku, a ok. 56% gospodarstw nie prowadzi żadnej produkcji zwierzęcej (14). W związku z powyższym, szczególnie ze względu na utrzymanie zrównoważonego bilansu próchnicy w glebie oraz poprawę życia biologicznego, konieczne staje się stosowanie odpowiedniego poziomu nawożenia nawozami naturalnymi i organicznymi.

Z badań przeprowadzonych m.in. przez IUNG-PIB w Puławach jednoznacznie wynika, że saldo bilansu glebowej materii organicznej jest ujemne i na poziomie kraju wynosi ok. $-200 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ gruntów ornych. Jest ono zróżnicowane regionalnie, a wynika to ze struktury zasiewów oraz poziomu produkcji roślinnej i zwierzęcej, co bezpośrednio przekłada się na ilość nawozów naturalnych i organicznych. Stwarza to określone problemy agrotechniczne, przyrodnicze i środowiskowe. W związku z powyższym dla utrzymania zrównoważonego bilansu próchnicy w glebie konieczne jest przyzorywanie/stosowanie pewnej ilości słomy. Wielkość ta jest zróżnicowana regionalnie, natomiast w skali całego kraju powinno się w ten sposób zagospodarować rocznie około 8–10 mln ton słomy zbóż, rzepaku, kukurydzy i roślin bobowatych (11, 15).

Istotnym kryterium oceny różnych wariantów konserwującej uprawy roli (uprawa bezorkowa, uprawa zerowa, uprawa pasowa) stosowanych systematycznie w dłuższym okresie czasu jest określenie ich wpływu na niektóre chemiczne właściwości gleby, w tym zawartość węgla organicznego. Wieloletnie badania dotyczące wpływu różnych wariantów konserwującej uprawy roli na kształtowanie zawartości próchnicy wskazują jednoznacznie na znaczne nagromadzenie materii organicznej w powierzchniowej

warstwie gleby, co sprzyja intensywnemu rozwojowi mikroorganizmów glebowych (zwiększa się biologiczna aktywność gleby), ale jednocześnie może prowadzić do przejściowej immobilizacji azotu. Jednak po rozłożeniu materii organicznej (resztek pozbiorowych roślin uprawnych lub międzyplonu), w wyniku zwiększonej aktywności biologicznej gleby azot przechodzi ponownie w formy dostępne dla roślin. Po kilku latach stosowania takiej uprawy w górnych warstwach gleby ustala się nowy stan równowagi pomiędzy zwiększoną zawartością węgla organicznego i formami mineralnymi azotu (1, 6).

Celem opracowania jest przedstawienie znaczenia konserwującej uprawy roli w kształtowaniu żyzności gleby. Podstawowe źródła informacji stanowiły wyniki badań różnych autorów oraz własnych, prezentowane w literaturze.

Chemiczne właściwości gleby

Wieloletnie badania przeprowadzone przez różnych autorów (1, 7, 13) wskazują, że stosowanie konserwującej uprawy roli przyczynia się do podwyższenia zawartości węgla organicznego oraz azotu ogólnego w górnych warstwach gleby. Zwiększa się również zawartość przyswajalnego fosforu, potasu i magnezu w porównaniu z wartościami stwierdzonymi w warunkach tradycyjnej – płużnej uprawy roli. Podobne zależności stwierdzono również w badaniach Lenarta i Sławińskiego (12) (tab. 1) oraz Księżaka i in. (9) (tab. 2).

Tabela 1

Wpływ 33-letniej uprawy płużnej i siewu bezpośredniego na wybrane chemiczne właściwości gleby

Warstwa gleby	Uprawa	C _{org.}	N _{og.}	C:N	P	K	Mg
		g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹		
0–10	pluźna	10,7 ^{a*}	1,17 ^a	9,1 ^a	87,1 ^a	234 ^a	78,1 ^a
	siew bezpośredni	14,7 ^b	1,53 ^b	9,6 ^a	130,8 ^b	325 ^b	103,2 ^b
10–20	pluźna	10,1 ^a	1,12 ^a	9,0 ^a	81,4 ^a	153 ^a	77,9 ^a
	siew bezpośredni	11,7 ^b	1,31 ^b	8,9 ^a	99,3 ^b	157 ^b	88,8 ^a

*wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Lenart i Sławiński, 2010 (12)

Tabela 2

Wpływ różnych sposobów przedsięwzięcia przygotowania pola pod kukurydzę na wybrane chemiczne właściwości gleby (Grabów, jesień 2012)

Następstwo roślin/sposób uprawy roli	Warstwa gleby (cm)	pH _{KCl}	Zawartość makroelementów (mg·kg ⁻¹)			Zawartość próchnicy (g·kg ⁻¹)	Azot ogólny (g·kg ⁻¹)
			P	K	Mg		
Monokultura – siew bezpośredni	0–10	6,06 ^a	84,6 ^c	168 ^c	33,5 ^c	8,3 ^b	0,74 ^b
	10–20	6,12 ^a	78,9 ^b	120 ^b	25,5 ^b	7,5 ^a	0,64 ^a
	20–30	6,31 ^b	75,4 ^a	82,2 ^a	19,7 ^a	7,0 ^a	0,59 ^a
	średnia	6,16	79,6	123	26,3	7,6	0,66
Monokultura – pełna uprawa roli	0–10	6,63 ^a	109 ^a	56,4 ^a	22,6 ^a	7,3 ^a	0,61 ^a
	10–20	6,83 ^b	109 ^a	52,3 ^a	23,3 ^a	7,7 ^a	0,62 ^a
	20–30	6,97 ^b	114 ^b	73,9 ^b	24,9 ^b	7,8 ^a	0,61 ^a
	średnia	6,81	111	60,9	23,6	7,6	0,61
Zmianowanie – pełna uprawa roli	0–10	5,58 ^a	79,4 ^a	60,6 ^a	20,8 ^a	7,2 ^a	0,60 ^a
	10–20	6,06 ^b	84,6 ^b	58,9 ^a	21,5 ^a	7,5 ^a	0,64 ^b
	20–30	6,12 ^b	78,9 ^a	61,4 ^a	25,5 ^b	8,3 ^b	0,64 ^b
	średnia	5,92	81,0	60,3	22,6	7,7	0,63

*wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Książak i in., 2018 (9)

Powyższe wyniki dobrze korespondują z wynikami badań uzyskanymi przez Smagacza (22) w doświadczeniach zlokalizowanych w Rolniczych Zakładach Doświadczalnych IUNG-PIB, tj. Kępa-Puławy na glebie ciężkiej i Baborówko na glebie średniej. Oceniając podstawowe chemiczne właściwości gleby (lata badań 2017–2020) w zależności od systemu uprawy roli, udowodniono wzrost zawartości glebowej materii organicznej wraz z postępującymi uproszczeniami w uprawie roli (uprawa bezorkowa i pasowa oraz siew bezpośredni), zasadniczo w warstwie gleby 0–5 cm, w porównaniu z uprawą płużną. Zarówno w doświadczeniu prowadzonym na Kępie w Puławach (11–14 rok trwania doświadczenia polowego), jak i w eksperymencie polowym założonym jesienią 2000 r. w RZD Baborówko udowodniono takie zależności. Jednocześnie stwierdzono, że zawartość przyswajalnego fosforu i potasu w systemie płużnym kształtowała się na zbliżonym poziomie w poszczególnych warstwach gleby (efekt mieszania podczas orki), natomiast w systemie uprawy bezorkowej oraz w siewie bezpośrednim w szczególności istotnie wyższe wartości badanych cech udowodniono w warstwie gleby 0–5 cm (tab. 3–10).

Tabela 3

Zawartość próchnicy (%) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Kępa-Puławy, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	pasowy	
0–5	2,26	3,14	3,05	2,82
5–15	2,32	2,38	2,84	2,51
15–30	2,29	2,28	2,89	2,49
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 0,11; warstwy gleby – 0,18				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 4

Zawartość przyswajalnego fosforu (mg P·kg⁻¹ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Kępa-Puławy, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	pasowy	
0–5	85	110	159	118
5–15	90	96	140	109
15–30	83	86	119	96
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 24; warstwy gleby – 26				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 5

Zawartość przyswajalnego potasu (mg K·kg⁻¹ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Kępa-Puławy, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	pasowy	
0–5	197	265	336	266
5–15	181	231	264	225
15–30	180	202	165	182
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 42; warstwy gleby – 35				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 6

Zawartość przyswajalnego magnezu ($\text{mg Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Kępa-Puławy, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	pasowy	
0–5	182	196	195	191
5–15	184	209	200	198
15–30	189	210	199	199
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – ni; warstwy gleby – ni				

ni – różnice nieistotne

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 7

Zawartość próchnicy (%) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Baborówko, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	zerowy	
0–5	1,58	2,18	2,23	2,00
5–15	1,58	1,86	1,69	1,71
15–30	1,52	1,24	1,20	1,32
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 0,16; warstwy gleby – 0,15				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 8

Zawartość przyswajalnego fosforu ($\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Baborówko, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	plużny	bezorkowy	zerowy	
0–5	126	115	140	127
5–15	135	135	129	133
15–30	150	178	149	159
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 19; warstwy gleby – 22				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 9

Zawartość przyswajalnego potasu ($\text{mg K} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Baborówko, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	płużny	bezorkowy	zerowy	
0–5	167	221	235	208
5–15	162	184	197	181
15–30	179	125	139	148
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 33; warstwy gleby – 36				

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Tabela 10

Zawartość przyswajalnego magnezu ($\text{mg Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby) po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej po rzepaku w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (RZD Baborówko, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby	System uprawy roli			Średnia
	płużny	bezorkowy	zerowy	
0–5	90	80	62	77
5–15	91	91	81	88
15–30	93	109	92	98
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 12; warstwy gleby – ni				

ni – różnice nieistotne

Źródło: Smagacz, 2020 (22)

Wilgotność gleby

Stabilna struktura gleby w wieloletniej uprawie konserwującej stwarza lepsze warunki dla wzrostu i rozwoju roślin w przeciągu całej wegetacji niż uprawa konwencjonalna. Uprawa bezpłużna bez warstwy ochronnej (mulczu), pozostawiając glebę w stanie znacznego zagęszczenia, stwarza korzystniejsze warunki wilgotnościowe tylko w krótkim okresie po wystąpieniu opadów. Po dłuższym okresie bezdeszczowym woda nagromadzona w powierzchniowych warstwach gleby paruje szybciej. W warunkach dużej ilości mulczu natomiast na powierzchni pola obserwuje się w pierwszych latach stosowania uprawy bezpłużnej wyższą wilgotność górnych warstw gleby w porównaniu z wilgotnością stwierdzoną w tradycyjnej uprawie płużnej. Większość badań z tego zakresu wskazuje na korzystne oddziaływanie bezpłużnych systemów uprawy roli, a szczególnie siewu bezpośredniego, na zwiększenie zawartości wody zwłaszcza w górnych warstwach profilu glebowego (1, 13).

Zmniejszenie zagęszczenia wierzchniej warstwy gleby oraz duża warstwa mulczu w uprawie konserwującej warunkują lepszą dostępność wody. W zależności od ilości doprowadzonej materii organicznej i klimatu wzrost substancji organicznej może wynosić 0,2% rocznie. Każdy 1% substancji organicznej może magazynować 150 m³ wody·ha⁻¹. Rośliny okrywowe redukują straty wody o ok. 30% w porównaniu z uprawą płuźną (10).

Przeprowadzone przez Czyż i in. (2) badania dotyczące oceny wilgotności gleby w różnych systemach uprawy roli wskazują, że siew bezpośredni istotnie podwyższał średnie wartości wilgotności w warstwie gleby 0–35 cm w porównaniu z uprawą tradycyjną. Zastosowanie techniki siewu bezpośredniego wpłynęło szczególnie korzystnie na wzrost wilgotności gleby na głębokości 0–5 cm. Podobne zależności zanotowano również w przypadku systemu uprawy uproszczonej w porównaniu z obiektem z płuźną uprawą roli (tab. 11). Do podobnych wniosków doszli również Jaskulski i in. (7) (tab. 12) oraz Małecka i in. (13) (tab. 13.)

Tabela 11

Wpływ systemu uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% obj.)

Warstwa gleby	System uprawy roli		
	płuźny	uproszczony	siew bezpośredni
0–5	24,9	24,9	27,3
5–10	24,1	25,1	25,3
10–15	22,7	24,3	24,4
20–25	23,5	23,6	25,6
30–35	23,3	24,2	25,7

Źródło: Czyż i in., 2010 (2)

Tabela 12

Wilgotność gleby (% wag.) w warstwie gleby 0–30 cm przed siewem i w okresie wegetacji kukurydzy w zależności od przedplonu i sposobu uprawy roli

Uprawa roli	Przedplon			Średnia
	pszenica ozima	jęczmień jary	kukurydza	
Przed siewem				
Pluźna	11,4	11,6	11,5	11,5
Bezorkowa głęboka	11,3	11,8	11,9	11,7
Bezorkowa płytka	11,9	12,1	13,5	12,5
Średnia	11,5	11,9	12,3	-
NIR _(0,05) dla: przedplonu – r.n.; uprawy roli – 0,25; interakcji – 0,52				

cd. tab. 12

Uprawa roli	Przedplon			Średnia
	pszenica ozima	jęczmień jary	kukurydza	
Faza BBCH 32-37				
Plużna	9,3	9,4	9,9	9,5
Bezorkowa głęboka	9,5	9,6	9,7	9,6
Bezorkowa płytka	10,4	10,3	10,3	10,3
Średnia	9,7	9,8	10,0	-
NIR _(0,05) dla: przedplonu – r.n.; uprawy roli – 0,36; interakcji – r.n.				

r.n. – różnice nieistotne

Źródło: Jaskulski i in., 2015 (7)

Tabela 13

Wilgotność, gęstość objętościowa gleby oraz kapilarna pojemność wodna w zależności od systemu uprawy roli (średnio 2010–2011)

System uprawy roli	Wilgotność gleby (% obj.)		Gęstość objętościowa (g·cm ⁻³)		Kapilarna pojemność wodna (%)	
	warstwa gleby (cm)					
	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20
Tradycyjny	15,3	17,9	1,46	1,66	37,6	30,2
Uproszczony	17,2	19,8	1,54	1,57	34,8	31,9
Siew bezpośredni	19,5	20,3	1,61	1,59	31,2	32,3
NIR _(0,05)	1,15	1,64	0,05	0,06	1,24	1,25

Źródło: Małecka i in., 2012 (13)

Z badań przeprowadzonych przez R ó ż n i a k a (17) na glebie brunatnej właściwej (klasa bonitacyjna II i IIIa) wynika, że wpływ późniejszej i podstawowej uprawy roli na wilgotność wierzchniej warstwy gleby bezpośrednio przed siewem był zróżnicowany w kolejnych latach badań. W każdym roku wilgotność gleby na głębokości 0–5 cm płytko uprawionej po zbiorze przedplonu lub zmulczowanej słomą i oczekującej na uprawę pasową z jednoczesnym nawożeniem i siewem była istotnie większa niż gleby uprawianej płużnie i bezpłużnie przygotowanej do siewu pszenicy ozimej. Średnio, niezależnie od zróżnicowania w latach, stwierdzono, że większa wilgotność gleby występowała pod mulczem w systemie uprawy pasowej (strip-till), aniżeli w uprawie płużnej i bezpłużnej oraz w przypadku gleby bez uprawy późniejszej w porównaniu z talerzowaniem ścierniska. Dodatkowo korzystny wpływ mulczowania bez uprawy późniejszej wystąpił jedynie na obiekcie z uprawą pasową, a nie ujawnił się po wykonaniu podstawowej uprawy płużnej i bezpłużnej (tab. 14).

Tabela 14

Wilgotność gleby łóża siewnego 0–5 cm (% wag.) w zależności od późniejszej
i podstawowej uprawy roli

Uprawa późniwna – II	Uprawa podstawowa – I			Średnia
	plużna	bezużna	strip-till	
2013/2014				
Uprawa	11,6	10,7	15,2	12,5
Brak	11,4	11,7	16,3	13,1
Średnia	11,5	11,2	15,8	-
NIR _(0,05) dla: I = 0,92; II = ni; II/I = ni; I/II = ni				
2014/2015				
Uprawa	5,4	5,2	9,6	6,7
Brak	6,5	5,5	11,3	7,8
Średnia	6,0	5,4	10,5	-
NIR _(0,05) dla: I = 0,56; II = 0,31; II/I = 0,53; I/II = 0,73				
2015/2016				
Uprawa	8,5	9,0	14,6	10,7
Brak	8,7	8,3	15,8	10,9
Średnia	8,6	8,7	15,2	-
NIR _(0,05) dla: I = 0,96; II = ni; II/I = 0,41; I/II = 1,03				
20113/2014–2015/2016				
Uprawa	8,5	8,3	13,1	10,0
Brak	8,9	8,5	14,5	10,6
Średnia	8,7	8,4	13,8	-
NIR _(0,05) dla: I = 0,75; II = 0,39; II/I = 0,67; I/II = 0,95				

ni – różnice nieistotne

Źródło: Różniak M., 2016 (17)

Wyniki badań własnych przeprowadzonych na różnych glebach i w zróżnicowanych siedliskach potwierdzają tezę o korzystnym oddziaływaniu uprawy konserwującej (system bezorkowy, uprawa pasowa, uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni) na kształtowanie wilgotności gleby i jej dostępności dla roślin uprawnych (tab. 15–17).

Tabela 15

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% obj.)
(RZD Kępa-Puławy, średnie z 5 terminów pomiarów, 2018 r.)

Głębokość (cm)	Uprawa roli		
	płużna	bezorkowa	pasowa
10	10,2 ^a	13,0 ^b	12,9 ^b
20	11,5 ^a	14,0 ^b	15,7 ^c
30	16,8 ^a	16,8 ^a	17,1 ^a
0–30	12,8 ^a	14,6 ^b	15,0 ^b

*wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Smagacz, 2018 (21)

Tabela 16

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% obj.)
(gospodarstwo indywidualne w Rogowie, średnie z 5 terminów pomiarów, 2013 r.)

Uprawa roli	Głębokość (cm)						Średnia
	10	20	30	40	60	100	
Płużna	15,4	6,8	7,6	7,7	14,4	24,9	12,8
Bezorkowa	15,3	8,4	10,0	8,7	13,3	31,3	14,5
Zerowa	14,5	10,2	10,0	9,9	18,1	33,7	16,0

Źródło: Smagacz, 2018 (21)

Tabela 17

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% obj.)
(SD Jelcz-Laskowice, średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby (cm)	Uprawa roli		
	płużna	bezorkowa	zerowa
0–5	10,7 ^a	12,4 ^b	14,8 ^c
5–10	12,5 ^a	14,4 ^b	14,5 ^b
10–15	13,5 ^a	15,2 ^b	14,0 ^{ab}
30–35	9,8 ^a	11,3 ^b	9,9 ^a

*wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Smagacz, 2018 (21)

Podsumowanie

W dobie zmieniającego się klimatu oraz nowych wyzwań w rolnictwie dbałość o żyzność i urodzajność gleb jest zadaniem priorytetowym. We współczesnym rolnictwie uprawa roli, obok oddziaływania na wielkość i stabilność plonów, powinna również stwarzać warunki do wzrostu lub co najmniej utrzymania na odpowiednim poziomie żyzności gleby oraz ograniczać ujemne oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze. Powinna być preferowana konserwująca uprawa roli (systemy bezorkowe, uprawa pasowa, siew bezpośredni) polegająca na stosowaniu uproszczeń uprawowych z mulczowaniem powierzchni gleby resztkami poźniwnymi i międzyplonami. Pozostawienie resztek pozbiorowych roślin w połączeniu z ograniczeniem intensywności uprawy sprzyja bowiem gromadzeniu węgla organicznego, co przyczynia się do zwiększenia retencji glebowej i korzystnie wpływa na strukturę gleby oraz jej biologiczną aktywność. Następuje również zdecydowane ograniczenie nasilenia procesów erozyjnych (erozja wodna i wietrzna) oraz zmniejszenie jednostkowych kosztów produkcji poprzez mniejsze zużycie paliwa i zwiększoną wydajność pracy ludzkiej i uprzedmiotowionej.

W związku z powyższym istnieje pilna potrzeba wdrożenia do szerokiej praktyki rolniczej uzyskanych dotychczas wyników badań naukowych oraz prac badawczo-rozwojowych nad produkcyjno-ekonomicznymi i środowiskowymi konsekwencjami uproszczeń w uprawie roli. Takie rozwiązania mogą być skutecznie wdrażane, szczególnie w gospodarstwach rolnych specjalizujących się między innymi w produkcji zbóż, rzepaku, kukurydzy i roślin bobowatych. Jest ku temu dobra okazja, bowiem Plan Strategiczny dla Wspólnej Polityki Rolnej na lata 2023–2027 zakłada wsparcie rolnictwa m.in. poprzez ekoschematy. Jest to nowy prośrodowiskowy element płatności bezpośrednich, które są obowiązkowe dla państwa członkowskiego, ale dobrowolne dla rolnika. Można tu skorzystać m.in. z Ekoschematu – Rolnictwo węglowe i zarządzanie składnikami odżywczymi: praktyka – Uproszczone systemy uprawy oraz praktyka – Wymieszanie słomy z glebą. Należy zaznaczyć, że gospodarstwa rolne bazujące na posiadanym aktualnie sprzęcie nie mogą wprowadzać drastycznych zmian w poźniwnym i przedsięwziętym przygotowaniu pola pod zasiew, ponieważ mogą one prowadzić do znacznego wzrostu zachwaszczenia roślin uprawnych, głównie chwastami wieloletnimi. Wskazana jest tu także odpowiednia wiedza fachowa samych rolników, ponieważ wszelkie zaniedbania dotyczące stosowania uproszczeń w uprawie roli prowadzą do drastycznego zmniejszenia plonów i pogorszenia się ekonomicznej opłacalności produkcji.

Wydaje się, że w wyniku zastosowania na szerszą skalę optymalnych rozwiązań technologicznych w zakresie uprawy roli, szczególnie w dużych, specjalistycznych gospodarstwach towarowych, wyróżniających się na tle innych zastosowaniem wszelkich innowacji, rolnictwo w Polsce może w znacznym stopniu przyczynić się zarówno do ochrony rolniczej przestrzeni produkcyjnej, jak i zachowania walorów ekologicznych przyrodniczo cennych obszarów krajobrazowych.

Literatura

1. Blecharczyk A., Małecka I., Sierpowski J.: Wpływ wieloletniego oddziaływania systemów uprawy roli na fizyko-chemiczne właściwości gleby. *Fragmenta Aronomica*, 2007, **1(93)**: 7-13.
2. Czyż E., Dexter A.R., Włodek S., Biskupski A., Niedźwiecki J.: Ocena wybranych fizycznych właściwości gleby w różnych systemach uprawy roli. W.: *Produkcyjne i siedliskowe skutki stosowania różnych systemów uprawy roli. Raport z tematu badawczego nr 2.3.2, IUNG-PIB Puławy*, 2010, ss. 8-21.
3. Dzienia S., Zimny L., Weber R.: Najnowsze kierunki w uprawie roli i technice siewu. *Fragmenta Agronomica*, 2006, **2**: 227-241.
4. Friedrich T., Kienzle J., Eppelein J., Basch G.: *Schonende Bodenbearbeitung*, Verlag DLG; *Konservierende Bodenbearbeitung*, 2008, p. 55-77.
5. Gonet S.: Materia organiczna w tematycznej strategii ochrony gleb w Unii Europejskiej. *Roczniki Gleboznawcze*, 2007, **58(3/4)**: 15-26.
6. Jankowiak J., Małecka I.: Uproszczenia uprawowe w zrównoważonym rozwoju rolnictwa. W: *Z badań nad rolnictwem społecznie zrównoważonym (6)*. IERiGŻ-PIB Warszawa 2008, **102**: 87-113.
7. Jaskulski D., Jaskulska I., Janiak A., Boczkowski T.: Changes in some soil properties under the effect of diversified tillage for maize depending on the forecrop. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 2015, **14(3)**: 61-71.
8. Kinsella J.: The effect of various tillage systems in soil compaction. *Farming for a better environment, a white paper*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA, 1995, p. 15-17.
9. Książak J., Bojarszczuk J., Staniak M.: Comparison of maize yield and soil chemical properties under maize (*Zea mays* L.) grown in monoculture and crop rotation. *Journal of Elementology*, 2018, **23(2)**: 531-543.
10. Kuś J.: Glebowa materia organiczna – znaczenie, zawartość i bilansowanie. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2015, **45(19)**: 27-53.
11. Kuś J., Madej A.: Zagospodarowanie słomy a bilans glebowej materii organicznej. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2017, **4(90)**: 40-57.
12. Lenart S., Sławiński P.: Wybrane właściwości gleby oraz występowanie dżdżownic w warunkach siewu bezpośredniego i płuźnej uprawy roli. *Fragmenta Agronomica*, 2010, **4**: 86-93.
13. Małecka I., Swędryńska D., Blecharczyk A., Dytman-Hagedorn M.: Wpływ systemów uprawy roli pod groch na właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby. *Fragmenta Agronomica*, 2012, **29(4)**: 106-116.
14. Matyka M., Kopiński J., Madej A., Krasowicz S.: Zmiany w produkcji rolniczej na tle uwarunkowań przyrodniczych i polityki Unii Europejskiej. W: *Polska wieś i rolnictwo – 20 lat w Unii Europejskiej*, P. Chmieliński, G. Gorzelak (red.). Wyd. IRWIR-PAN, 2023 (w druku).
15. Pałosz T.: Rolnicze i środowiskowe znaczenie próchnicy glebowej i metodyka jej bilansu. Wyd. Śródkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego Ochrony Środowiska, 2009, **11**: 329-338.
16. Piłkula D.: Wpływ wieloletniego nawożenia słomą na plonowanie roślin i żyzność gleby. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2015, **45(19)**: 85-96.
17. Różniak M.: Ocena możliwości uprawy pszenicy ozimej w technologii stripp-till. *Rozprawa doktorska*, Bydgoszcz, 2016, ss. 97.
18. Smagacz J.: Produkcyjno-ekonomiczne i środowiskowe skutki różnych systemów uprawy roli. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2012, **29(3)**: 121-134.
19. Smagacz J.: Uprawa roli jako element zrównoważenia środowiskowego produkcji roślinnej. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2015, **43(17)**: 89-101.

-
20. S m a g a c z J.: Konsekwencje organizacyjne i środowiskowe różnych systemów uprawy roli. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2016, **47(1)**: 139-153.
 21. S m a g a c z J.: Konserwująca uprawa roli – tendencje rozwoju i znaczenie we współczesnym rolnictwie. *Monografie i Rozprawy Naukowe*, 2018, 59, ss. 126.
 22. S m a g a c z J.: Wpływ długotrwałego stosowania słomy i obornika na obieg węgla organicznego, jakość próchnicy oraz żyzność i urodzajność gleb. *Raport Końcowy z tematu badawczego nr 3.18*, Puławy, 2020, s. 77.
 23. S m a g a c z J.: Kierunki rozwoju różnych systemów uprawy roli w warunkach zmieniającego się klimatu. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2020, **62(16)**: 149-167.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Janusz Smagacz, prof. IUNG-PIB
Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 47 86 804
e-mail: Janusz.Smagacz@iung.pulawy.pl

AUTOR

Janusz Smagacz

ORCID

0000-0003-4322-3178

Piotr Skowron, Damian Wach

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

**ZAPOBIEGANIE ZANIECZYSZCZENIOM ZASOBÓW WÓD
PRZEZ NAWOZY WYKORZYSTYWANE W PRAKTYCE ROLNICZEJ***

Słowa kluczowe: plan nawożenia, azot, fosfor, zanieczyszczenie wód, nawozy mineralne, nawozy naturalne

Wstęp

Jednym z założeń zrównoważonego rolnictwa jest racjonalne gospodarowanie nawozami, uwzględniające zarówno odpowiednie zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe, jak i ograniczenie oddziaływania na środowisko. Prawidłowe stosowanie nawozów mineralnych, naturalnych i organicznych jest nieodzowne w celu osiągnięcia wysokich plonów o odpowiednich parametrach jakościowych oraz poprawy żyzności gleby. Niewłaściwe postępowanie z nawozami może powodować rozproszenie wnoszonych wraz z nimi składników pokarmowych do wód gruntowych, powierzchniowych i atmosfery, a także degradację innych parametrów środowiska glebowego, takich jak np. odczyn, zasobność w składniki pokarmowe i materię organiczną czy strukturę. W pracy przedstawiono metody ograniczania zanieczyszczeń wód biogenami pochodzącymi z nawozów stosowanych w produkcji rolnej na różnych etapach zarządzania tymi środkami produkcji, począwszy od zasad sporządzania planu nawożenia, poprzez sposoby ich przechowywania, a do i stosowania.

Plan nawożenia

Plan nawożenia to najważniejsze narzędzie gospodarowania podstawowymi składnikami pokarmowymi NPK w produkcji roślinnej. Opracowany zgodnie z zasadami

*Opracowanie wykonano w ramach zadania I.1. pt. „Nawożenie użytków rolnych” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

dobrej praktyki, uwzględnia zarówno plonotwórczy i ekonomiczny aspekt nawożenia (realizacja potencjału plonowania i optymalizacja kosztów), jak i jego oddziaływanie na środowisko (łagodzenie presji). Odpowiednio zbilansowane nawożenie pozwala uzyskać wysokie plony roślin, z czym wiąże się duże pobranie składników pokarmowych, a zatem większe ich wykorzystanie z nawozów (4, 6, 12, 22). Badania prowadzone w IUNG-PIB wskazują, że znaczna część rolników stosuje nawozy bez uwzględniania istotnych informacji mających znaczenie dla potrzeb nawozowych roślin (zasobność gleby, poziom plonowania, stosowanie nawozów organicznych i naturalnych). W takiej sytuacji nawozy są stosowane najczęściej w zbyt wysokich dawkach, wpływając przy tym na zwiększenie nawozochłonności produkcji i strat składników pokarmowych lub w dawkach zbyt niskich, powodując zmniejszenie plonów (9, 10).

Najbardziej korzystnym i efektywnym rozwiązaniem, które bierze pod uwagę interesy ekonomiczne rolnika i chroni środowisko jest plan nawożenia oparty na poprawnie zbilansowanych składnikach pokarmowych NPK. Praktyka ta polega na określeniu wymagań pokarmowych roślin na polu (powierzchni z jedną rośliną uprawną o jednakowym potencjale plonowania) i obliczeniu takiej ilości składników pokarmowych, jaka może być przez rośliny pobrana w ciągu całego okresu wegetacyjnego. W systemie rolnictwa zrównoważonego zakłada się, że wnoszenie składników w nawozach powinno być równe ich pobraniu z plonami roślin, a bilans na powierzchni pola powinien być zbliżony do zera. Nadwyżka składnika w bilansie może ulec rozproszeniu do wód lub atmosfery, natomiast deficyt będzie miał swoje konsekwencje w spadku wielkości i jakości plonu roślin uprawnych. W przypadku gleb o niskiej zawartości P i K dopuszcza się dodatni bilans tych pierwiastków w celu utrzymania optymalnej zasobności, a w przypadku gleb o zawartości wysokiej bilans powinien być ujemny, aby zmniejszyć pulę P i K podatną na wymywanie (21). Na podstawie bilansu składników pokarmowych na powierzchni pola opracowuje się plan nawożenia osobno dla każdego składnika pokarmowego NPK. Plan nawożenia jest przygotowywany osobno dla każdego roślinopola w gospodarstwie (powierzchni z jedną rośliną uprawną o jednakowym potencjale plonowania), gdzie stosowane jest nawożenie, z uwzględnieniem podziału na działki rolne, co pozwala na przejrzyste udokumentowanie działań w gospodarstwie na potrzeby analizy i kontroli.

W bilansie na poziomie pola obliczanym powszechnie rekomendowaną metodą OECD po stronie przychodów bierze się pod uwagę ilość składników pokarmowych wprowadzanych wraz z nawozami mineralnymi, naturalnymi i organicznymi, resztkami poźniwnymi i materiałem siewnym. W przypadku azotu dodatkowo uwzględnia się depozycję atmosferyczną, wiązanie biologiczne i mineralizację glebowej materii organicznej. W przypadku fosforu i potasu dodatkowo uwzględnia się klasę zasobności gleby w dany składnik, która jest określana na podstawie analizy próbek gleby. Dla dokładniejszych obliczeń można uwzględnić również zawartość azotu mineralnego ($N_{\min}$) w warstwie 0–60 cm gleby oraz wykorzystać wyniki analiz zawartości NPK

w nawozach naturalnych zamiast danych tabelarycznych. Po stronie rozchodów znajdują się składniki pokarmowe, które są zabierane z powierzchni pola wraz z plonem głównym i ubocznym. Pobranie składników pokarmowych przez rośliny zależy od ich wymagań pokarmowych, to jest od wielkości uzyskiwanych plonów oraz pobrania jednostkowego. Aby precyzyjnie określić ilość NPK, którą należy wprowadzić w nawozach mineralnych, naturalnych i organicznych, trzeba wziąć pod uwagę, że składniki pokarmowe są w różnym stopniu wykorzystywane przez rośliny z nawozów i zastosować do obliczeń odpowiednie równoważniki nawozowe. Ze względu na wysoką mobilność azotu podział jego dawek powinien uwzględniać dynamikę pobierania tego składnika przez poszczególne gatunki roślin, co znacząco zmniejsza ryzyko wymywania i strat gazowych.

Aktualnie obowiązujące w Polsce prawo formułuje wymagania co do planu nawożenia azotem tylko dla gospodarstw spełniających określone kryteria. Zasady przygotowania planu i sposoby dokumentowania działań związanych z nawożeniem azotem są zawarte w załącznikach do rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 31 stycznia 2023 r. w sprawie przyjęcia „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych, oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu” (program azotanowy) (20), a także w opracowaniu „Zbiór zaleceń dobrej praktyki rolniczej mających na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych” (27). Plan nawożenia azotem jest obowiązkowy dla podmiotów, które: prowadzą chów lub hodowlę drobiu powyżej 40 000 stanowisk; chów czy hodowlę świń powyżej 2 000 stanowisk dla świń o wadze ponad 30 kg lub 750 stanowisk dla macior; posiadają gospodarstwo rolne o powierzchni powyżej 100 ha użytków rolnych; uprawiają uprawy intensywne na gruntach ornych na powierzchni powyżej 50 ha lub utrzymują obsadę większą niż 60 dużych jednostek przeliczeniowych (DJP) według stanu średniorocznego oraz które nabywają nawóz naturalny lub produkt pofermentacyjny do bezpośredniego rolniczego wykorzystania w celu nawożenia lub poprawy właściwości gleby od innych podmiotów. Gospodarstwa niespełniające tych kryteriów mają obowiązek stosowania nawozów na podstawie opublikowanych w programie azotanowym maksymalnych dawek azotu dla poszczególnych roślin uprawnych, natomiast plan nawożenia azotem jest dla nich dobrowolny. Do planowania nawożenia fosforem mogą posłużyć się najnowszą publikacją z 2023 r. pt.: „Program ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez związki fosforu ze źródeł rolniczych” (program fosforowy), w której zaproponowano szereg praktyk i zaleceń dotyczących racjonalnego zarządzania fosforem w rolnictwie, w tym opracowania planu nawożenia tym składnikiem (16). Działania te są rekomendowane dla rolników do dobrowolnego stosowania.

Od strony formalnej aktualnie obowiązujący system pozwala na działania skierowane na osiąganie celów redukcyjnych azotu i fosforu, pod warunkiem właściwego ich oszacowania. Możliwe jest to poprzez korekty dawek maksymalnych składników i innych parametrów potrzebnych do obliczenia dawek nawozów, które należałoby

opracować z uwzględnieniem czynników ekonomicznych i środowiskowych. Docelowo system ten powinien dotyczyć wszystkich podstawowych składników nawozowych NPKMg i wapnowania. Istotne jest, aby działania dotyczące zarządzania nawożeniem podejmowane były również przez gospodarstwa, które nie są prawnie zobowiązane do opracowania planu nawożenia azotem.

Plan nawożenia może być opracowywany z zastosowaniem różnych sposobów. Powszechny obecnie dostęp do internetu otwiera nowe możliwości upowszechniania narzędzi do zarządzania składnikami pokarmowymi w gospodarstwach rolnych. W ramach realizowanego w IUNG-PIB projektu INTER-NAW „Budowa efektywnego modelu interaktywnego systemu wspierania decyzji agrochemicznych w celu optymalizacji nawożenia i ochrony wód przed zanieczyszczeniami pochodzenia rolniczego” (GOSPOSTRATEG1/389038/8/NCBR/2018) przygotowano narzędzie informatyczne służące do opracowywania kompleksowych planów nawożenia i wapnowania. Narzędzie jest udostępnione nieodpłatnie poprzez stronę internetową Krajowej Stacji Chemiczno-Rolniczej. Jest ono przystosowane do pracy na komputerach stacjonarnych i urządzeniach mobilnych (jako aplikacja internetowa), z możliwością zainstalowania niezależnej aplikacji na urządzeniu z systemem MS Windows. W systemie InterNAW dawki nawozów NPK są zoptymalizowane z uwzględnieniem rzeczywistych warunków produkcji w gospodarstwie. System w obliczeniach bierze pod uwagę wszystkie źródła składników pokarmowych dostępnych dla roślin w warunkach danego siedliska, czyli zawartość składników pokarmowych w glebie, w zastosowanych nawozach naturalnych, organicznych i innych, w resztkach poźniwnych, przyoranych produktach ubocznych i międzyplonach występujących w zmianowaniu. Program oblicza ponadto nadwyżki bilansowe wszystkich składników pokarmowych NPK, co daje możliwość kontrolowania efektów środowiskowych.

Zarządzanie składnikami pokarmowymi na podstawie kompleksowego planu nawożenia opracowanego zgodnie z aktualnymi analizami zasobności gleby jest wspierane przez Wspólną Politykę Rolną (WPR). W przygotowanym przez Polskę Planie Strategicznym dla WPR na lata 2023–2027 zaproponowano ekoschemat „Rolnictwo węglowe i zarządzanie składnikami odżywczymi”, w którym można realizować praktykę „Opracowanie i przestrzeganie planu nawożenia”. Celem tej praktyki jest właściwe zarządzanie nawożeniem dostosowanym do zasobności gleb w azot, fosfor, potas, magnez i wapń oraz potrzeb roślin z wykorzystaniem analizy gleb i systemów wspomagania decyzji w zakresie nawożenia.

Głównym problemem w powszechnym wdrożeniu planu nawożenia jest stopień skomplikowania obliczeń krok po kroku z wykorzystaniem dostępnych tabel i wzorów, konieczność dostarczenia wielu niezbędnych danych, a także wymóg tworzenia i archiwizowania obowiązkowej dokumentacji. Rozwiązaniem tych problemów jest upowszechnienie prostych w obsłudze i wspomagających użytkownika informatycznych narzędzi doradczych, takich jak system INTER-NAW. Konieczne byłoby też wsparcie wdrożenia pełnego planu nawożenia przez system doradztwa rolniczego

i odpowiednio niski koszt analiz zawartości w glebie składników pokarmowych. W niedalekiej przyszłości można się spodziewać wprowadzenia wymagań prawnych do opracowania planu nawożenia fosforem w podobnym zakresie jak obecnie obowiązujący plan nawożenia azotem.

Wykorzystanie planu nawożenia opartego na bilansie składników pokarmowych na powierzchni pola pozwala na optymalizację dawek nawozów stosowanych w gospodarstwie (1). Najczęściej obserwuje się znaczącą redukcję zużycia nawozów, co w pierwszej kolejności przynosi korzyści ekonomiczne, a w dłuższej perspektywie czasowej istotnie zmniejsza rozproszenie pierwiastków biogenych i poprawia jakość środowiska. Efektywność tej praktyki dla ochrony wód wzrasta kiedy plan nawożenia jest stosowany przez znaczącą większość gospodarstw na określonym obszarze hydrologicznym, geograficznym czy administracyjnym (zlewni cząstkowej, dziale wodnym, zlewisku, regionie). Ponadto, biorąc pod uwagę wymagania dobrej praktyki rolniczej, które uwzględniają zarówno korzyści ekonomiczne, jak i ochronę środowiska, plan nawożenia wszystkimi podstawowymi składnikami pokarmowymi NPK powinien być narzędziem wykorzystywanym przez wszystkie podmioty stosujące nawozy. Należy podkreślić, że praktyka ta powinna być jednym z elementów szerszej strategii, obejmującej też inne części składowe dobrej praktyki rolniczej, takie jak: prawidłowa agrotechnika, prawidłowe postępowanie z nawozami, działania w krajo-
brazie rolniczym przyczyniające się do ograniczenia rozproszenia biogenów. Niestety aktualnie zalecenia nawozowe nie są stosowane przez wszystkich rolników. Niższe dawki nawozów wynikają zarówno z przyczyn ekonomicznych, jak i świadomych decyzji produkcyjnych, w sytuacji gdy priorytetem są działania prośrodowiskowe, a wynik ekonomiczny jest wspierany np. dopłatami w ramach WPR.

Plan nawożenia/zarządzanie nawozami odgrywa kluczową rolę w zmniejszaniu dodatniego salda bilansu składników pokarmowych w rolnictwie. We wszystkich krajach europejskich, które w różnym czasie i w różnym zakresie wprowadziły tę praktykę jako obowiązkową w przepisach prawnych dotyczących rolnictwa zanotowano znaczące zmniejszenie dodatniego salda bilansu składników pokarmowych (1, 2, 7).

Program azotanowy wprowadza szereg działań mających na celu ograniczenie strat azotu z rolnictwa. Efekty tych działań mogą uwidocznić się na przestrzeni co najmniej kilku lat w postaci zmniejszenia koncentracji azotu w wodach podziemnych i powierzchniowych. Całościowa ocena wpływu wprowadzenia planu nawożenia azotem w Polsce jako praktyki redukcyjnej jest obecnie trudna do przeprowadzenia. Program działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu obowiązuje na terenie całego kraju dopiero od lipca 2018 r. W związku z tym ocena działania całego programu będzie możliwa dopiero za kilka lat i należy się jej spodziewać w 2025 r. (13). Na tę chwilę oszacowanie pojedynczej praktyki w programie wydaje się niemożliwe.

Program fosforowy na dzień dzisiejszy stanowi zbiór rekomendacji do dobrowolnego stosowania, tak więc badanie wpływu tych działań na poprawę gospodarki fosforem i zmniejszenie jego strat do wód będzie wymagało w przyszłości przede wszystkim analizy stopnia ich implementacji. Być może konieczne będzie umocowanie dobrych praktyk zarządzania fosforem w obowiązującym prawie.

Prawidłowe stosowanie nawozów

Stosowanie nawozów zgodnie z przepisami prawa i zasadami dobrej praktyki rolniczej ma na celu efektywne wykorzystanie zawartych w nich składników pokarmowych przez rośliny, przy jak najmniejszym rozproszeniu pierwiastków biogenych oraz zminimalizowaniu innych niekorzystnych oddziaływań na środowisko. Obok nawozów mineralnych w rolnictwie mogą być stosowane do celów nawożenia różnego rodzaju substancje zawierające składniki pokarmowe (produkty nawozowe). Zalicza się do nich nawozy naturalne, nawozy organiczne i organiczno-mineralne, środki poprawiające właściwości gleby oraz różnego rodzaju odpady i produkty uboczne (w tym pofermenty z biogazowni i osady ściekowe), spełniające wymagania stawiane tego typu produktom. Główne akty prawne regulujące stosowanie środków nawozowych to: Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (25), Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (18), Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego sposobu stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania (17), Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 stycznia 2023 r. w sprawie przyjęcia „Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu” (20), Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (26) i Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (19).

Zgodnie z obowiązującym prawem nawozy naturalne i nawozy zawierające azot można stosować tylko w określonych terminach, które wskazano w tabeli 1. Dokładny termin stosowania zależy od rodzaju nawozu, rodzaju gruntu, lokalizacji (obszarów o różnej długości okresu wegetacyjnego) i może być w pewnym stopniu modyfikowany ze względu na przebieg pogody. Nie wolno ich natomiast stosować w tzw. okresach zakazanych (okresach zwiększonego ryzyka), kiedy to niskie temperatury, opady oraz zamarznięcia i pokryta śniegiem gleba (nawet jeżeli nastąpiło okresowe ocieplenie) drastycznie zwiększają prawdopodobieństwo przedostawiania się składników z nawozów bezpośrednio do wód. Nawozów w pewnych sytuacjach nie powinno się stosować także gdy pole nie jest obsiane lub rozwój roślin nie jest dostatecznie zaawansowany oraz gdy spodziewane są większe opady. Odnosi się to przede wszystkim do gleb bardzo lekkich i lekkich o wysokiej przepuszczalności,

zwłaszcza w warunkach ich bardzo dużego uwilgotnienia oraz gleb o zwiększonej podatności na spływ powierzchniowy (15).

Tabela 1

Terminy stosowania nawozów zawierających azot

Rodzaj gruntów	Rodzaj nawozów	
	nawozy azotowe mineralne i nawozy naturalne płynne	nawozy naturalne stałe
Grunty orne	1 marca–20 października	1 marca–31 października
Grunty orne na terenie gmin objętych wykazem stanowiącym załącznik nr 2 do programu azotanowego	1 marca–15 października	
Grunty orne na terenie gmin objętych wykazem stanowiącym załącznik nr 3 do programu azotanowego	1 marca–25 października	
Uprawy trwałe	1 marca–31 października	1 marca–30 listopada
Uprawy wieloletnie		
Trwałe użytki zielone		

Źródło: Rozporządzenie..., 2023 (20)

Nawozów nie można stosować na obszarach w bezpośredniej bliskości cieków naturalnych, jezior i innych zbiorników wodnych, kanałów i rowów oraz ujęć wody, należy zachować ochronny pas gruntu niepoddawanego zabiegom związanym z nawożeniem (tab. 2). Na terenach o dużym nachyleniu stosowanie nawozów wymaga podziału ich dawek, aplikacji bezpośrednio do gleby lub szybkiego wymieszania z glebą, prowadzenia uprawy w kierunku poprzecznym do nachylenia stoku lub stosowania systemów konserwujących. Co więcej, jeśli nachylenie terenu jest skierowane w stronę wód powierzchniowych, pas gruntu nienawożonego należy dodatkowo zwiększyć o 5 m w stosunku do wartości podanych w tabeli 2 (20).

Tabela 2

Odległości, w jakich nie stosuje się nawozów w pobliżu wód powierzchniowych

Rodzaj nawozu	Na gruntach rolnych od brzegu:			
	jezior i zbiorników wodnych o powierzchni do 50 ha	cieków naturalnych	rowów z wyłączeniem rowów o szerokości do 5 m liczonej na górnej krawędzi brzegu rowu	kanałów
Nawozy z wyłączeniem gnojowicy	5 m	5 m	5 m	5 m
Gnojowica	10 m	10 m	10 m	10 m
Na gruntach rolnych od:				
Rodzaj nawozu	brzegu jezior i zbiorników wodnych o powierzchni powyżej 50 ha	ujęć wody, jeżeli nie ustanowiono strefy ochronnej na podstawie przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne (Dz.U. z 2018 r. poz. 2268, z późn. zm.)	obszarów morskiego pasa nadbrzeżnego	
Wszystkie rodzaje nawozów	20 m	20 m	20 m	

Źródło: Rozporządzenie..., 2023 (20)

Nawozy mineralne

Przy nawożeniu nawozami mineralnymi należy uwzględnić 4 zasady: odpowiednią formę nawozu, odpowiednią dawkę nawozu, odpowiednią technikę aplikacji oraz odpowiedni termin aplikacji. Dopasowanie form i dawek nawozów do okresów zwiększonego zapotrzebowania roślin na składniki pokarmowe skutkuje lepszym ich wykorzystaniem przez rośliny i zmniejsza rozpraszanie biogenów w środowisku. Co więcej, aplikacja przy użyciu odpowiednich i sprawnych narzędzi znacząco wpływa na precyzyjne rozprowadzenie nawozów po całym polu. Nawożenie precyzyjne, zlokalizowany siew nawozów czy stosowanie nowoczesnych form nawozów to tylko niektóre z możliwych rozwiązań mających na celu ograniczenie rozpraszania składników pokarmowych w trakcie aplikacji nawozów mineralnych.

Nawożenie precyzyjne z wykorzystaniem systemu GPS podczas stosowania nawozów mineralnych może zwiększać możliwości kontrolowania pracy sprzętu i wpływać na właściwe rozprowadzenie tych nawozów. Połączenie precyzyjnego odbiornika GPS z systemem automatycznego prowadzenia ciągnika zintegrowanym z systemem rozsiewacza umożliwia wykonanie zabiegu tak, aby nie wystąpiły miejsca bez nawożenia i miejsca nadmiernie nawożone. Używając systemu GPS, można

również odwzorować różne właściwości pola, a następnie wykorzystać te informacje do realizacji precyzyjnego nawożenia mineralnego (nawożenie dostosowane do zasobności gleby w składniki pokarmowe w konkretnym miejscu pola). Stosowanie systemu nawożenia precyzyjnego umożliwia zmniejszenie zużycia nawozów i zwiększenie efektywności wykorzystania nawozów przez rośliny (w wyniku bardziej równomiernego ich rozprowadzenia na polu) (8).

Jednoczesny siew i nawożenie polega na umieszczeniu nasion i nawozów w glebie w trakcie jednego zabiegu. Specjalnie przeznaczony do tego celu siewnik posiada redlice nasienne w normalnej rozstawie oraz jest dodatkowo wyposażony w redlice do aplikacji nawozów mineralnych, które są umieszczone między rzędami redlic nasiennych. Redlice nawozowe umieszczają nawozy o kilka centymetrów głębiej niż nasiona. Wprowadzanie nawozów mineralnych na większą głębokość niż nasiona zapewnia dobre warunki kiełkującym siewkom roślin poprzez aplikacje składników nawozowych bezpośrednio w strefę korzeniową rośliny. Oprócz oszczędności czasu i lepszej efektywności wykorzystania składników nawozowych, jednoczesny siew i nawożenie zmniejsza konkurencję chwastów o składniki pokarmowe i znacząco zmniejsza ryzyko spływu powierzchniowego tych składników (15, 23).

Praktyką, która w przyszłości może mieć coraz większe znaczenie jest stosowanie nawozów z powolnym uwalnianiem składników (ang. *slow release fertilizer* – SRF), kontrolowanym uwalnianiem składników (ang. *controlled release fertilizer* – CRF) oraz nawozów azotowych z inhibitorami nityfikacji. Nawozy te modyfikują tempo dostarczania roślinom składników pokarmowych, co poprawia odpowiednie zaopatrzenie roślin w zależności od fazy rozwojowej i w konsekwencji znacząco zmniejsza straty do wód i atmosfery. Jednym z przykładów nawozów o modyfikowanym uwalnianiu jest mocznik, który zgodnie z ustawą z dnia 7 maja 2020 r. o zmianie ustawy o nawozach i nawożeniu może być obecnie stosowany tylko z dodatkiem inhibitora ureazy lub z powłoką biodegradowalną.

Nawozy naturalne i organiczne

W przypadku nawozów naturalnych duże znaczenie w aspekcie ograniczania wymywania składników do wód ma termin ich stosowania. Aplikacja nawozów naturalnych, szczególnie gnojowicy, późną jesienią może poważnie zwiększyć ryzyko wymycia NPK nawet bezpośrednio do wód gruntowych i powierzchniowych, szczególnie podczas intensywnych opadów. Dlatego przy planowaniu nawożenia należy obowiązkowo uwzględnić terminy stosowania dozwolone przez przepisy prawa i zalecenia. Szczegółowe wytyczne odnośnie terminów stosowania znajdują się w rozdziale 1.3 programu azotanowego oraz w zbiorze zaleceń dobrej praktyki rolniczej mających na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych. Ryzyko wymywania zwiększa się w przypadku stosowania nawozów naturalnych co roku na te same pola, dlatego też wskazane jest, aby nawozy

te były stosowane z jednakową częstotliwością na wszystkich polach na terenie gospodarstwa co 2–3 lata, co również należy uwzględnić w planie nawożenia azotem lub planie nawożenia NPK, jeśli taki jest opracowywany w gospodarstwie (8, 15, 20).

Nawozy naturalne (dotyczy to również nawozów mineralnych i organicznych) powinny być jak najszybciej całkowicie przykryte lub wymieszane z glebą. Do tego celu można wykorzystać narzędzia uprawowe, takie jak pługi lub kultywatory talerzowe czy sprężynowe, w zależności od rodzaju gleby i jej stanu. Przykrywanie nawozów glebą ma na celu zapobiegać stratom składników mineralnych w wyniku wpływu powierzchniowego, erozji lub ulatniania się oraz zachować jak największą część wniesionych składników do wykorzystania przez rośliny uprawne. Dzięki wymieszaniu, zastosowane nawozy ulokowane zostają w wierzchniej warstwie gleby, gdzie zawarte w nich składniki pokarmowe są łatwo dostępne dla systemu korzeniowego roślin uprawnych (11, 24).

Płynne nawozy naturalne mogą być stosowane na różne sposoby, m.in. poprzez rozlewanie na powierzchni pola lub aplikację doglebową. Najbardziej skuteczną metodą ze względu na ograniczenie strat składników do wód i atmosfery jest bezpośrednie wprowadzenie gnojowicy lub gnojówki do gleby lub ich rozprowadzenie blisko powierzchni gleby za pomocą zespołów rozlewających. Bezpośrednia aplikacja doglebowa zmniejsza straty gazowe (emisję amoniaku), jednocześnie zwiększając dostępność składników pokarmowych w strefie korzeniowej roślin dzięki bezpośredniemu umieszczeniu nawozu w warstwie ornej (24).

Nawozy naturalne i organiczne mają bardzo różną konsystencję i właściwości fizyczne, dlatego odpowiednie rozprowadzenie tego typu nawozów jest istotne ze względu na konieczność uzyskania przez rośliny równomiernego dostępu do składników pokarmowych na wszystkich fragmentach pola. W przypadku płynnych nawozów naturalnych dostępne są już technologie aplikacji oparte na systemie GPS, które podobnie jak w przypadku nawozów mineralnych umożliwiają precyzyjną ich aplikację dostosowaną do map zasobności gleb. Precyzyjną dystrybucję każdego rodzaju obornika (zarówno świeżego, jak i przetworzonego) na powierzchni pola zapewniają odpowiednio dobrane rozrzutniki (11, 24, 27).

Nawozy wapniowe

Prawidłowe stosowanie nawozów wapniowych jest szczegółowo omówione w zbiorze zaleceń dobrej praktyki rolniczej (23). Przestrzeganie przedstawionych tam zaleceń w zakresie dawek, terminów i techniki stosowania nawozów minimalizuje wpływ tego zabiegu na wody gruntowe i powierzchniowe. Należy jednak pamiętać, że wzrost pH gleby zmienia dynamikę odbywających się w niej przemian N i P. Przy regulacji odczynu za pomocą wapnowania może przejściowo zwiększać się ilość wymywanego azotu w formie azotanów (na skutek zwiększenia tempa nitryfikacji) i fosforu w formie fosforanów (na skutek wzrostu rozpuszczalności stabilnych

form P).Jednocześnie jednak wzrasta pobieranie i wykorzystanie składników pokarmowych przez rośliny, co powoduje, że oddziaływanie nawozów wapniowych na zanieczyszczenie wód pierwiastkami biogennymi jest bardzo niewielkie (5).

Osady ściekowe i ścieki

Rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych i ścieków do nawożenia regulowane jest przez Ustawę z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach oraz Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Osady ściekowe zaliczamy do odpadów, więc ich stosowanie w nawożeniu powinno być wyważone oraz poprzedzone badaniami chemicznymi (pH, zawartość suchej masy i substancji organicznej, zawartość N ogólnego i amonowego, P ogólnego, Ca i Mg, metali ciężkich) i mikrobiologicznymi samego osadu oraz gleb (pH, zawartość P przyswajalnego i metali ciężkich), na których będzie on stosowany. Wykonanie analiz osadów ściekowych leży po stronie wytwórcy, co więcej, zobowiązany jest on do udostępnienia wyników badań oraz informacji o dopuszczalnych dawkach osadu właścicielowi, dzierżawcy lub innej osobie władającej nieruchomością, na której osad ma być stosowany. Osady ściekowe zawierają stosunkowo duże ilości azotu i fosforu, tak więc mogą stanowić znaczące źródło tych pierwiastków biogenicznych, które należy uwzględnić w planie nawożenia. Zgodnie z zapisami prawa osady ściekowe i ścieki traktowane są jako środki nawozowe i w związku z tym podlegają takim samym regulacjom co nawozy zawierające azot. Przy ich stosowaniu należy przestrzegać okresów, w których można je aplikować na pole, zachowywać odległości od wód i ujęć wody oraz uwzględniać je w planie nawożenia azotem. Według prawa wodnego roczne i sezonowe dawki ścieków wykorzystywanych rolniczo powinny być określone w pozwoleniach wodno-prawnych lub pozwoleniach zintegrowanych, nie mogą przekroczyć zapotrzebowania roślin na azot, potas i wodę oraz utrudniać przebiegu procesów samooczyszczania się gleby (19, 20, 26).

Prawidłowe zarządzanie nawozami i kiszonkami w gospodarstwie

Zarządzanie nawozami i kiszonkami w gospodarstwie obejmuje przede wszystkim ich gromadzenie (produkcję), transport na bliskie i dalsze odległości oraz przechowywanie. Na wszystkich tych etapach występuje ryzyko znacznych strat pierwiastków biogennych (przede wszystkim azotu i fosforu) i innych substancji (związków organicznych), które stanowią zagrożenie dla jakości wód gruntowych i powierzchniowych.

Nawozy naturalne

Stosowanie nawozów naturalnych jest ograniczone czasowo, co powoduje duże zapotrzebowanie na bezpieczne miejsca składowania. Nawozy naturalne dzielimy na:

płynne (gnojowica, gnojówka) i stałe (obornik, pomiot ptasi). Rodzaj, jakość i ilość powstających w gospodarstwach nawozów naturalnych zależą od gatunku zwierząt, ich żywienia, systemu utrzymania oraz technologii transportu i przechowywania.

Pierwszym etapem zarządzania nawozami naturalnymi, na którym istnieje możliwość zmniejszenia mobilnej puli azotu i fosforu w całym systemie produkcji zwierzęcej jest żywienie zwierząt. Można to zrealizować, wdrażając zasady żywienia precyzyjnego, na przykład poprzez obniżenie poziomu białka ogólnego w paszy o 15–20%, przy jednoczesnym pokryciu potrzeb żywieniowych dla każdej grupy technologicznej zwierząt. Wymaga to zmiany składu pasz i poprawy ich strawności poprzez dodatek aminokwasów syntetycznych (L-lizyna, metionina, treonina, tryptofan, walina), enzymów rozkładających organiczne związki białkowe (ksylanazy, glukany, proteazy, polisacharydy nieskrobiowe), dodatków fitogenicznych (kwas benzoesowy), taniny, białka chronionego (strawnego jelitowo), fitazy czy nieorganicznych fosforanów o wysokiej strawności. Inną metodą jest tzw. żywienie wielofazowe, które dostosowuje pasze pod względem koncentracji białka i energii do wieku, wagi i fazy wzrostu zwierząt (11, 16). Opis poszczególnych technik można odnaleźć w konkluzjach BAT 3 i 4, które znajdują się w decyzji wykonawczej Komisji (UE) 2017/302 z dnia 15 lutego 2017 r. (3), ustanawiającej konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do intensywnego chowu drobiu lub świń zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE. Ilość wydalanego N i P powinna podlegać kontroli z wykorzystaniem obliczeń opartych na równowadze mas i analizie ich zawartości w nawozach (konkluzja BAT 24). Uzupełnieniem tych metod są rozwiązania techniczne, które pozwalają na pełną indywidualizację procesu żywienia, takie jak: automatyczne dozowanie paszy, systemy ważenia, identyfikacji, selekcji i separacji zwierząt, detekcji ich kondycji i aktywności oraz kontroli klimatu w oborze czy śledzenia wzrostu runi na pastwisku. Przy wykorzystaniu metod żywienia precyzyjnego uzyskuje się redukcje zawartości pierwiastków biogennych w odchodach nawet od 30 do 40%.

Następnym etapem w produkcji zwierzęcej, który powinien być objęty metodami redukcyjnymi jest system utrzymania zwierząt i transportu odchodów/nawozów naturalnych do miejsc składowania. Dostępnych jest szereg technik zmniejszających emisję substancji wydzielanych do środowiska, których głównym założeniem jest zachowanie czystości (zwierząt, powierzchni i wyposażenia obory) poprzez szybkie usunięcie odchodów z przestrzeni zajmowanej przez zwierzęta i gromadzenie ich w odpowiednich bezpiecznych miejscach składowania. Należy tu wymienić między innymi techniki polegające na grawitacyjnym lub podciśnieniowym odprowadzaniu gnojowicy w systemach rusztowych oraz za pomocą rur i rynien, regularnym i częstym zgarnianiu obornika przez odpowiednie urządzenia lub maszyny, splukiwaniu odchodów i ściółki za pomocą wody, separacji kału i moczu. W przypadku hodowli drobiu wykorzystuje się szereg metod suszenia pomiotu na taśmach lub w specjalnej

suszarni oraz suszenia obornika za pomocą systemów podłogowych. Jeżeli do zarządzania odchodami stosuje się urządzenia mobilne (ładowarki, zgarniarki), niezbędne jest zachowanie odpowiednich zasad staranności i bezpieczeństwa pracy mających na celu minimalizowanie niezamierzonego rozproszenia pierwiastków biogenicznych na przestrzeni pomiędzy miejscem powstawania odchodów a miejscem ich składowania. W systemie utrzymania zwierząt futerkowych w klatkach i bateriach klatek z ażurową podłogą należy zabezpieczyć znajdujący się pod nimi grunt szczelną i litą, odporną na mechaniczne uszkodzenia powierzchnią (11, 16, 20, 27).

Wszystkie produkowane, przyjmowane i stosowane w gospodarstwie nawozy naturalne należy przechowywać w specjalnie przygotowanych w tym celu miejscach, które muszą znajdować się w odpowiedniej lokalizacji, bezpiecznej odległości od zabudowań i granic gospodarstwa, zgodnie z wymaganiami prawa budowlanego, oraz odpowiedniej odległości od studni stanowiącej źródło zaopatrzenia w wodę dla ludzi i zwierząt. Ich pojemność musi pozwalać na przechowywanie wszystkich wyprodukowanych w gospodarstwie nawozów wraz z odciekami i wodami opadowymi przez cały okres, kiedy ich stosowanie na polach jest zakazane. Pojemność zbiorników na nawozy naturalne płynne powinna umożliwiać ich przechowywanie przez okres co najmniej 6 miesięcy, natomiast miejsca przechowywania nawozów naturalnych stałych powinny pozwalać na ich składowanie przez okres minimum 5 miesięcy. Gnojownie powinny posiadać właściwie zaprojektowaną konstrukcję ze szczelnymi bokami, dnem, systemem odprowadzania i magazynowania odcieków. Powinny być zbudowane z materiałów odpornych na naciski i uderzenia, związane z gromadzeniem i usuwaniem nawozów oraz umożliwiać działania związane z załadunkiem i opróżnianiem za pomocą odpowiedniego sprzętu. Wysokość ścian powinna uniemożliwiać niezamierzone przemieszczanie się gromadzonych nawozów poza gnojownie. Zbiorniki na nawozy naturalne płynne powinny posiadać przykrycie (osłony stałe, pływające, jednolite zbiorniki elastyczne), aby zredukować emisję do atmosfery związków N i odorów oraz zwiększanie się ich objętości pod wpływem opadów. Konieczną praktyką jest również przykrywanie miejsc składowania nawozów stałych osłonami elastycznymi, aby zapobiegać intensywnej migracji wód opadowych (3, 11, 20, 27).

Szczegółowy opis technik zapobiegających emisjom biogenów i innych zanieczyszczeń do gleby i wody zachodzącym podczas gromadzenia, transportowania oraz przechowywania nawozów naturalnych znajduje się w „Zbiorze zaleceń dobrej praktyki rolniczej mającym na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych”, „Kodeksie dobrej praktyki rolniczej w zakresie ograniczania emisji amoniaku” oraz konkluzjach BAT 15 i 18 (3, 11, 23). W przypadku gdy intensywność produkcji zwierzęcej jest wysoka i ilość wyprodukowanych nawozów naturalnych przekracza możliwości wykorzystania ich do nawożenia na polach należących do gospodarstwa (zgodnie z dyrektywą azotanową można za-

stosować w postaci nawozów naturalnych, również w formie przetworzonej, tylko $170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), istnieje możliwość przekazania tych nawozów na cele rolnicze do innych gospodarstw lub pozarolnicze, np. do biogazowni. Przekazywanie nadwyżki nawozów naturalnych powinno odbywać się bezpośrednio przed terminem aplikacji, by uniknąć ponownego składowania w gospodarstwie odbiorcy. W przypadku gdy nawozy nie są bezpośrednio wykorzystywane po przekazaniu, podmiot przyjmujący, zgodnie z obowiązującymi przepisami, ma obowiązek posiadania odpowiednio przygotowanych miejsc ich składowania, gdzie będą gromadzone w sposób bezpieczny dla środowiska. Wymogi jakie należy spełnić przy przekazywaniu nawozów naturalnych, znajdują się w programie azotanowym (20, 27).

Innym działaniem prowadzącym do ograniczenia emisji pierwiastków biogenych do wód może być przetwarzanie nawozów naturalnych w miejscach składowania. Najczęściej stosowanymi metodami są: mechaniczna separacja obornika płynnego i gnojowicy, kompostowanie obornika stałego, zakwaszanie gnojowicy i obornika płynnego, rozkład beztlenowy w biogazowni, stosowanie dodatków obniżających zawartość substancji organicznej, granulowanie obornika. Celem tych działań jest zwiększenie przyswajalności N i P oraz innych składników pokarmowych dla roślin i zmniejszenie ich puli podatnej na wymywanie, redukcja objętości składowanego nawozu, inne niż nawozowe wykorzystanie oddzielonych frakcji. Nawozy naturalne mogą być też modyfikowane na etapie pomiędzy oborą a miejscem składowania, na przykład poprzez separację gnojowicy, co zmniejsza jej ilość w zbiornikach o 15–20%. Odseparowana faza stała może być wykorzystywana jako ściółka dla bydła lub materiał do produkcji peletów na cele energetyczne (14). Kwestia przetwarzania nawozów naturalnych w gospodarstwie w celu ograniczenia emisji do środowiska omówiona jest w konkluzji BAT 19 (3).

Kiszonki

Procesowi przygotowywania kiszonek towarzyszy powstawanie soków kiszonkowych. Ich ilość jest uzależniona od zawartości suchej masy w zakiszanych materiałach roślinnych, takich jak ruń łąkowa, kukurydza czy inne zielonki. Zawarte w nich pierwiastki biogenne i związki organiczne mogą być potencjalnym źródłem zanieczyszczeń wód, jeżeli odcieki będą wydostawać się poza miejsca składowania kiszonki.

Kiszonki należy sporządzać z materiałów roślinnych o podwyższonej zawartości suchej masy (powyżej 30–35% suchej masy), co w znacznym stopniu zapobiega powstawaniu dużych ilości wycieków kiszonkowych. Miejsca ich składowania muszą znajdować się w odpowiedniej lokalizacji, bezpiecznej odległości od zabudowań i granic gospodarstwa, zgodnie z wymaganiami prawa budowlanego. Optymalnym z punktu widzenia ochrony wód sposobem przechowywania kiszonek jest stały silos pozwalający na zmechanizowany załadunek i rozładunek. Trwałe ściany boczne zbudowane z odpornych na uszkodzenia mechaniczne materiałów ułatwiają ugnia-

tanie masy za pomocą maszyn, a elastyczne przykrycie lub dach zabezpieczają paszę przed dostępem powietrza, wodą opadową i przed działaniem promieni słonecznych. Pojemność silosów powinna być dostosowana do zapotrzebowania gospodarstwa na paszę. Soki kiszonkowe muszą być odprowadzane do specjalnie przystosowanych do tego celu bezpiecznych zbiorników, stanowiących integralną część składową silosów. Zbiorniki te powinny być szczelne, aby uniemożliwić przedostawanie się soków do wód gruntowych, a ich pojemność dostosowana do ilości powstających soków kiszonkowych przez okres co najmniej pierwszych 20 dni fermentacji, kiedy ta ilość jest największa. Bele sianokiszonki owinięte folią należy składować na zabezpieczonym warstwą nieprzepuszczalną gruncie w maksymalnie trzech warstwach i nie dłużej niż jeden rok. Podczas całego procesu zarządzania sianokiszonkami należy mieć na uwadze ryzyko uszkodzenia folii (16, 27).

Opis technik zapobiegających emisjom biogenów i innych zanieczyszczeń do gleby i wody zachodzącym podczas gromadzenia, transportowania oraz przechowywania kiszonek znajduje się w „Zbiorze zaleceń dobrej praktyki rolniczej mających na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych” (23).

Nawozy mineralne

Nawozy mineralne, które są przechowywane lub transportowane w obrębie gospodarstwa w niewłaściwy sposób stanowią potencjalne źródło zanieczyszczeń wód, na skutek niezamierzonego ich rozproszenia. Aby ograniczyć związane z tym negatywne skutki, należy stosować się do zaleceń producentów nawozów i przestrzegać zasad dobrej praktyki i bezpieczeństwa i higieny pracy.

Nawozy mineralne znajdujące się w obrocie występują w oryginalnych opakowaniach lub luzem (nawozy wapniowe, nawozy wieloskładnikowe mieszane w gospodarstwie). Warunki składowania mają na celu przede wszystkim zabezpieczenie nawozu przed niekorzystnym wpływem czynników zewnętrznych powodujących zmiany jakościowe i ilościowe oraz zminimalizowanie zagrożenia dla zdrowia ludzi, zwierząt i środowiska związanego z rozproszeniem nawozu. W gospodarstwach rolnych zakupione nawozy powinny być przechowywane w specjalnych magazynach nawozowych w opakowaniach jednostkowych (kontenery elastyczne i worki w stosach) lub w przypadku nawozów wapniowych – luzem na pryzmach, przykryte materiałem nieprzepuszczalnym zabezpieczającym przed rozsypaniem, pyleniem i zmoknięciem. Zasady składowania powinny być zgodne z zaleceniami producenta i zasadami BHP (liczba warstw składowania, ochrona przeciwpożarowa) (25). Nawozy mineralne pakowane są w różnej wielkości opakowania – worki 25 kg, 50 kg oraz kontenery elastyczne od 500 do 5000 kg (jedno- i wielokrotnego użytku), co wymusza odpowiednie zasady postępowania. Należy pamiętać, że również zużyte opakowania po nawozach wymagają odpowiedniego sposobu przechowywania i utylizacji w celu ograniczenia przedostawania się pozostałości nawozów do śro-

dowiska. Transport i przeładunek nawozów w obrębie gospodarstwa, jak również z gospodarstwa na pole, stanowią kolejne ogniwo, w którym można ograniczyć straty składników nawozowych do środowiska, poprzez wykorzystanie sprawnego sprzętu oraz staranność w wykonywaniu prac związanych z tymi czynnościami, aby zapobiec uszkodzeniu opakowań i rozsypywaniu nawozów. Dobrą praktyką, która może pomóc w zmniejszeniu zagrożeń związanych ze składowaniem nawozów mineralnych jest dokładne określenie aktualnego zapotrzebowania na te nawozy w gospodarstwie i ograniczenie ich długoterminowego magazynowania.

Podsumowanie

Zasady postępowania z nawozami są w Polsce objęte przepisami prawa i zaleceniami dobrej praktyki rolniczej. Ochrona środowiska i ograniczanie presji nawożenia, szczególnie na wody, jest kluczowym obszarem, który jest uwzględniany podczas procesów legislacyjnych i tworzenia rekomendacji dla rolnictwa. Krajowe rozwiązania w tym zakresie uwzględniają najnowsze wyniki badań naukowych, postęp technologiczny, a także prawo i strategię Unii Europejskiej. Ogromną rolę w skutecznej ochronie zasobów wodnych odgrywa przestrzeganie prawa przez wszystkich interesariuszy oraz wdrażanie dobrych praktyk, z których wiele ma charakter dobrowolny, wymagają dodatkowego zaangażowania czasu i środków, ale ich skuteczność jest udowodniona.

Literatura

1. Baaner L., Anker H.T.: Danish Law on Controlling Emissions of Nutrients in the Baltic Sea Region. Country study report of the research project "Legal Approaches to Controlling Emissions of Nutrients in the Baltic Sea Region – a Comparative Study of National Laws", 2013. https://www.su.se/polopoly_fs/1.173828.1396887254!/menu/standard/file/DK%20country%20study%20for%20publishing.pdf (dostęp 25.07.2023).
2. Dalgaard T., Hansen B., Hasler B., Hertel O., Hutchings N.J., Jacobsen B.H., Jensen L.S., Kronvang B., Olesen J.E., Schjørring J.K., Kristensen I.B., Graversgaard M., Termansen M., Vejre H.: Policies for agricultural N management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**: 115002, 1-16. doi: 10.1088/1748-9326/9/11/115002.
3. Decyzja wykonawcza Komisji (UE) 2017/302 z dnia 15 lutego 2017 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do intensywnego chowu drobiu lub świń zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE.
4. Fotyła E.: Interakcja potasu i azotu w nawożeniu roślin uprawy polowej. *Nawozy i Nawożenie*, 2010, **3(24)**: 319-327.
5. Filipek T., Badora A., Lipiński W., Brodowska M.S., Domańska J., Harasim P., Kozłowska-Strawska J., Skowron P., Skowrońska M., Tkaczyk P.: Zakwaszenie i wapnowanie gleb. *Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa FAPA*, 2015, ss. 236.
6. Goulding K., Jarvis S., Whitmore A.: Optimizing nutrient management for farm systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, **363**: 667-680.

7. Grinsven H. J. M. van., ten Berge H. F. M., Dalgaard T., Fraters B., Durand P., Hart A., Hofman G., Jacobsen B. H., Lalor S. T. J., Lesschen, J. P., Osterburg B., Richards K. G., Techen A. K., Vert'ès F., Webb J., Willems W. J.: Management, regulation and environmental impacts of nitrogen fertilization in northwestern Europe under the Nitrates Directive; a benchmark study. *Biogeosciences*, 2012, **9**: 5143-5160. doi:10.5194/bg-9-5143-2012
8. Igras J., Jadczyński T., Lipiński W., Pudełko R.: Dobre praktyki rolnicze w nawożeniu użytków rolnych. Wydawnictwo CDR w Brwinowie Oddział Radom, 2013, ss. 67.
9. Kęsik K., Zarychta M.: Zalecenia i praktyka w nawożeniu. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2013, **34(8)**: 173-191.
10. Kęsik K., Krasowicz S., Zarychta M.: Dawki NPK stosowane w praktyce rolniczej pod zboża jare na tle zaleceń nawozowych. *Nawozy i Nawożenie*, 2010, **41**: 51-97.
11. Kodeks doradczy dobrej praktyki rolniczej dotyczący ograniczenia emisji amoniaku. Opracowany pod redakcją w Falentach przez: IERGiŻ-PIB, ITP., IUNG-PIB, IŻ-PIB, Warszawa, 2019, ss. 80.
12. Kopyński J., Nieróbca A., Ochala P.: Ocena wpływu warunków pogodowych i zakwaszenia gleb w Polsce na kształtowanie produktywności roślinnej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2013, **13**, **2(42)**: 53-63.
13. Lewicki Z., Lewicki P., Lewicki S., Sobocińska D., Fiałkiewicz W., Kruszyński W., Kulczycki G., Minta S.: Sprawozdanie z realizacji dyrektywy 91/676/EWG (azotanowej) w latach 2016–2020. Ministerstwo Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej, Wrocław 2020, ss. 135.
14. Luostarinen S., Tampio E., Laakso J., Sarvi M., Ylivainio K., Riiko K., Kuka K., Bloem E., Sindhøj E.: Przetwarzanie odchodów zwierzęcych jako droga do lepszego recyklingu składników odżywczych. Raport platformy SuMaNu. Fiński Instytut Zasobów Naturalnych, Helsinki, 2020, ss. 77.
15. Pietrzak S.: Priorytetowe środki zaradcze w zakresie ograniczania strat azotu i fosforu z rolnictwa w aspekcie ochrony jakości wody. Wydawnictwo ITP w Falentach, 2012, ss. 34.
16. Program ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez związki fosforu ze źródeł rolniczych. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB, Puławy, 2023. https://www.iung.pl/publikacje/2023/program_fosforowy.pdf (dostęp 25.07.2023).
17. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego sposobu stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania (Dz.U. 2008 nr 80 poz. 479 z póź. zm.).
18. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2008 nr 119 poz. 765 z póź. zm.).
19. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2015 poz. 257 z póź. zm.).
20. 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).
21. Rutkowska A., Skowron P.: Productive and environmental consequences of sixteen years of unbalanced fertilization with nitrogen and phosphorus – trials in Poland with oilseed rape, wheat, maize and barley. *Agronomy*, 2020, **10**: 1747.
22. Stępień W.: Bezpośrednie i następne działanie potasu w doświadczeniach wieloletnich. Wydawnictwo SGGW, 2012, ss. 91.
23. Zbiór zaleceń dobrej praktyki rolniczej mających na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Warszawa 2019. <https://www.gov.pl/attachment/bdcce0a1-6e61-4dd3-b3c9-5bf083a413a3> (dostęp 25.07.2023).

24. Ulen B., Pietrzak S., Tonderski K.S. (red.): Samoocena gospodarstw w zakresie zarządzania składnikami nawozowymi i oceny warunków środowiskowych. Wydawnictwo ITP w Falentach, 2013, ss. 102.
 25. UNECE: Framework Code for Good Agricultural Practice for Reducing Ammonia Emissions. Published by the European Commission, Directorate-General Environment on behalf of the Task Force on Reactive Nitrogen of the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 2015, <http://www.unece.org/index.php?id=41358>.
 26. Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2007 nr 147 poz. 1033 z póź. zm.).
 27. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013 poz. 21 z póź. zm.).
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Piotr Skowron; dr Damian Wach
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 4786 835
e-mail: Piotr.Skowron@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Piotr Skowron	0000-0001-5092-1447
Damian Wach	0000-0002-5857-5654

Robert Borek

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

WPŁYW ZADRZEWIEN ŚRÓDPOLNYCH I SYSTEMÓW ROLNO-LEŚNYCH NA BILANS WODNY POLA*

Słowa kluczowe: agroleśnictwo, systemy rolno-leśne, zadrzewienia, bilans wodny, parowanie, transpiracja

Wstęp – zagadnienia bilansu wodnego w skali pola

Analizując krążenie wody w przyrodzie, należy rozpatrywać łącznie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody, ponieważ przekazywanie energii, ciepła i wody jest ze sobą zależne. Analizując krążenie wody w przyrodzie, należy więc rozpatrywać łącznie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody. Zgodnie z zasadą zachowania energii, w układzie odosobnionym suma wszystkich rodzajów energii jest stała w czasie – energia nie może być utworzona ani zniszczona. Ilość energii słonecznej, jaka jest odbijana od powierzchni Ziemi zależy głównie od nasłonecznienia i kąta padania promieniowania oraz od charakterystyki pokrycia gruntu. Niskie wartości albedo (stosunek promieniowania odbitego do padającego) posiadają woda (0,03–0,10) czy gleby ciemne i wilgotne (0,05–0,10), natomiast zielone uprawy polowe (0,20–0,25), łąka zielona (0,23), gleba jasna sucha (0,20–0,30) wykazują wyższe zdolności odbijania promieniowania. W warunkach Polski albedo dla lasów waha się od 0,12–0,15 dla lasów iglastych do 0,18–0,21 dla lasów liściastych (35).

Ilość energii termicznej zgromadzonej przez ciało lub przekazywanej pomiędzy dwoma ciałami/cząsteczkami/atomami jest nazywana ciepłem. Przy przejściu energii z jednego układu do drugiego zawsze musi istnieć różnica temperatur. W przypadku zmiany stanu skupienia ciała mówimy o cieple utajonym – to jest ilości

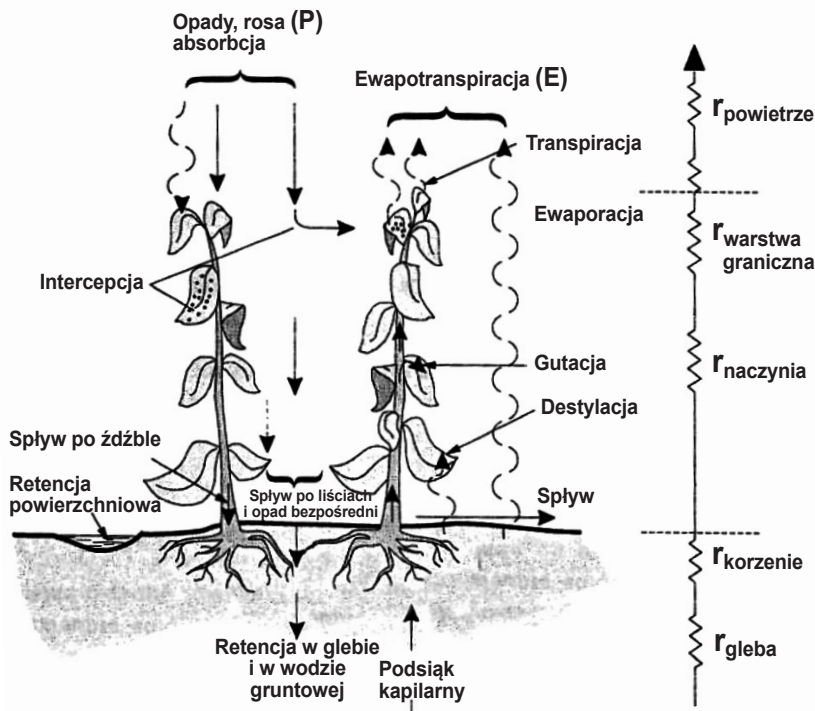
*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

energii potrzebnej do zmiany tego stanu. Możemy również powiedzieć, że jest to ciepło parowania lub energia wykorzystana w procesie parowania. Można założyć, że ponad 70% energii promienistej dochodzącej do zbiorowiska roślinnego (powierzchni czynnej) zostaje zamienione na energię cieplną lub wykorzystane, głównie w procesie transpiracji, na wymianę z otoczeniem (35). Powierzchnia czynna to każda powierzchnia (gleba, szata roślinna), przez którą przepływa masa i energia. Upraszczając – poza promieniowaniem, pomiędzy powierzchnią czynną ekosystemu a atmosferą następuje głównie wymiana w postaci dwóch strumieni: ciepła jawnego (odczuwalnego) i ciepła utajonego. Ciepło odczuwalne jest przekazywane od atmosfery w kierunku szaty roślinnej, nagrzewając ją, bądź jest uwalniane przez powierzchnię czynną w kierunku atmosfery. W ciągu dnia powierzchnia czynna mocno się nagrzewa, znacznie szybciej niż powietrze, z tego powodu ciepłe powietrze ogrzewa się od podłoża, a następnie unosi się w wyniku konwekcji (samoistne unoszenie się ciepłego powietrza). Z kolei w nocy powierzchnia intensywnie się wychładza w wyniku wypromieniowywania ciepła, a od niej wychładzają się przygruntowe warstwy powietrza. Ponieważ powietrze ochładza się znacznie wolniej niż podłoże, następuje przepływ ciepła w kierunku powierzchni Ziemi. Część ciepła odczuwalnego jest ciepłem przewodzonym w gruncie/glebie.

Strumienie salda promieniowania, ciepła odczuwanego, glebowego i jawnego są od siebie zależne, ale w pierwszej kolejności energia jest przekazywana w procesie parowania (ciepło utajone). Obowiązuje zasada priorytetu parowania (35). Jeżeli w podłożu występuje dostateczna ilość wody, najpierw energia pokrywa potrzeby procesu parowania, a potem dopiero ogrzewania powietrza i gleby. Suma parowania z gleby i transpiracji roślin (ewapotranspiracja) zależy od wielu czynników, m.in.: salda promieniowania, sumy i rozkładu opadów atmosferycznych, temperatury, niedosytu wilgotności powietrza, pokrycia terenu, gatunku rośliny, prędkości wiatru, stosunków wodnych w glebie.

Parowanie prowadzi do ochłodzenia powierzchni parującej, ale także do strat zapasów wody w glebie. Przepływ strumienia parującej wody w systemie gleba–roślina–atmosfera jest ograniczony kaskadą oporów stawianych przez roślinność. Gęstość strumienia jest wprost proporcjonalna do gradientu siły powodującej przepływ, a odwrotnie do oporu, jaki stawia przepływowi ośrodek. Całkowity opór roślinności jest nazywany oporem sklepienia szaty roślinnej (ang. *canopy resistance*, r_c) i można go przedstawić analogicznie do oporu przepływu prądu (rys. 1) (35). Na ten opór składają się między innymi: opór gleby (przepływ wody z gleby z miejsc wilgotniejszych do otoczenia korzenia), opór korzeniowy (opór wnikania wody do korzeni), opór naczyniowy (opór przepływu wody w wiązce naczyniowej), opór liściowy (opór przepływu wody w tkankach liścia) i opór szparkowy (opór przejścia pary wodnej z wnętrza liścia do atmosfery). Najważniejszymi czynnikami przepływu wody z rośliny do atmosfery są: gradient potencjału wody pomiędzy rośliną a powietrzem, na który wpływa niedosyt wilgotności powietrza, stopień otwarcia szparek oraz opór

korzeniowy spowodowany spadkiem wilgotności gleby. Ogólnie biorąc, zarówno wielkość parowania gleby, jak i transpiracji rośliny dynamicznie zmieniają się w sezonach oraz w zależności od pory dnia i warunków meteorologicznych.

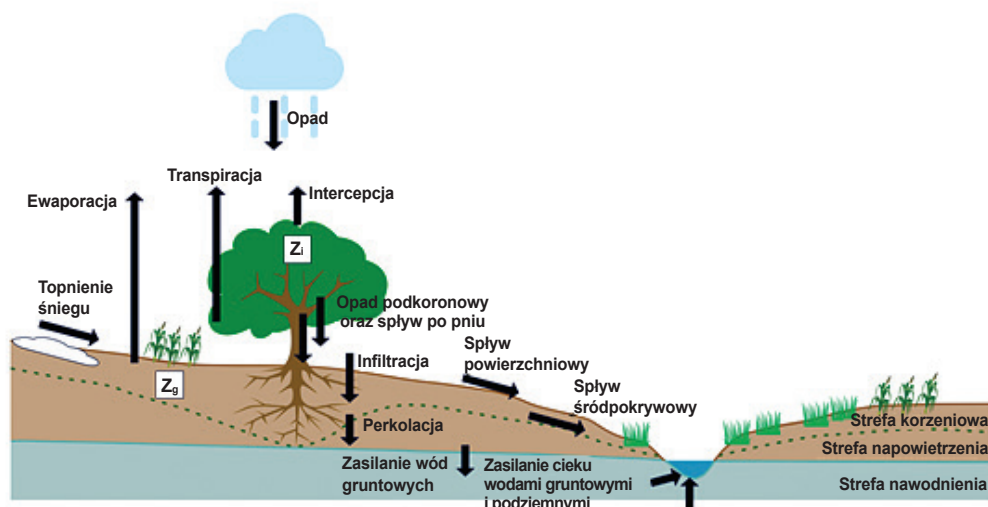


Rys. 1. Kaskada oporów, jakie musi pokonać strumień pary wodnej przepływający z gleby do atmosfery przez roślinę

Źródło: Kędziora, 1999 (35)

Oprócz parowania ważnymi składowymi obiegu wody w przyrodzie są: opad, intercepcja, retencja, spływ powierzchniowy, gruntowy oraz infiltracja (rys. 2). Intercepcja jest procesem zatrzymywania się wody opadowej na powierzchni liści, konarów, pni drzew i pędów roślin. Przechwycony opad można traktować jako straconą wielkość opadu, jeśli na przykład korona drzewa konkuruje ze znajdującą się w pobliżu roślinnością uprawną lub wyparowana w ten sposób woda zmniejsza zasilenie wód gruntowych lub przepływ wód powierzchniowych w zlewni. Można też uznać, że jej dostępność dla parowania ogranicza zużycie wody transpirowanej z gleby. Wielkość intercepcji zależy głównie od powierzchni liści, niedosytu wilgotności powietrza oraz charakteru opadów (mała intensywność, krótki czas trwania). Na wielkość wody opadowej, która dotrze do gleby znaczący wpływ ma struktura roślinności drzewiastej – zwłaszcza budowa koron i powierzchnia pnia. Pnie drzew o szorstkiej korze bardziej zwiększają opór powierzchniowy podczas spływu po roślinie niż pnie gładkie. Retencja (maga-

zynowanie wody opadowej na powierzchni ziemi, gruncie oraz w zbiornikach) jest szczególnie istotna dla zatrzymania opadów na potrzeby wykorzystania przez rośliny. Jej zapasy mogą być utracone z ekosystemu powierzchniowo lub przez parowanie. Rola spływu powierzchniowego zależy od lokalnych uwarunkowań mikroklimatu, rzeźby terenu i roślinności – chociaż zasila wody powierzchniowe, może być przyczyną gwałtownych wezbrań rzek, erozji i osuwisk gruntów lub suszy. Infiltracja to przemieszczanie się wód powierzchniowych i opadowych w głąb gruntu, opóźnia ona obieg wody, jest na ogół procesem korzystnym dla bilansu wodnego.



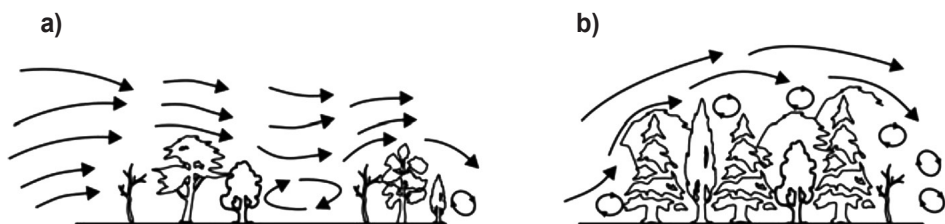
Rys. 2. Schemat bilansu wodnego zlewni, gdzie Z_i to zapas wody zakumulowanej na potrzeby intercepcji, natomiast Z_g – zapas wody glebowej w strefie napowietrzzonej na potrzeby ewapotranspiracji roślin. Dostępność wody dla roślin można analizować w perspektywie cykli o różnej długości: 1. W okresie krótkoterminowym jest wypadkową warunków pogodowych i zależy od czasu trwania fazy zasilania opadami (kilka–kilkadziesiąt godzin) oraz czasu trwania fazy ubytków wody (kilka–kilkanaście dni); 2. W okresie sezonowym, w zależności od przebiegu pór roku; 3. W okresie długoterminowym, wskutek zmian użytkowania gruntów lub dynamiki rozwoju drzewostanu

Źródło: opracowanie własne

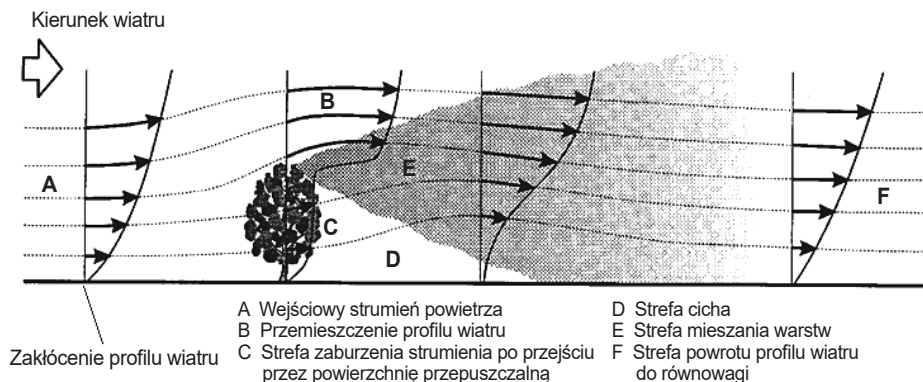
W omawianej powyżej wymianie energii z atmosferą rozpatruje się jedynie ruch pionowy powietrza suchego, wilgotnego lub nasyconego parą wodną (wypływanie lżejszego powietrza w cięższej masie powietrza lub zatapianie się powietrza cięższego w lżejszej masie powietrza). Stan ten jest zaburzony w przypadku ruchów poziomych powietrza, powiązanych z adwekcją (napływanie powietrza o określonych właściwościach nad dany obszar). Wiatr oddziałuje na rośliny nie tylko przez zwiększenie parowania z powierzchni roślin oraz transpiracji, ale również powoduje zmiany

morfologiczne (zwiększenie grubości pędów/łodyg, skrócenie wysokości rośliny i zmniejszenie powierzchni liści), hormonalne oraz fizyczne tkanek przez naprężenia i zranienia przenoszonym materiałem oraz na skutek niesionych prądami powietrza mikroorganizmów (12).

Fizyka oddziaływania wiatru jest następująca. Energia słoneczna i siła przyciągania Słońca wywołują ruch mas powietrza składających się na cyrkulację atmosfery i regionalne układy ciśnienia. W warstwie przypowierzchniowej atmosfery (30–50 m) pionowy profil prędkości wiatru kształtuje się warstwowo, zwiększając prędkość wraz z wysokością, ponieważ hamujący wpływ tarcia powierzchni maleje w górę. Wiatr, przepływając nad gładką powierzchnią czynną (na przykład łanem trawy), pozostaje z nią w równowadze dynamicznej, osiągając przy niej prędkość równą zeru. Jeśli zmienia się charakter podłoża (zwiększa się szorstkość) na jego skraju, profil wiatru ulega zakłóceniu i przemianie (rys. 3). Ponieważ siła tarcia powietrza z powierzchnią rośnie, zwiększa się liczba zawirowań. Powietrze przekazuje ku powierzchni pewną ilość pędu, jednocześnie zabierając od niej energię i materię w formie gazowej (np. wodę, dwutlenek węgla). W przypadku przeszkody w postaci odosobnionych skupisk drzew tworzą się wiry powietrza o osi poziomej. Ich średnica, zasięg i prędkość zależą od wielkości przerw między drzewami, wysokości drzew oraz prędkości poziomego ruchu powietrza. W przypadku przepływu strumienia powietrza nad zwartym skupiskiem drzew część strumienia przepływa ponad lasem ze znacznie zwiększoną prędkością, a część w postaci wirów osiada między drzewami. Po minięciu przeszkody, prędkość gwałtownie opada. Po stronie zawietrznej występuje strefa cicha (strefa zastoju powietrza). Zawirowania po przekroczeniu zadrzewień pasowych o odpowiedniej strukturze (rys. 4) mogą doprowadzić do utworzenia strefy mieszania warstw, gdzie strumienie energii są niezależne od wysokości, prędkość wiatru jest niższa, a wilgotność powietrza wyższa niż w układzie warstw z gradientem. Wzrost stężenia pary wodnej ogranicza wymianę tego gazu pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą. Po uzyskaniu pewnej odległości, która jest odmienna dla różnych przeszkód, wiatr uzyskuje równowagę dynamiczną z podłożem (35, 63). Poziomy ruch powietrza może więc prowadzić zarówno do wzrostu parowania szaty roślinnej i gleby w obrębie przeszkody, jak też do jego ograniczenia w odpowiedniej odległości.



Rys. 3. Wpływ podłoża na wiatr – zawirowania powietrza przepływającego: a) nad odosobnionymi skupiskami drzew; b) nad większym obszarem leśnym o różnym zagęszczeniu i wysokości



Rys. 4. Wpływ zadrzewienia rzędowego o optymalnym współczynniku porowatości na pionowy profil wiatru w neutralnych warunkach atmosferycznych

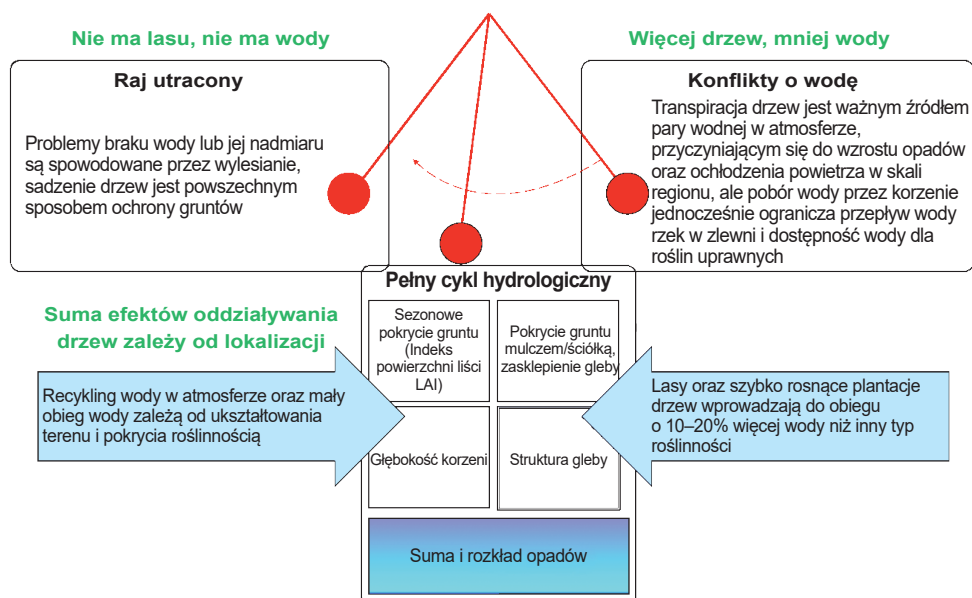
Źródło: Judd i in., 1996 (33)

Rozkład opadów i użytkowanie gruntu mają decydujący wpływ na strukturę bilansu cieplnego – udział parowania i ciepła jawnego. Wilgotne lasy i użytki zielone wykorzystują najwięcej energii na parowanie, zaś grunty orne, suche użytki zielone i sady tracą energię głównie na ogrzewanie powietrza (35). W zależności od klimatu, fragmentacji i układu struktury użytkowania gruntów w krajobrazie przepływ energii i materii może być spowolniony lub przyspieszony.

Wpływ użytkowania gruntu na bilans wodny może być także zróżnicowany. Zadrzewione i zadarnione obszary zwykle ograniczają spływ powierzchniowy, ale również w warunkach dostępności wody glebowej zwiększają w różnym stopniu parowanie. Z drugiej strony zadrzewienia w mozaikowym krajobrazie chronią przed stratą wody z sąsiadujących użytków rolnych. Prędkość wiatru obniża się średnio ok. 20% w zakresie 60–240 m odległości od brzegu zadrzewionego obszaru (53). W homogenicznym krajobrazie rolniczym, o dużym udziale gruntów ornych w całkowitej powierzchni, skupiska drzew lokalnie zwiększają parowanie w skali krajobrazu z powodu adwekcji (rys. 3), jednak pasy zadrzewień o odpowiednim wskaźniku przepuszczalności wiatru mogą oddziaływać pozytywnie na zachowanie wody w glebie upraw rolnych (rys. 4).

Woda i drzewa

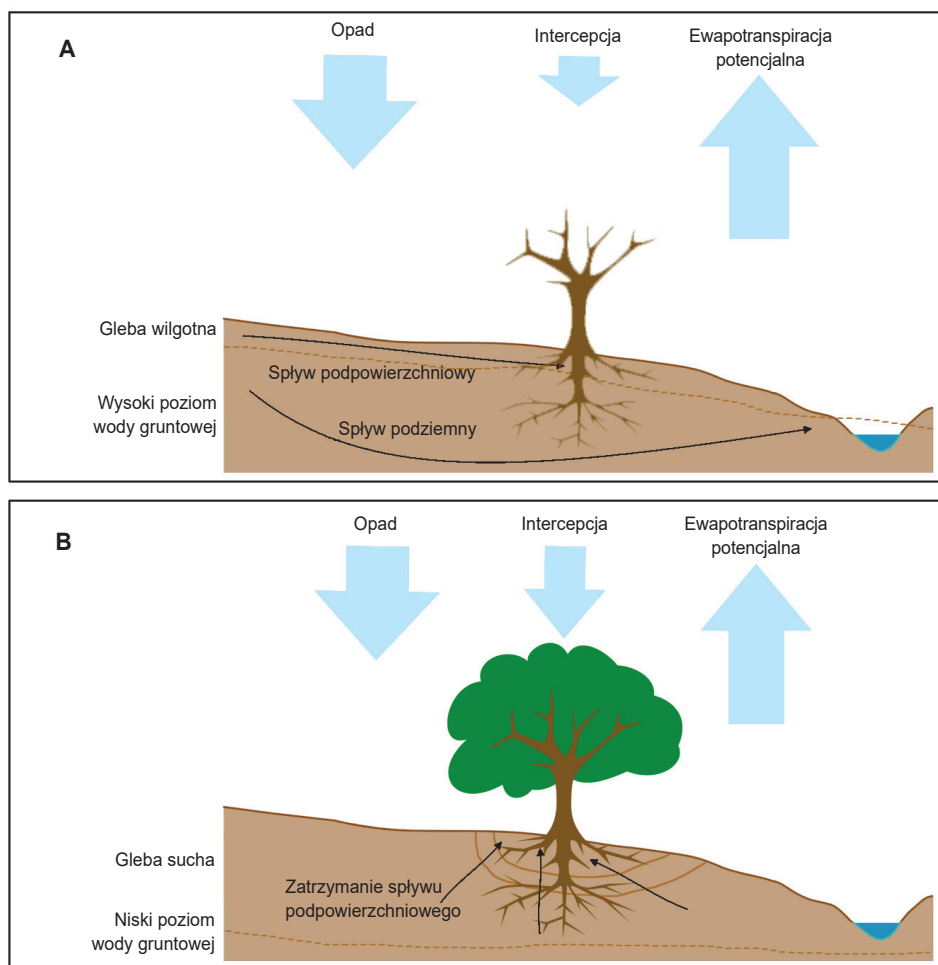
Zwykle drzewa zużywają na intercepcję i transpirację znacząco więcej wody niż większość pozostałych typów zbiorowisk roślinnych. Często dzieje się to kosztem zasobów wody gruntowej, do których mają dostęp głębsze korzenie drzew (68). Obecny stan wiedzy na temat cyklu hydrologicznego potwierdza, że rola drzew zależy jednak od lokalnego kontekstu, w szczególności topografii, gleby i jej okrywy oraz od zmienności parametrów meteorologicznych klimatu w skalach roku oraz wielolecia (rys. 5).



Rys. 5. Drzewa pełnią ważną rolę w regulacji cyklu hydrologicznego i pozostają głównym elementem dyskusji o racjonalnym gospodarowaniu wodą na potrzeby człowieka

Źródło: van Noordwijk i in., 2019, zmodyfikowane (60)

Uznaje się, że drzewostany znacząco przyczyniają się do recyrkulacji pary wodnej tworzącej opady (recykling wilgoci), co może mieć istotny wpływ na sumę i rozkład opadów atmosferycznych w regionie (30). Przepływ wody z gleby do atmosfery jest szczególnie silny w przypadku luźno rozmieszczonych drzew lub żywopłotów, podlegających procesowi adwekcji (p. definicja powyżej), rosnących na glebach ciężkich, o wysokim poziomie wód gruntowych. W takich uwarunkowaniach i przy nachyleniu terenu drzewa mogą zatrzymać przepływ podpowierzchniowy wód i zwiększyć infiltrację w sezonie letnim roku suchego nawet do 3 miesięcy (26, 27) (rys. 7), a wykorzystanie opadów może sięgać 115–140% (58). Polskie obliczenia wykonane przez Ryszkowskiego i Kędziórę (51) wykazały, że im cieplejsza pogoda i płytszy poziom wód gruntowych, tym więcej wody było wykorzystywane przez pasy wiatrochronne w okolicach Turwi ze strefy nasyczonej gleby – udział wody gruntowej w ewapotranspiracji dochodził do 44%. Większość ciepła na parowanie przeciwwietrznych zadrzewień pochodziło z przepływu ciepłych strumieni powietrza (adwekcji) – według autorów pracy do 40% więcej niż energii z promieniowania słonecznego. Symulacje wyjaśniły wpływ zadrzewienia na redukcję przepływu wody podpowierzchniowej o 28% w warunkach bezchmurnych na stoku o bardzo łagodnym nachyleniu. W obecnych uwarunkowaniach Wielkopolski większość drzew na badanym obszarze nie ma prawdopodobnie dostępu do wód gruntowych, więc stosunki wodne się pogorszą, a wielkość parowania drastycznie się obniży (50).



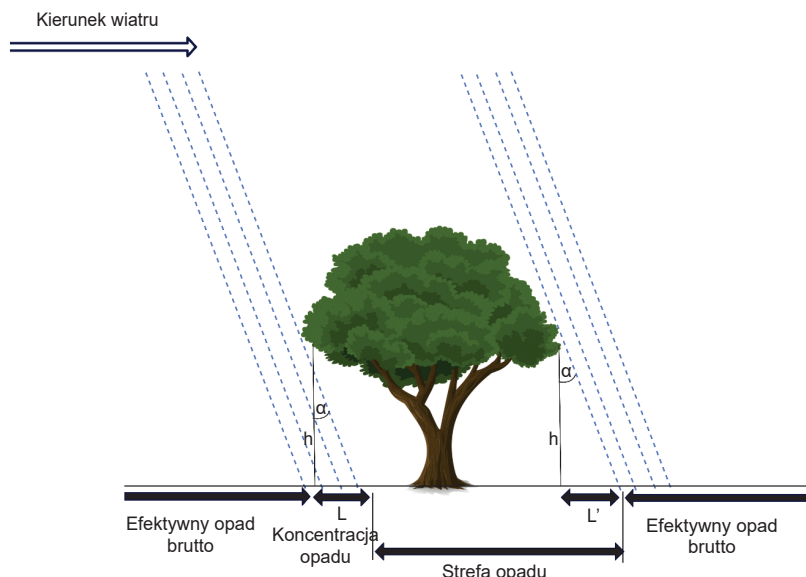
Rys. 7. Rząd drzew lub żywopłot mogą mieć poważny wpływ na poziom występowania wód gruntowych w przypadku ich wysokiego poziomu na glebach ciężkich. A. Bezlistne drzewa liściaste nie oddziałują znacząco zimą na przepływ wody w glebie. B. Drzewa w sezonie wegetacji zwiększają pobór wody opadowej parującej z liści (intercepcja) oraz pobór wody gruntowej (transpiracja). W warunkach wysokiego zapotrzebowania suchej atmosfery na parowanie dochodzi do zatrzymania splywu podpowierzchniowego i w efekcie obniżenia poziomu wód gruntowych. Zwykle obserwuje się większą wilgotność gleby pod drzewem w wyższej strefie zbocza niż w niższej, na skutek depozycji wymytej gleby i mniejszej aktywności korzeni powyżej drzewa (26, 30). Warto zaznaczyć, że gwałtownie rośnie powierzchnia gruntów w Polsce, gdzie korzenie drzew nie mają w ogóle dostępu do wód gruntowych (50)

Za spadek ilości wody w glebie odpowiada również intercepcja liści drzew tworząca zjawisko cienia opadowego (rys. 8). Przechwytywanie opadów przez liście

zmniejsza dostępność wody w glebie dla sąsiadujących roślin. W efekcie intercepcji i transpiracji strefa oddziaływania żywopłatów zlokalizowanych na stoku może sięgać do 9 metrów w górę zbocza oraz do 6 metrów w dół zbocza (26).

Drzewa dostarczają glebie ściółkę oraz obumarłą biomasę odnawiających się korzeni, stymulując w ten sposób aktywność organizmów glebowych, co polepsza strukturę gleb (w szczególności zwiększa makroporowatość) i w efekcie zwiększa retencję wierzchniej warstwy i przesiąkanie wody w głąb profilu glebowego.

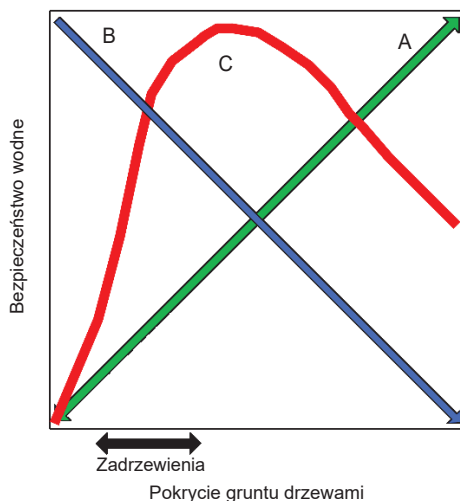
Jednak w ogólnym ujęciu, w efekcie działania korzeni drzew mniej wody dociera, spływając po powierzchni, do rzek, co może prowadzić do znacznego obniżenia ich przepływu w zadrzewionej zlewni. Z drugiej strony wody rzek mogą być w mniejszym stopniu zanieczyszczone cząsteczkami gleb wymytymi w wyniku erozji oraz pozostałościami pestycydów lub związkami mineralnymi z nawozów stosowanych na obszarach zlewni użytkowanych rolniczo. Ponadto, na glebach zbitych i ciężkich oraz poddanych zasklepieniu, gdzie bardzo szybko dochodzi do spływu powierzchniowego wód opadowych, drzewa przeciwdziałają powodziom. Chociaż metaanaliza wykonana przez Carricka i in. (15) dla północno-zachodniej Europy wyraźnie stwierdza, że wzrost powierzchni pokrycia zlewni drzewami nie ma znaczącego wpływu na ograniczenie ryzyka powodzi i zaleca podjęcie wielokierunkowych interwencji w użytkowaniu gruntów.



Rys. 8. Cień opadowy. Po stronie zawietrznej powstaje krótki odcinek cienia opadowego ograniczającego dostępność wody. Po stronie dowietrznej opad może zwiększyć dostępność wody, spływając w znacznej ilości po koronach drzew i pniu

Źródło: opracowanie własne

Podsumowując, w krótkim okresie drzewa mogą niekorzystnie oddziaływać na zlewnię, ale w dłuższej perspektywie czasowej, zwłaszcza jeśli są odpowiednio rozmieszczone w krajobrazie, poprawiają jakość wody oraz regularność przepływów cieków, a przy odpowiednich uwarunkowaniach struktury roślinności przyczyniają się również do poprawy mikroklimatu. Bezpieczeństwo wodne ludzi jest więc kwestią racjonalnego gospodarowania gruntami i ich pokrycia przez drzewa w stopniu zależnym od lokalnych uwarunkowań i potrzeb (rys. 6).



Rys. 6. Zobrazowanie konfliktu pomiędzy potrzebą zadrzewienia a bezpieczeństwem wodnym ludzi.

- A. Każda utrata drzew oznacza utratę bezpieczeństwa wodnego; B. Koncentracja zarządzania na wroście odpływu jednostkowego w zlewni oznacza minimalizację zużycia wody przez drzewa; C. Zrównoważenie pełnego cyklu hydrologicznego wymaga optymalizacji gospodarowania gruntami, w tym zadrzewiania/zalesiania w zależności od lokalnych uwarunkowań dostępności, przepływu i jakości wody

Źródło: van Noordwijk i in., 2019 (60)

Rozpatrując bilans wodny w skali lokalnej, warto zwrócić uwagę na bardziej szczegółowe aspekty funkcjonowania drzew:

1. Przechwytywanie wody opadowej przez liście (intercepcja) zależy od struktury ładu roślinności (wskaźnik powierzchni liści, architektura ładu, kąty ułożenia liści) oraz charakterystyki ulistnienia (kształt i zakończenia liści, pokrycie włoskami i kutikulą oraz ich ruch w ciągu doby). Kompleksowość intercepcji wody jest problematyczna w ocenie wielkości tej składowej bilansu.
2. Rośliny bardzo różnie reagują na stres suszy. W przypadku drzew wynika to z odmiennej anatomii drewna różnych gatunków. Zmiana klimatu objawiająca się wzrostem temperatury powietrza lub stężenia dwutlenku węgla może zwięk-

szać zdolność fotosyntezy roślin, obniżać przewodnictwo szparkowe wody albo wywierać jeszcze inne skutki. Wpływ zmiany klimatu na poszczególne gatunki nie jest w pełni poznany.

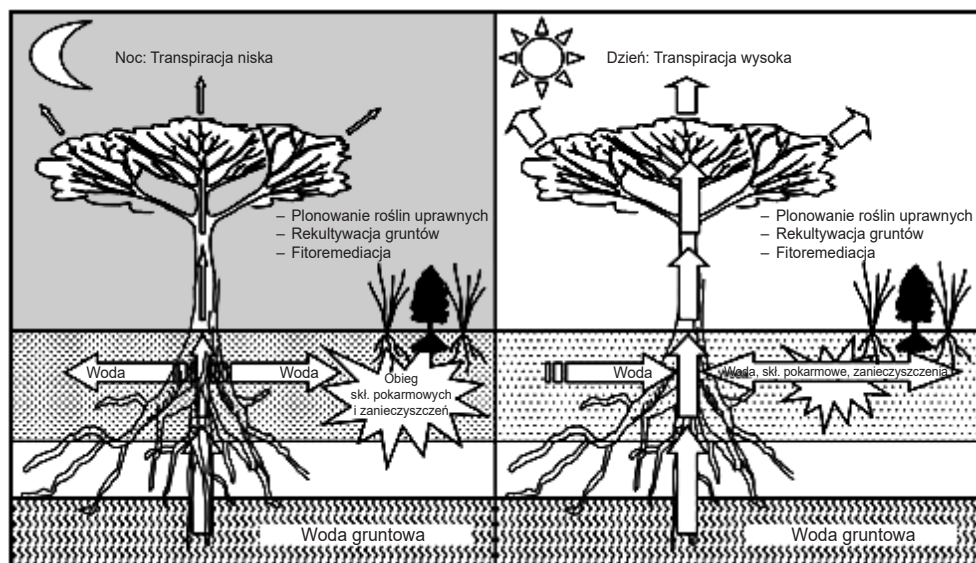
3. Ewapotranspiracja, transportując energię (ciepło utajone), ochładza organizm. Mechanizmy regulacji temperatury oraz przepływu wody przez szparki różnią się znacząco pomiędzy gatunkami. Oslona roślin przed wiatrem może zwiększyć temperaturę liści i prężność pary wodnej w ich komórkach, zwiększając gradient jej ciśnienia względem szparek i transpirację. Takie zjawisko może zajść w warunkach ograniczonej dostępności wody w glebie, szczególnie w strefie cichej strefy zawietrznej i w przypadku gatunków cechujących się wysokim oporem szparkowym, chociaż opór ten zwykle przeciwdziała tym zmianom.
4. Ilość i jakość ściółki, poprawiającej strukturę gleb i infiltrację zależy od wskaźnika powierzchni liści, okresu ulistnienia drzewa, składu chemicznego liści oraz warunków ich rozkładu.
5. Na udział makroporów oraz ruch wody w glebie wpływa struktura korzeni, dynamika ich rozkładu oraz działalność organizmów glebowych (np. dżdżownic) stymulowanych przez związki wydzielane przez biomasę drzewa. Drzewa wolno stojące oddziałują głównie w pasie wilgotniejszej gleby w zakresie 2-krotności rzutu korony +2,0–2,5 m. Większość drzew rosnących w siedliskach naturalnych posiada system korzeniowy do głębokości 1,5–1,6 m; przy niższym poziomie wód gruntowych korzenie rozwijają się znacznie głębiej.
6. Gatunki drzew różnią się pod względem redystrybucji wody w glebie. Posiadają różne strategie dzielenia się wodą z sąsiadującymi roślinami. Głęboko korzeniące się gatunki mogą być komplementarne w stosunku do płycej korzeniących się roślin uprawnych. Korzenie innych gatunków drzew (np. szybko rosnących) rozrastają się przy powierzchni, konkurując z sąsiadami. Są też drzewa, które są w stanie wytworzyć „hydrauliczną dźwignię” (ang. *hydraulic lift*) (więcej informacji na ten temat w osobnej części). Generalnie procesy redystrybucji wody z udziałem roślin są słabo poznane.
7. Pomimo znaczącej zdolności retencyjnej i transpirującej drzew wysoka porowatość gleby, zwłaszcza na glebach lekkich, przyspiesza ruch infiltracji, skracając czas zasilania wód powierzchniowych, co może zwiększyć przepływ w ciekach zlewni. Niski poziom wód gruntowych stymuluje korzenie do wzrostu w głąb gleby w poszukiwaniu wody, potencjalnie ograniczając negatywny wpływ na rośliny współrzędne w warstwie powierzchniowej gruntu.
8. Udział wody zatrzymanej przez korzenie drzew zależy od charakterystyki opadu. Wielkość spływu powierzchniowego jest funkcją czasu i intensywności opadu atmosferycznego oraz stanem wyjściowym uwilgotnienia (nasycenia wodą) gleby.
9. Im mniejszy stopień pokrycia gruntu drzewami, tym większa szorstkość powierzchni czynnej. Wzrost turbulencji w powietrzu napływającym do roślinności zwiększa straty wody w wyniku ewapotranspiracji.

10. Dynamika obiegu wody zależy silnie od faz rozwojowych i wieku roślin oraz ich struktury gatunkowej w zbiorowisku roślinnym, ponieważ decyduje o wykształceniu się systemu korzeniowego i układu części nadziemnej. Ważne znaczenie ma komplementarność gatunków drzew o odmiennym typie systemu korzeniowego zwiększająca przewodnictwo hydrauliczne gleby.

Dopasowanie odpowiednich drzew do warunków lokalnych oraz wybór optymalnej więzby mieszkanki gatunków (zarówno drzew głęboko, jak i płytko się korzeniących) wymaga wiedzy i zrozumienia danego siedliska, wykraczających poza to, co mogą zapewnić ogólne bazy danych (60).

Zjawisko „dźwigni hydraulicznej”

Pobieranie wody przez korzenie roślin jest spowodowane różnicą potencjału wody między glebą a atmosferą w warunkach otwarcia aparatów szparkowych rośliny. Proces zależy głównie od zdolności eksploracji gleby przez korzenie i jest związany z ich gęstością i powierzchnią. Rośliny o głębokich korzeniach są w stanie podnosić lub redystrybuować wodę do górnych warstw gleby poprzez proces znany jako „dźwignia hydrauliczna”, będąc potencjalnymi biosystemami nawodnieniowymi dla sąsiednich roślin (rys. 9). W nocy, gdy aparaty szparkowe są zamknięte, a woda jest nadal transportowana przez korzeń palowy do liści, potencjał wodny rośliny wzrasta stopniowo powyżej potencjału wysychającej gleby. Wyrównując różnicę potencjałów, woda przepływa z korzeni do gleby, zwiększając jej wilgotność. Ten proces może poprawiać stan nawodnienia roślin, np. poprzez zwiększanie transpiracji, oraz zwiększać przeżywalność i wzrost roślin uprawianych współrzędnie, konkurujących z drzewami o wodę (14, 37). Zjawisko to może dotyczyć zarówno korzeni drzew o dimorficznym (palowo-wiązkowym) systemie korzeniowym, jak również traw, roślin bobowatych lub żyta czy owsa, które posiadają głębsze korzenie niż drzewa w początkowej fazie wzrostu, co jest szczególnie korzystne w warunkach suszy glebowej. Występowanie zjawiska „dźwigni” jest skorelowane z gęstością gleby (52), podczas gdy gleby lekkie, piaszczyste przeciwdziałają redystrybucji wody przez korzenie, prawdopodobnie ze względu na mniejszy kontakt korzeni z glebą (66). Przycinanie korzeni lub koron drzew stymuluje proces „dźwigni” (6). Zjawisko może być korzystne w przypadku gleb ubogich w składniki pokarmowe lub podczas fitoremediacji na skażonych gruntach, wspomagając proces pobierania związków przez rośliny korzystające z polepszonych warunków wodnych w glebie (37). Z działaniem „dźwigni hydraulicznej” korzeni wiążą się również możliwe zagrożenia, takie jak przyspieszone wyczerpywanie się wody i zasobów pokarmowych powodujące wzmożoną konkurencję o wodę (6) lub nagromadzenie uniesionych zanieczyszczeń w powierzchniowej warstwie gleby (37). Redystrybucja wody glebowej może mieć znaczący wpływ na przebieg cykli hydrologicznych w regionie (22).



Rys. 9. Zjawisko „dźwigni hydraulicznej” oznacza proces pasywnego przemieszczania się wody z korzeni do gleby o niższym potencjale wodnym, podczas gdy inne części systemu korzeniowego rośliny w wilgotniejszych warstwach gleby pochłaniają wodę. W nocy, gdy transpiracja ustaje, woda jest uwalniana z korzeni, np. do górnych warstw gleby i wchłaniana przez korzenie roślin następnego dnia

Źródło: Liste i White, 2008 (37)

Wpływ zadrzewień śródpolnych na mikroklimat

Jak zostało wspomniane wcześniej, występowanie zadrzewień śródpolnych zakłóca ruch powietrza, powodując tworzenie się wirów o różnym charakterze, początkowo przechwytyjących parę wodną, a następnie, jeśli warunki na to pozwalają, mieszających przypowierzchniowe warstwy powietrza, co w efekcie ogranicza wymianę gazów pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą.

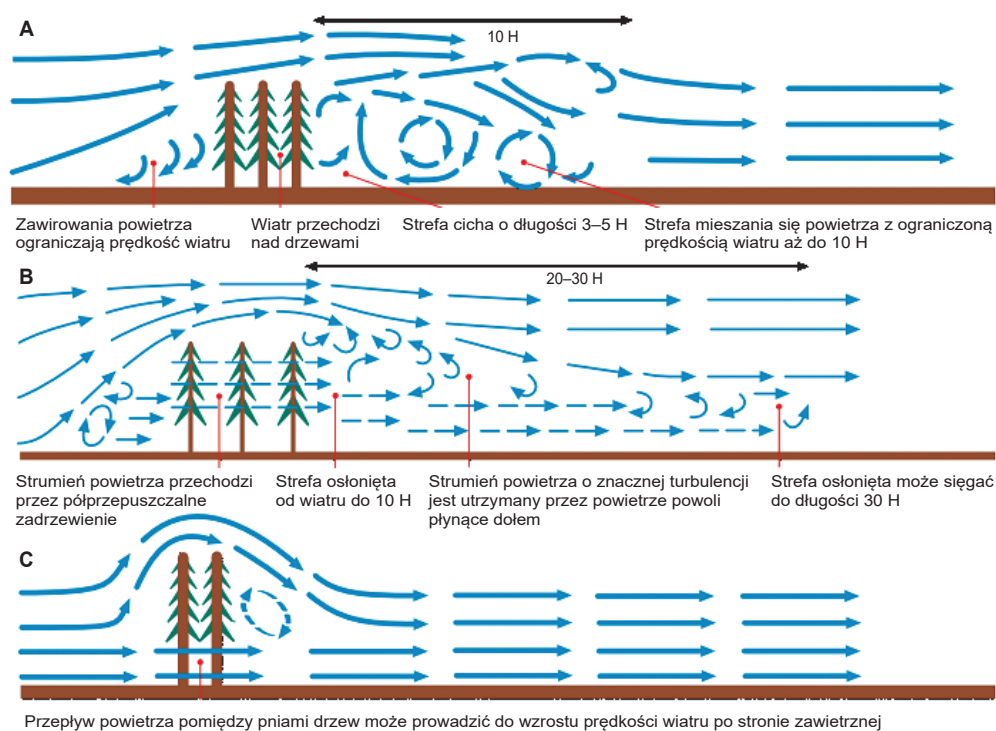
Najważniejszymi czynnikami kontrolującymi ograniczenie prędkości wiatru są wysokość zadrzewienia oraz jego porowatość (przepuszczalność), czyli stosunek wolnej przestrzeni w porównaniu z przestrzenią zajęta przez pnie, gałęzie i liście. Alternatywnie dla uproszczenia stosuje się wskaźnik porowatości optycznej, czyli procentowy udział otwartych przestrzeni w zadrzewieniu, widziany prostopadłe do pasa.

Im luźniej rozmieszczone są wobec siebie drzewa lub pomiędzy liśćmi, koronami i pniami drzew występuje więcej wolnych przestrzeni, tym większa szorstkość przeszkody, co powoduje większe zawirowania, ale na stosunkowo krótkim odcinku, po czym strumień powietrza powraca do pierwotnej struktury swojego przebiegu (rys. 10C). W takich warunkach dochodzi do przyspieszenia prędkości wiatru po

stronie zawietrznej przeszkody, co może powodować wyleganie roślin i zranienia tkanek w wyniku uderzania o nie cząsteczek gleby (24).

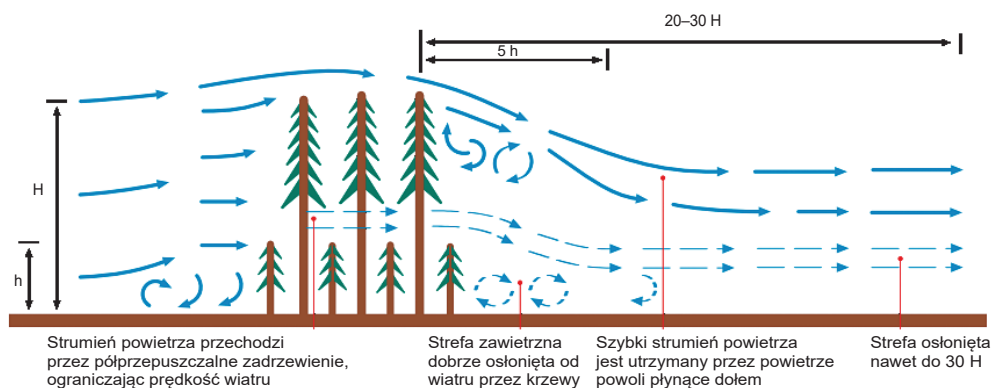
Zwarte przeszkody zwiększają zawirowania po stronie dowietrznej i zawietrznej zadrzewienia, tworząc kolejno obszary wysokiego i niskiego ciśnienia (rys. 10 A). Wysokie ciśnienie powietrza wymusza silny przepływ powietrza nad przeszkodą, tworzy strefę cichą (prędkość wiatru bliska zeru) tuż przy zadrzewieniu, następnie w warunkach niskiego ciśnienia powoli miesza się mniej więcej do wysokości $1,5 H$ zadrzewienia. Strefa mieszania obniża się stopniowo, aż do uzyskania odległości 10 wielokrotności zadrzewienia. Podobnie stopniowo prędkość wiatru przybiera na sile, ale jest wciąż mniejsza niż po stronie dowietrznej (24).

Modelowy przepływ strumieni powietrza przy różnych strukturach porowatości zadrzewienia pasowego przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Modele przepływu strumienia powietrza przez: A – pas zadrzewienia o silnym zwarcu (0–40% porowatości); B – pas zadrzewienia o średnio przewiewnym/półprzepuszczalnym zwarcu (40–50% porowatości); C – pas zadrzewienia o luźnym zwarcu (60–100% porowatości)

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)



Rys. 11. Model przepływu strumienia powietrza przez pas o strukturze hybrydowej (łączącej strukturę półprzepuszczalną piętra wysokiego o 40–60% porowatości oraz strukturę zwartą niskiego piętra krzewów o porowatości <40%)

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

W przypadku zadrzewienia o średnioprzewodnym zwarciu (rys. 10 B) strumień powietrza nie rozdziela się tak jak w przypadku zwartego pasa, lecz przechodzi stosunkowo łagodnie przez korony i pnie, zwiększając w ten sposób zasięg oddziaływania wiatrochronnego, chociaż kosztem mniejszego ograniczenia prędkości wiatru. Zadrzewienie typu hybrydowego, przedstawione na rysunku 11, może pozwolić na zachowanie zasięgu działania, ale obniżenie prędkości wiatru będzie mniejsze jak dla zadrzewienia w pełni półprzepuszczalnego. Dodatkowo w takim modelu zadrzewienia może dojść do utworzenia trójkątnego kształtu jego profilu, w przypadku gdy drzewa lub krzewy niższego piętra zasadzone na jego brzegach osiągną odpowiednią wysokość. Takiej formy należy unikać, gdyż ułatwia prześlizgiwanie się powietrza nad zadrzewieniem, skraca zasięg przeciwwietrznego oddziaływania drzew, a nawet może zwiększyć ryzyko zawirowań oraz prędkość wiatru po stronie zawietrznej.

Wielu badaczy zgadza się, że wysokość zadrzewienia i prędkość wiatru na otwartej przestrzeni są głównymi czynnikami wpływającymi na zasięg wiatrochronnego oddziaływania, podczas gdy porowatość zadrzewienia jest krytycznym czynnikiem określającym wielkość redukcji prędkości wiatru. Największa efektywność osłony przed wiatrem występuje w przypadku drzew dojrzałych o rozwiniętej strukturze koron (od 20 do 40 lat dla większości gatunków rodzimych i kilkanaście lat w przypadku topól). Pas składający się z drzew młodych (z wyjątkiem niektórych drzew iglastych) posiada na ogół strukturę o luźnym zwarciu. Wysokość zadrzewień pasowych dla większości dojrzałych gatunków zawiera się w zakresie 15–22 m. Utrzymanie właściwej struktury (głównie porowatości) i kształtu zadrzewienia wymaga prowadzenia prac pielęgnacyjnych – przeredzania drzew, przycinania gałęzi, w razie potrzeby dosadzania nowych. Przeciwwietrzna rola zadrzewień ma również istotne znaczenie

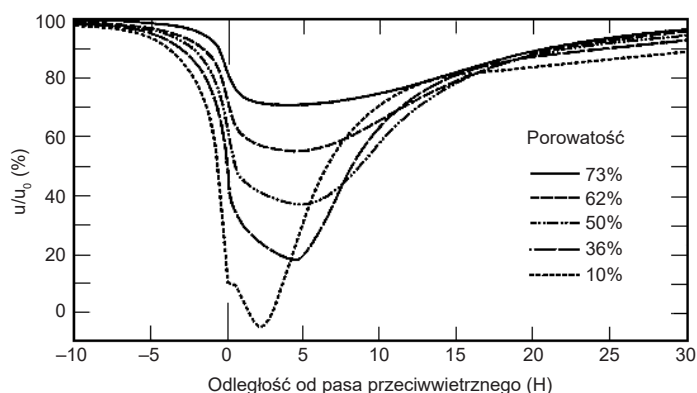
dla hamowania wiatrów zimowych, wywiewających śnieg z pól. W tym przypadku najbardziej skuteczna jest osłona z porowatością 25–40%. Nieregularne opady śniegu narażają coraz częściej uprawy ozime i glebę na przemarzanie. Dodatkowo osłona przed wiatrami zapobiega zwiewaniu śniegu do lokalnych obniżeń, skąd podczas wiosennych roztopów większość wody ulega wyparowaniu.

Zadrzewienia pasowe spełniają nie tylko funkcje przeciwwietrzne, ale również chroniące przed erozją wietrzną oraz wodną, biocenotyczne, przeciwnieźne wzdłuż szlaków komunikacyjnych, przeciwdziałające skutkom niskich temperatur, ograniczające zanieczyszczenie powietrza. Każda z tych funkcji wymaga innego sposobu projektowania, więc nie będzie komplementarna z optymalną formą i budową zadrzewień przeciwwietrznych. Szczegóły projektowania zadrzewień można znaleźć w książce Zajączkowskich (67).

Analizując dane efektywności przeciwwietrznej w zakresie optymalnej porowatości (*vide* cytowana powyżej wartość 40–50%, dla warunków Wielkiej Brytanii), można natknąć się na pewne rozbieżności, które częściowo wynikają z różnej interpretacji wskaźnika porowatości. Badania symulacyjne prowadzone w tunelu aerodynamicznym przez Cornelisa i Gabrielsa (19) wykazały, że porowatość w zakresie 20–35% była najbardziej optymalna dla redukcji prędkości wiatru. Podobne wnioski przedstawiają w swojej pracy przeglądowej Wu i in. (64) dla jednorzędowych zadrzewień, rekomendując 20–30% porowatość optyczną jako optymalną w tym przypadku. Wang i Tackle (61) twierdzą, że rzędy drzew o niskiej porowatości są jedynie nieznacznie mniej skuteczne pod względem zasięgu oddziaływania niż rzędy o średniej porowatości (zakres pomiarów porowatości 10–50%). Zbliżone opinie można znaleźć również w innych opracowaniach (8, 17). Pasy wiatrochronne o gęstej strukturze, z dużą siłą oporu, mogą pochłaniać więcej energii i przepuszczać mniej wiatru niż pasy o zwarcu rzadkim, co skutkuje niższą minimalną prędkością wiatru i większą odległością zasięgu oddziaływania pasa (64), chociaż powodują większe zawirowania powietrza (19, 46, 61).

Często podaje się w literaturze, że spadek redukcji prędkości wiatru w funkcji odległości od zadrzewienia następuje logarytmicznie dla danej wartości porowatości zadrzewienia po przekroczeniu pewnej granicznej wartości odległości, która oznacza najwyższą redukcję prędkości i jest stopniowo niższa dla rosnących przepuszczalności, a jej dalszy spadek jest łagodniejszy (rys. 12).

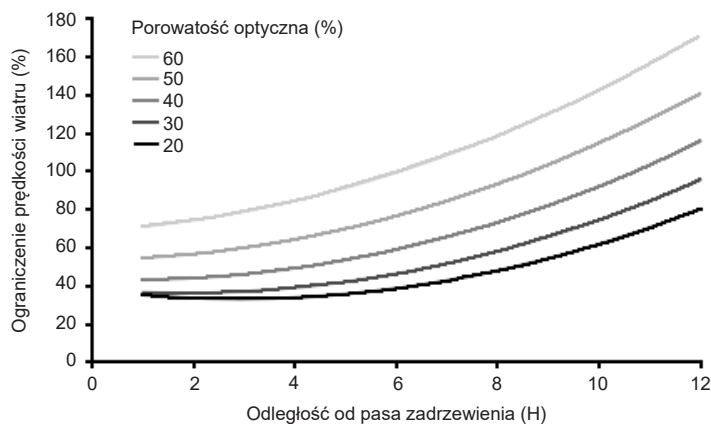
Wang i Takle (61) szacują, że redukcja prędkości wiatru jest największa w przypadku porowatości zadrzewienia 10% dla pierwszych kilku metrów odległości (3 H), po czym osłabia się trochę szybciej niż dla wyższych badanych porowatości, by w efekcie utrzymać nieco silniejszą redukcję dla dalszych odległości (15–30 H) (rys. 12).



Rys. 12. Przestrzenna zmienność średniej poziomej prędkości wiatru na wysokości mniejszej niż 0,5 H dla pasów waitrochronnych o różnej porowatości

Źródło: Wang i Takle, 1997 (61)

W badaniach prowadzonych w Czechach (rys. 13) stwierdzono, że wartości porowatości optycznej poniżej 20% są optymalne pod względem redukcji prędkości wiatru. Nie stwierdzono wyraźnego zmniejszenia prędkości wiatru dla wartości 53% w odległości 9 H po stronie zawietrznej (49).



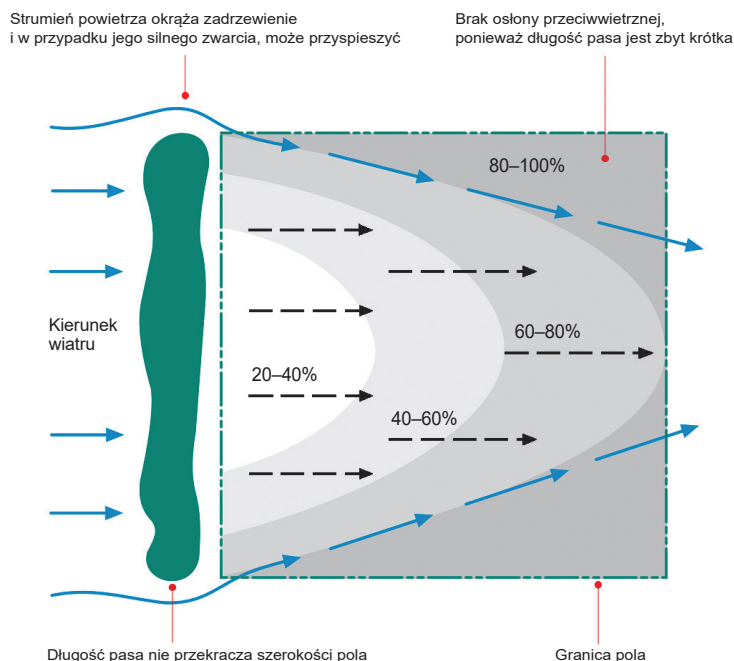
Rys. 13. Ograniczenie prędkości wiatru w funkcji porowatości optycznej zadrzewienia i odległości od niego

Źródło: Řeháček i in., 2017 (49)

Podobnie rozbieżne opinie można spotkać na temat wpływu szerokości pasa na redukcję prędkości wiatru i jej zasięg w odległości od zadrzewienia. Gardiner i in. (24) cytują badania, które podają, że zadrzewienia o szerokości większej niż dwukrotna wysokość drzew nie działają lepiej pod względem osłony przeciwwietrznej niż węższe zadrzewienia. Ich działanie przypomina bardziej wpływ zwartej przeszkody,

gdzie ruch powietrza przyspiesza, a po jej przekroczeniu stosunkowo szybko zwalnia w porównaniu z przeszkodą półprzepuszczalną. Z drugiej strony szeroka przestrzeń zadrzewienia pozwala na rozwinięcie się turbulencji, co powoduje przyspieszenie wiatru po stronie zawietrznej tak jak w przypadku luźnych zadrzewień i może negatywnie oddziaływać na rośliny uprawne. Z kolei Cornelis i in. (19) podają, że bariery dwu- i trzyczędowe były najbardziej skuteczne pod względem redukcji prędkości wiatru w zakresie od 3 do 8 H, ale przy większych odległościach bariery jednorzędowe powodowały większą redukcję prędkości wiatru. Inne badania wskazują na największą przeciwwietrzną efektywność dojrzałych drzew, posadzonych w 5–7 rzędach, przy ich odstępie w zakresie 1,5–2,0 m oraz odległości pomiędzy drzewami w rzędzie 0,7–1,5 m w zależności od gatunku (13, 28, 47, 59).

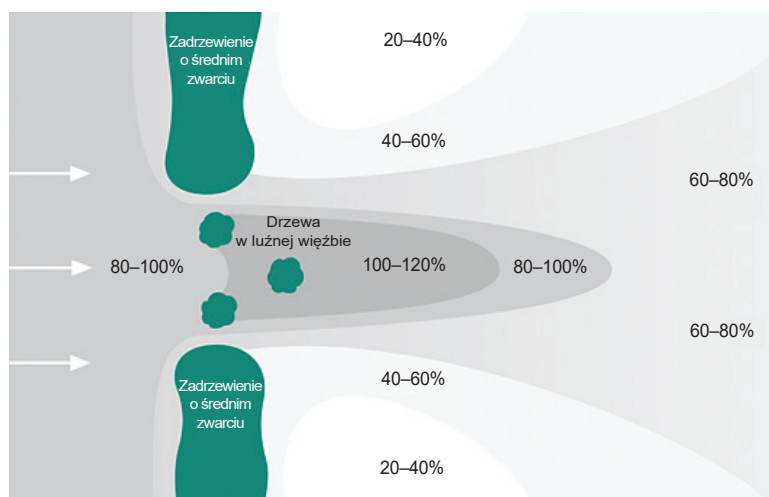
Ekspertcy są generalnie zgodni, jeśli chodzi o wpływ długości pasa na zasięg osłony wiatrochronnej. Im dłuższy pas, tym większa powierzchnia gruntu rolnego może korzystać z ochrony przed parowaniem. Ogólna zasada mówi, że długość pasa powinna być większa niż 10 wysokości zadrzewienia. Najlepiej, gdy długość pasa przekracza długość pola do niego przyległego. Wynika to z faktu, że wiatr przyspiesza na granicy przeszkody, wnikać pod pewnym kątem na niechroniony grunt. Obszar oddziaływania zadrzewienia ma więc kształt zbliżony do trójkąta, jak pokazano na rysunku 14.



Rys. 14. Wpływ długości pasa przeciwwietrzego na powierzchnię gruntu, na której można zaobserwować wiatrochronne oddziaływanie zadrzewienia. Wartości procentowe pokazują oczekiwaną redukcję prędkości wiatru w idealnych warunkach w stosunku do wartości na otwartym obszarze

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

W podobnie negatywny sposób jak brzeg pasa działają wszelkie przerwy w pasie. Bardzo ważne jest, aby ich uniknąć poprzez dosadzanie nowych drzew. Jeśli jest konieczne stworzenie przejazdu, przejścia lub przepędu zwierząt, należy to wykonać, sadząc drzewa w sposób pokazany na rysunku 15, minimalizując odbicie strumienia powietrza i blokując w ten sposób przepływ powietrza. W tym celu stosuje się również specjalne ogrodzenia, nasadza żywopłoty lub po prostu dostawia bele słomy.



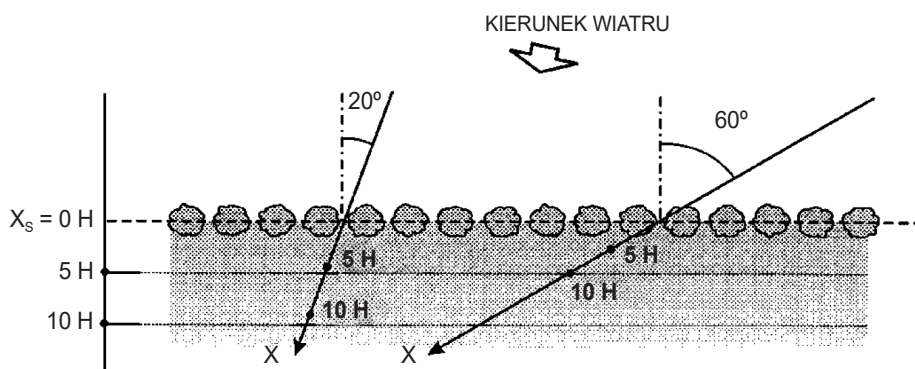
Rys. 15. Zalecany sposób osłony wiatrochronnej w przypadku luki w zadrzewieniu lub potrzeby dostępu do pola. Wartości procentowe pokazują oczekiwaną redukcję prędkości wiatru w idealnych warunkach w stosunku do wartości na otwartym obszarze

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

Wielu naukowców wskazuje na fakt, że najlepszym wskaźnikiem oceny wiatrochronności pasów zadrzewieniowych jest wykorzystanie indeksów biorących pod uwagę ich strukturę poziomą, pionową i różnorodność gatunkową (32, 44), często lepiej opisujących redukcję prędkości wiatru niż parametry porowatości czy wymiarów pasa (59). Porowatość optyczna jest wskaźnikiem bardziej użytecznym dla wąskich/ jednorzędowych pasów, podczas gdy indeksy opisujące trójwymiarową strukturę zadrzewienia powinny być wykorzystywane dla szerszych pasów. Pasy złożone z gatunków liściastych i iglastych działają zwykle lepiej pod względem średniej redukcji wiatru po stronie zawietrznej niż pasy drzew liściastych.

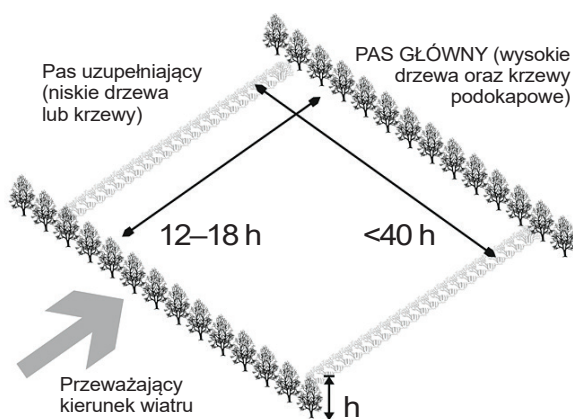
Pas zadrzewienia w największym stopniu ogranicza prędkość wiatrów, jeśli jest zlokalizowany prostopadłe do dominującego kierunku wiatru (rys. 16). W warunkach Polski jest to kierunek zbliżony do zachodniego, co ułatwia planowanie zadrzewień w krajobrazie rolniczym, zwłaszcza że ich orientacja na linii północ-południe będzie w maksymalnym stopniu ograniczać zacienienie. Biorąc jednak pod uwagę częstą zmienność kierunku wiatrów, najbardziej efektywne dla ochrony wiatrochronnej będzie dosadzenie uzupełniającego pasa niskich drzew i krzewów, aby ograniczyć

ich wpływ na produkcję rolniczą (rys. 17). Zaleca się, aby odległość pasów przeciwwietrznych wynosiła od 12 do 18 wielokrotności docelowej zadrzewienia, co zależy od pojemności wodnej gleb oraz lokalnych uwarunkowań klimatyczno-opadowych (67). Biorąc pod uwagę pogarszające się warunki klimatyczne dla produkcji rolniczej w związku ze zmianą klimatu, bardziej korzystne może być zawężenie odległości między pasami do minimalnie zalecanej 12 H. Powtarzające się po sobie pasy przeciwwietrzne zwiększają turbulencje w sąsiedztwie zadrzewienia, skracając strefę cichą, ale jednocześnie powodują zwiększenie tarcia strumienia powietrza po stronie dowietrznej, ograniczając prędkość wiatru, co kompensuje z nadwyżką osłabienie ochrony w systemie zadrzewień (33).



Rys. 16. Zmiana kierunku wiatru znacząco wpływa na powierzchnię gruntu, na której można zaobserwować wiatrochronne oddziaływanie zadrzewienia. Im ostrzejszy kąt natarcia strumienia powietrza na powierzchnię zadrzewienia, tym mniejszy zasięg oddziaływania na powierzchnię gruntu

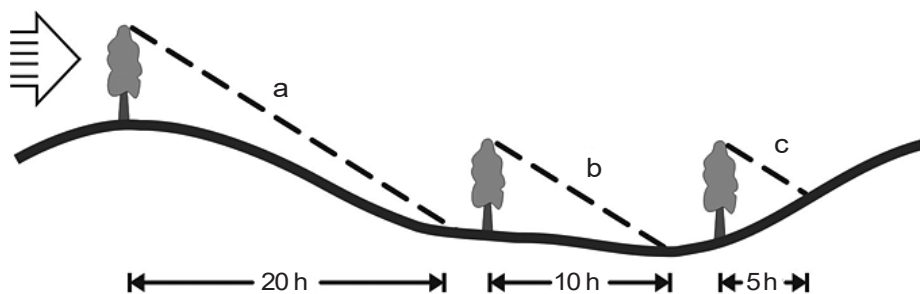
Źródło: Cleugh, 1998 (18)



Rys. 17. Z powodu zmienności kierunku wiatrów główne pasy zadrzewieniowe powinny być uzupełnione prostopadłymi do nich pasami wspomagającymi, aby zapobiegać przyspieszaniu powietrza wzdłuż pasa

Źródło: Zajączkowski i Zajączkowski, 2013 (67)

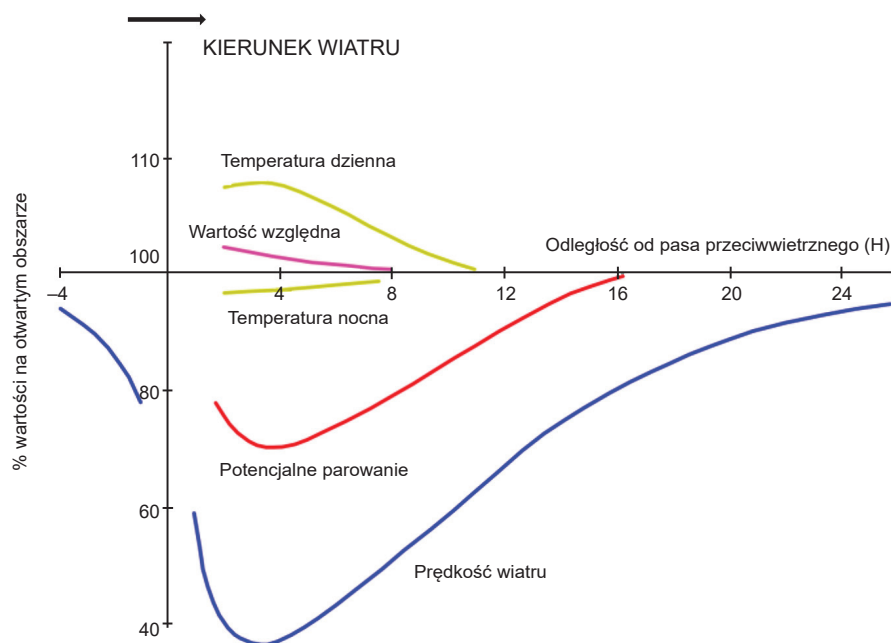
Ukształtowanie terenu jest kluczowym czynnikiem efektywności przeciwwietrznego zadrzewienia. Najbardziej skuteczna jest lokalizacja pasów wiatrochronnych na obszarze płaskiego terenu. Jeśli jest to niewykonalne, należy wybierać takie miejsca, które pozwolą na przechwycenie energii strumienia powietrza najwcześniej jak to jest możliwe. Najlepsza pozycja znajduje się zawsze na szczytach wzniesień (rys. 18).



Rys. 18. W terenach urzeźbionych zasięg wiatrochronnego oddziaływania zadrzewień będzie zależeć od ich odpowiedniej lokalizacji: znacznie większy jest dla drzew umieszczonych na szczycie zbocza (a) niż dla tych w dolinach (b) oraz na stokach (c). W przypadku stromych wzgórz pas wiatrochronny na szczycie może zwiększyć turbulencje. Sadzenie konturowe na zboczach przechwytuje przepływ zimnego powietrza w dół i może zwiększyć ryzyko przymrozków. Na terenach podatnych na mróz oraz w zagłębieniach zadrzewienia powinny mieć więcej luk i mniejszą porowatość, aby przyspieszać strumień powietrza

Źródło: Kujawa i in., 2018 (36)

Oprócz prędkości wiatru śródpolny pas zadrzewienia ma również wpływ na inne parametry meteorologiczne. Idealny model takiego oddziaływania przedstawiono na rysunku 19. Największy wpływ na temperaturę jest w zasięgu $8 H$ zadrzewienia. W dalszej odległości temperatura dzienna zwykle się obniża, a nocna przy gruncie podwyższa, chyba że wystąpi inwersja temperatury wywołująca przymrozek. Z drugiej strony zadrzewienie chroni przed nagłym adwekcyjnym przymrozkiem związanym z poziomym ruchem zimnego powietrza. Niższe temperatury nocne mogą osłabiać proces oddychania roślin, zwiększając w ten sposób ilość węgla potrzebnego do fotosyntezy i wzrostu rośliny (rośliny zwykle są wyższe i mają większe liście, podobnie jak w przypadku ich zacienienia). Jednak wyższe rośliny mają większe zapotrzebowanie na wodę – w warunkach wysokiej temperatury i ograniczonej dostępności wody w glebie będą odczuwać większy stres. Ostatecznie wpływ zadrzewienia na stan roślin zależy głównie od ich gatunku, fazy rozwoju oraz warunków glebowo-klimatycznych. Dowiedziono również, że pasy zadrzewień zwiększają częstość występowania zjawiska rosy, przyczyniając się do lokalnego wzrostu sumy opadów (4).



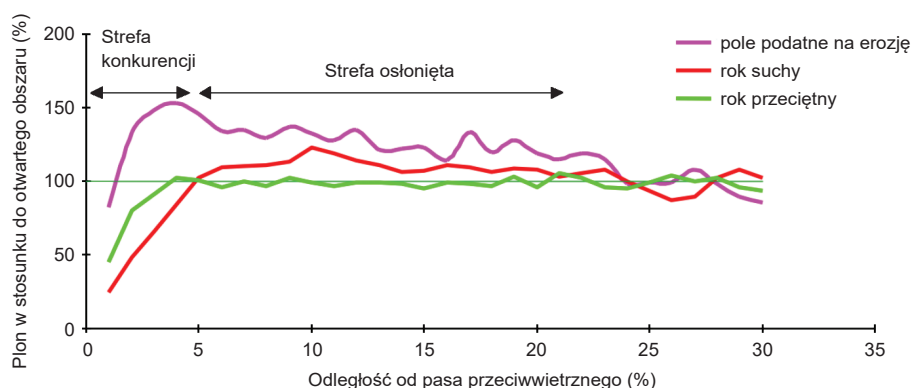
Rys. 19. Zmiany mikroklimatycznych parametrów na różnych odcinkach oddziaływania idealnego pasowego zadrzewienia śródpolnego o optymalnej strukturze.

Po stronie dowietrznej prędkość wiatru znacząco spada (w odległości ok. 4 wysokości zadrzewienia), po przejściu na drugą stronę zadrzewienia obserwujemy jeszcze większy spadek prędkości, po czym zaczyna ona powoli rosnąć, aż do wyrównania się z nie zaburzonym profilem wiatru w odległości 20–30 wysokości zadrzewienia. W obrębie zadrzewienia (nie określono na rysunku) mamy do czynienia z bezpośrednim jego oddziaływaniem na bilans ciepła – osłona drzew obniża temperaturę przygrunтовую w ciągu dnia, natomiast zwiększa w ciągu nocy. Po stronie zawietrznej początkowo występuje nieznaczny wzrost temperatury dziennej w stosunku do powierzchni nieosłoniętej oraz adekwatnie spadek temperatury nocnej i wzrost wilgotności względnej, z tym że oddziaływanie osłony na te dwa ostatnie parametry występuje na nieco krótszym odcinku. W miarę wzrostu odległości od zadrzewienia spada też wartość potencjalnego parowania, co można zauważyć aż do długości 6 wysokości drzew. W zakresie od 8 do 24 H turbulencje w ciągu dnia wzrastają, a temperatury powietrza mogą być o kilka stopni niższe niż w obszarach nieosłoniętych (nie określono na rysunku) (43). Temperatury nocne do 1 m wysokości są na ogół o 1–2°C cieplejsze w strefie chronionej, która może sięgać aż do 30 H, niż w obszarach odsłoniętych. Z kolei temperatury od 1 do 2 m nad powierzchnią są zwykle nieco niższe. Podczas bardzo cichych nocy mogą wystąpić inwersje temperatury, a obszary chronione mogą być o kilka stopni chłodniejsze niż obszary odsłonięte (2). Przyjmuje się, że wiatrochronne oddziaływanie pasa na plon roślin utrzymuje się do odległości 12–18 H. Rzeczywiste zmiany temperatury i wilgotności zależą od typu pokrycia gruntu, właściwości gleby, pory roku, ukształtowania terenu i zmienności warunków klimatycznych.

Źródło: Marshall, 1967 (41)

W efekcie oddziaływania półprzepuszczalnych pasów przeciwwietrznych następuje wzrost plonowania roślin uprawnych znajdujących się w strefie oddziaływania zadrzewień. Poprawa plonowania jest obserwowana w szczególności w przypadku warzyw, ziemniaka, buraka cukrowego, roślin specjalnych (5), sadów i winnic (45) oraz ceniolubnych roślin wieloletnich – traw i bobowatych, np. koniczyny (11). Korzystniejsze warunki mikroklimatyczne mogą również wydłużyć okres uprawy roślin polowych. Wzrost wilgotności oraz temperatury w warstwie powietrza znajdującej się pod wpływem zadrzewienia pozwala na otwarcie aparatu szparkowego i zwiększenie wymiany gazowej rośliny, przyspieszając proces fotosyntezy i wzrost roślin, w szczególności przez zwiększenie powierzchni liści. Faza generatywna rozwoju może być opóźniona. Należy jednak pamiętać, że końcowy plon rośliny jest wypadkową wielu różnych czynników oddziałujących w okresie całego jej rozwoju.

Wiele badań pokazuje, że wiatrochronne zadrzewienia zmniejszają plony w latach o średnich lub ponadprzeciętnych opadach deszczu, ale zwiększają je w suchych, wietrznych warunkach (57) (rys. 20). Wprowadzanie przeciwwietrznych zadrzewień śródpolnych jest więc dobrą formą ubezpieczenia upraw przed niekorzystnymi i trudnymi warunkami środowiskowymi (57) i może chronić przed niekorzystnymi skutkami zmian klimatycznych.



Rys. 20. Plon roślin uprawnych w Australii (wyniki z 64 lat polowych w Australii Zachodniej) w funkcji odległości od pasa przeciwwietrznego dla różnych lat o odmiennych uwarunkowaniach meteorologicznych. W latach suchych efekt ochronny zadrzewień jest bardziej korzystny dla plonowania roślin uprawnych, z wyjątkiem lat bardzo suchych, kiedy deficyt wody w glebie jest przeważającym czynnikiem ograniczającym wzrost i rozwój roślin

Źródło: Sudmeyer i in., 2007 (56)

Bilans wodny w alejowych systemach rolno-leśnych

Wpływ alejowych systemów rolno-leśnych na bilans wodny nie jest tak dobrze rozpoznany jak pasów wiatrochronnych, nad którymi badania rozpoczęto ponad sto lat temu. Pierwsze badania nad dostosowaniem zadrzewień do formy alejowej rozpoczęły się w latach siedemdziesiątych XX wieku. Głównym celem systemów alejowych jest alternatywna produkcja rolnicza, w związku z czym układ drzew, struktura koron i korzeni mogą znacząco różnić się pomiędzy różnymi systemami, jak i w ramach tego samego nasadzenia drzew, jeśli stosuje się różne gatunki. W efekcie wyniki badań nad oddziaływaniem systemów alejowych na mikroklimat pola i bilans wodny nie są ze sobą spójne.

Jednymi z najbardziej poznanych systemów alejowych pod kątem bilansu wodnego są współrządne uprawy drzew krótkiej rotacji – zwłaszcza wierzby i topoli. Drzewa te sadi się w bardzo gęstej więźbie ($10\,000\text{--}40\,000$ sadzonek $\cdot \text{ha}^{-1}$) w formie kilkurzędowego pasa, zwykle w cyklu 3–6-letnim, aby ułatwić zmechanizowany zbiór biomasy z przeznaczeniem na zrębki energetyczne. Regularność i zwartość zadrzewienia nadaje mu cechy zbliżone do pasa wiatrochronnego. Pomimo relatywnie krótkich odstępów pomiędzy pasami struktura przepływu powietrza nie odbiega znacząco od pola z zadrzewieniami przeciwwietrznymi, ponieważ wysokość drzew nie przekracza zwykle 5 metrów (3–8 metrów).

Kanzler i in. (34) uważają, że taka pozioma struktura zadrzewień powoduje prawdopodobnie powstawanie w kolejnych międzyrzędziach (alejach) stref cichych, na co wskazywałyby przeprowadzone pomiary prędkości wiatru, chociaż przepływ strumieni powietrza będzie zależał od lokalnych uwarunkowań. Ponadto powtarzające się po sobie w odpowiednio bliskiej odległości równoległe pasy zwiększają efekt przeciwwietrzny systemu. Przez większość badanego okresu autorzy stwierdzili wpływ pasów topoli i robinii na redukcję prędkości wiatru w uprawach międzyrzędowych w porównaniu z otwartym polem. Średnie plony pszenicy dla analizowanego międzyrzędzia były o 16% większe niż na nieosłoniętym polu, plony ziarna zwiększały się (zakres 1–30%) wraz ze wzrastającą odległością od pasa, chociaż w centralnej części międzyrzędzi zaobserwowano spadek wielkości biomasy ziarna. Odnotowano również wzrost temperatury i wilgotności w czasie dnia oraz spadek temperatury nocą w łanie roślin, chociaż dotyczyły one pierwszych kilku metrów odległości od drzew (do 3 i do 9 m w zależności od wystawy na wiatr). Przez okres 4 dni, które były reprezentatywne dla warunków pogodowych w eksperymencie, średnia redukcja parowania we wszystkich pomiarach wyniosła ponad 27%. We wcześniejszych badaniach na obiektach Böhm i in. (10) dowiedli, że redukcja prędkości wiatru w międzyrzędziach zależała od wysokości drzew oraz szerokości i orientacji rzędów drzew. Według tych badaczy szerokość alei znacznie przekraczająca 50 m nie daje skutecznej ochrony przed parowaniem, co wynika z działania zwartych zadrzewień o relatywnie niskiej wysokości na przepływ powietrza. Jednak zbiór drzew w krótkiej rotacji wiąże się z tymczasową utratą funkcji przeciwwietrznej. Z tego powodu zaleca się częściowy zbiór biomasy z rzędów po jednej stronie pasa lub najlepiej wycina-

nie co drugiego rzędu. Ponieważ topola i robinia są gatunkami szybko rosnącymi, poprzednia funkcja przeciwwietrzna całości pasa może zostać przywrócona już po kilku miesiącach wzrostu roślin.

Markwitz i in. (39), wykorzystując metodę kowariancji wirów, stwierdzili, że na polach z pasami wierzby i topoli nie zwiększyła się znacząco ewapotranspiracja w porównaniu z kontrolnymi uprawami monokulturowymi (łąka lub grunt orny). Pomimo wzrostu szorstkości powierzchni w obrębie upraw drzew zwiększającej turbulencje powietrza transpiracja była w dużym stopniu kontrolowana przez aparat szparkowy roślin. Różnice pomiędzy średnimi wartościami oporu szparkowego roślin w obu systemach były stosunkowo nieduże. Niższa ewapotranspiracja w strefie cichej kompensowała wzrost ewapotranspiracji w strefie mieszania, w efekcie w skali systemu alejowego wartości ewapotranspiracji były porównywalne z wartościami w systemie monokulturowym. W innym badaniu Markwita i in. (40) w czterech z pięciu stanowisk badawczych roczna skumulowana ewapotranspiracja okazała się wyższa na poletkach z systemem alejowym niż w monokulturze. Autorzy interpretują wyniki wzrostem całkowitej wielkości biomasy zarówno drzew, jak i roślin uprawianych w międzyrzędziach w porównaniu z monokulturowym polem, zwracają też uwagę na wpływ zawirowań powietrza na obszarze zadrzewienia, co zwiększa parowanie wody.

Drzewa uprawiane w systemach alejowych w silnej więźbie (tak jak w przypadku drzew krótkiej rotacji) poprawiają bilans wodny pola z reguły na zasadzie spełniania funkcji przeciwwietrznych. W warunkach suszy, szczególnie na glebach lekkich, drzewa są zmuszone do wydłużania systemu korzeniowego w głąb gleby, aby ograniczyć konkurencję o wodę z innymi drzewami. Drzewa nasadzone w luźniejszych odstępach od siebie (np. drzewa owocowe lub z przeznaczeniem na drewno wysokiej jakości) są o wiele mniej efektywne w poprawie mikroklimatu, ale w wyniku mniejszej szerokości międzyrzędzi mogą mieć bardziej wyraźny wpływ na obniżenie temperatury dziennej w łanie roślin uprawnych, ograniczenie spływu powierzchniowego i wzrost wilgotności gleby (31).

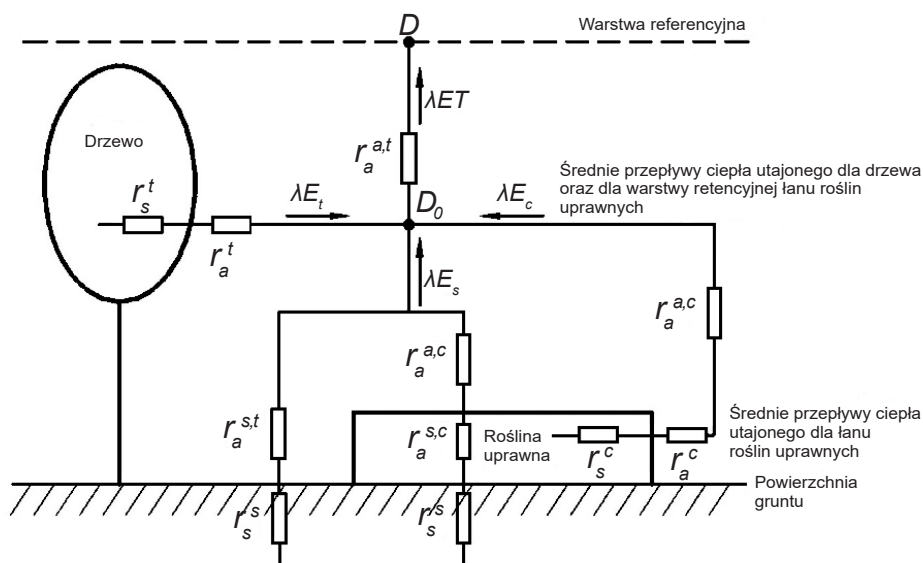
Wyniki wielu badań nad systemami alejowymi są zgodne co do kwestii pozytywnego wpływu drzew na rośliny uprawne w warunkach suszy, niewiele z nich jest jednak w stanie udowodnić ten aspekt szeregiem danych czasowych. Wynika to ze skomplikowanych relacji pomiędzy roślinami ponad gruntem, jak też w glebie. Zgodnie z hipotezą gradientu stresu, w bardziej stresujących warunkach równowaga netto między konkurencją i synergią w zbiorowiskach roślinnych przesuwają się w kierunku bardziej korzystnych interakcji (7). Jednak przekroczenie pewnego poziomu krytycznego prowadzi do nieodwracalnych zmian zaburzających zrównoważoną strukturę roślinności. Istotne znaczenie ma określenie, kiedy występują krytyczne okresy wzrostu i rozwoju roślin oraz w jakim stopniu są one wtedy podatne na różne czynniki stresowe. Na przykład zacienienie w fazie kwitnienia ogranicza liczbę i masę ziarna zbóż, ale ogólnie może mieć korzystne oddziaływanie na plonowanie zielonej biomasy traw lub roślin bobowatych poprzez regulację stosunków wodno-powietrznych (54) lub adaptację roślin do pogorszonych warunków świetlnych (3, 65).

Z drugiej strony czas występowania suszy ma znaczący wpływ na alokację biomasy między organami wegetatywnymi i generatywnymi. Badania Day i in. (20) oraz Martina i Jamiesona (42) wskazują, że w warunkach wczesnej wiosennej suszy plon nasion grochu siewnego i ziarna jęczmienia ulega poprawie ze względu na ograniczony rozwój wegetatywny i jednocześnie utrzymany lub czasami poprawiony rozwój reprodukcyjny, podczas gdy późne susze mają szkodliwy wpływ na rozwój rośliny. Zacienienie roślin, które stosunkowo dobrze je tolerują, może mieć wtedy działanie pozytywne, ponieważ równoważy negatywny wpływ suszy na rozwój wegetatywny rośliny. We francuskim eksperymencie ze sztuczną regulacją opadów, 25-letnia uprawa orzecha włoskiego w systemie alejowym miała korzystny wpływ na plon groszku w międzyrzędziach pod względem ograniczenia wiosennej suszy glebowej (9). Podobnie pozytywne oddziaływanie drzew we współrzędnej uprawie jęczmienia dla fazy wypełniania ziarna przedstawili Arenas-Corraliza i in. (1) dla warunków hiszpańskich. W uprawie soi z wielogatunkowymi rzędami drzew w Kanadzie stwierdzono, że w warunkach suchego i ciepłego roku rośliny plonowały wyżej w odległości 12 i 20 m od zadrzewienia niż na poletku kontrolnym (23). Stres konkurencji roślin w uprawach alejowych może zostać ograniczony przez stosowanie praktyk pielęgnacyjnych, takich jak: przycinanie korzeni czy koron drzew, dopasowanie więzby, stosowanie okrywy glebowej (mulczu, poplonów), uprawy konserwującej czy wykorzystanie do uprawy gatunków o wyższej tolerancji na zacienienie. Jacobs i in. (31) podsumowali badania nad wpływem drzew na mikroklimat i bilans wodny w uprawach alejowych w strefie umiarkowanej, zauważając, że silne efekty ich oddziaływania zaobserwowano tylko w obrębie rzędów lub w bliskiej odległości od drzew, podczas gdy wilgotność gleby w dalszej odległości zależała od specyficznych uwarunkowań lokalnych oraz roślinności.

Uprawy współrzędne w sadach są również pod wpływem specyficznego mikroklimatu stworzonego przez rzędy drzew. Stwierdzono wyraźną poprawę plonowania w przypadku warzyw korzeniowych wysiewanych wiosną i kończących wegetację latem (np. rzodkwi zwyczajnej) (48). Można założyć, że rośliny, które wymagają lepszych gleb, ale są bardziej odporne na suszę, korzystają lepiej z warunków stworzonych przez systemy rolno-leśne (wzrost zawartości materii organicznej oraz mineralizacji azotu). Zmiany mikroklimatu w sadzie wynikają ze spadku temperatury w ciągu dnia w sąsiedztwie drzew (do $1,5^{\circ}\text{C}$ w odległości 1,5 m od drzew) i wzrostu wilgotności gleby. Jednocześnie zaobserwowano wzrost temperatury o 2°C pod drzewami późnym popołudniem. Zjawisko to wynika między innymi z blokowania ciepła odbitego z gruntu przez korony drzew oraz uwalniania przez drzewa ciepła nagromadzonego podczas dnia (21, 55, 62).

Próbując wyjaśnić złożoność przepływu ciepła w systemach alejowych, Wang i in. (62) opracowali model bilansu wodnego dla uprawy współrzędnej w sadzie w systemie gleba-roślina-atmosfera (rys. 21) w połączeniu z modułem transportu wody w glebie. Jednocześnie wykonano eksperyment polowy w trzech wariantach: jabłonie + odkryta gleba; jabłonie + pas kupkówki pospolitej o szerokości 2,8 m, koszony

4–5 razy, aby utrzymać niskie pokrycie gleby; jabłonie + pas kupkówki pospolitej o tej samej szerokości, koszony 2–3 razy, aby utrzymać wysokie pokrycie gleby. Symulacje modelu dla wielolecia wykazały, że wariant z często koszoną kupkówką najbardziej ograniczył stratę wody wskutek ewapotranspiracji, zachowując największą jej ilość w glebie międzyrzędzia. W pierwszych 8 latach wzrostu jabłonie były wrażliwe na konkurencję o wodę ze strony trawy, ponieważ większość systemu korzeniowego drzew znajdowała się w zasięgu korzeni traw. Trawa koszona częściej ograniczyła transpirację drzew o 2,1%, podczas gdy kupkówka koszona rzadziej zmniejszyła transpirację o 7%. Z przeprowadzonych badań wynika, że zwiększenie częstości pokosu trawy w międzyrzędziach podnosi efektywność zużycia wody przez rośliny i w warunkach suszy glebowej poprawia gospodarowanie wodą w uprawach alejowego systemu rolno-leśnego.



Rys. 21. Schemat przepływu utajonych strumieni ciepła oraz oporów w systemie alejowym, gdzie:

λE_p , λE_s i $\lambda E_{\text{ś}}$ – strumienie ciepła utajonego z drzew, rośliny współrzędnej i gleby. Zakłada się, że te trzy rodzaje ciepła utajonego są transportowane z powierzchni parowania na średni poziom warstwy granicznej łanu roślin uprawnych oraz warstwy granicznej drzew, a następnie do warstwy referencyjnej systemu;

r_s^t , r_s^c i r_s^s – opory roślinności odpowiednio dla drzew, rośliny współrzędnej i gleby;

r_a^t i r_a^c – opory na skraju nowej powierzchni czynnej, kolejno dla warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łanu rośliny współrzędnej;

$r_a^{s,t}$ i $r_a^{s,c}$ – opory aerodynamiczne między powierzchnią gleby a kolejno średnim poziomem warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łanu rośliny współrzędnej;

$r_a^{a,t}$ – opór aerodynamiczny między średnim poziomem warstwy granicznej łanu roślin a warstwą referencyjną systemu alejowego;

$r_a^{a,c}$ – opór aerodynamiczny między średnim poziomem warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łanu rośliny współrzędnej.

Trudno ocenić rolę systemów leśno-pastwiskowych w ochronie zasobów wodnych, z uwagi na duże różnice w układzie drzew posadzonych na użytkach zielonych. Bardzo często są to systemy o układzie naturalnym lub nieregularnym, dostosowanym do lokalnych warunków ukształtowania terenu i stosunków wodnych. Jednak ich potencjał w zakresie ograniczenia strat spływu wód powierzchniowych jest uważany za największy spośród wszystkich systemów rolno-leśnych. Globalna metaanaliza w zakresie systemów rolno-leśnych (69) wykazała, że procent zmniejszenia strat wody przez systemy leśno-pastwiskowe był średnio wyraźnie wyższy (73%) niż w przypadku systemów rolno-leśnych z uprawami (43%) oraz zadrzewionych pasów buforowych (57%). W zbiorowiskach traw pastwisk leśnych w Szwajcarii zaobserwowano większą odporność roślin na suszę niż w zbiorowiskach pastwisk otwartych (25). Pozytywny wpływ drzew na plonowanie traw w klimacie umiarkowanym jest zwykle obserwowany w przypadku stresu suszy o średnim nasileniu (29).

Utrzymywanie niskich i równo rozmieszczonych drzew na pastwisku może zachęcać zwierzęta do korzystania z zacienienia o relatywnie wąskiej powierzchni i w efekcie ugniatania racicami miejsc w pobliżu drzew, niszcząc występującą tam run i drzewa oraz potencjalnie zwiększając spływ powierzchniowy (16, 38). Bardziej korzystne będą drzewa wyższe, rzucające dłuższy cień lub sieć żywopłotów zwiększająca powierzchnię zacienienia dla wypasanych zwierząt. Zadrzewienia kępowe na pastwiskach wielokrotnie zwiększają infiltrację i intercepcję w porównaniu z systemem leśno-pastwiskowym z drzewami o równomiernym rozmieszczeniu. Najbardziej skuteczne w ochronie przed powodzią i erozją wodną są ogrodzone zadrzewienia kępowe z podszytem, nasadzone przy dolnej krawędzi zbocza lub w połowie stoku (38).

Wnioski

1. Rozpatrując krążenie wody w krajobrazie, należy uwzględnić jednocześnie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody. Rozkład opadów i użytkowanie gruntu mają decydujący wpływ na strukturę bilansu cieplnego – udział parowania i ciepła jawnego.
2. W zlewniach o niskiej retencji pokrycie ich roślinnością odgrywa ważniejszą rolę dla obiegu wody niż wpływ zmian klimatycznych. Obszary zadrzewione posiadają istotny wpływ na bilans wodny zlewni poprzez wzrost ewapotranspiracji i ograniczenie spływu powierzchniowego. Zwykle drzewa zużywają na intercepcję i transpirację znacząco więcej wody niż większość pozostałych typów zbiorowisk roślinnych. Często dzieje się to kosztem zasobów wody gruntowej, do których mają dostęp głębsze korzenie drzew.
3. Występowanie zadrzewień śródpolnych zakłóca ruch powietrza, powodując tworzenie się wirów o różnym charakterze, początkowo przechwytyjących parę wodną, a następnie, jeśli warunki na to pozwalają, mieszejących przypowierzch-

niowe warstwy powietrza, co w efekcie ogranicza wymianę gazów pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą, w tym przepływ pary wodnej.

4. Wysokość zadrzewienia i prędkość wiatru na otwartej przestrzeni są głównymi czynnikami wpływającymi na zasięg wiatrochronnego oddziaływania, podczas gdy porowatość zadrzewienia jest krytycznym czynnikiem określającym wielkość redukcji prędkości wiatru.
5. Im dłuższy pas zadrzewienia, tym większa powierzchnia gruntu rolnego może korzystać z ochrony przed parowaniem. Ogólna zasada mówi, że długość pasa powinna być większa niż 10 wysokości zadrzewienia.
6. Pas zadrzewienia w największym stopniu ogranicza prędkość wiatrów, jeśli jest zlokalizowany prostopadłe do dominującego kierunku wiatru. Najbardziej skuteczna jest lokalizacja pasów wiatrochronnych na obszarze płaskiego terenu.
7. W efekcie oddziaływania półprzepuszczalnych pasów przeciwwietrznych następuje wzrost plonowania roślin uprawnych znajdujących się w strefie oddziaływania zadrzewień. Wiatrochronne zadrzewienia zmniejszają plony w latach o średnich lub ponadprzeciętnych opadach deszczu, ale zwiększają je w suchych, wietrznych warunkach.
8. Drzewa uprawiane w systemach alejowych w silnej więźbie (tak jak w przypadku drzew krótkiej rotacji) poprawiają bilans wodny pola, z reguły na zasadzie spełniania funkcji przeciwwietrznych. W warunkach suszy, szczególnie na glebach lekkich, drzewa są zmuszone do wydłużania systemu korzeniowego w głąb gleby, aby ograniczyć konkurencję o wodę z innymi drzewami.
9. Drzewa nasadzone w luźniejszych odstępach od siebie (np. drzewa owocowe lub z przeznaczeniem na drewno wysokiej jakości) są o wiele mniej efektywne w poprawie mikroklimatu, ale w wyniku mniejszej szerokości międzyrzędzi mogą mieć wyraźniejszy wpływ na obniżenie temperatury dziennej w łanie roślin uprawnych, ograniczenie spływu powierzchniowego i wzrost wilgotności gleby.
10. Stres wodny roślin uprawianych w systemach alejowych może zostać ograniczony przez stosowanie praktyk pielęgnacyjnych, takich jak: przerzedzanie drzew, przycinanie korzeni i koron drzew, dopasowanie więźby, praktyki uprawowe (stosowanie okrywy glebowej – mulczu, poplonów, uprawy konserwującej) czy wykorzystanie do uprawy gatunków o wyższej tolerancji na zacienienie.
11. Systemy leśno-pastwiskowe mogą znacząco ograniczyć spływ wód powierzchniowych. Najbardziej korzystne dla bilansu wodnego na pastwisku są drzewa wysokie rzucające dłuższy cień, sieć żywopłotów zwiększająca powierzchnię zacienienia dla wypasanych zwierząt lub ogrodzone zadrzewienia kępowe zlokalizowane przy dolnej krawędzi zbocza lub w połowie stoku.

12. W krótkim okresie zadrzewienia śródpolne i systemy rolno-leśne mogą niekorzystnie oddziaływać na zlewnię, ale w dłuższej perspektywie czasowej, zwłaszcza jeśli są odpowiednio rozmieszczone w krajobrazie, zwiększają retencję i poprawiają jakość wody oraz regularność przepływów cieków, a przy odpowiednich uwarunkowaniach struktury roślinności przyczyniają się również do poprawy mikroklimatu.

Literatura

1. Arenas-Corraliza M.G., López-Díaz M.L., Moreno G.: Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **264**: 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.024>
2. Argete J.C., Wilson J.D.: The microclimate in the centre of small square sheltered plots. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **48**, 1-2: 185-199. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90016-6)
3. Asghar M.A., Du J., Jiang H., Li Y., Sun X., Shang J., Liu J., Liu W., Imran S., Iqbal N., Ahmad B., Hussain S., Yu L., Liu C., Yang W.: Shade pretreatment enhanced drought resistance of soybean, *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **171**: 103952. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103952>
4. Badorreck A., Uckert G., Keutmann S., Guse T., Quinkenstein A., Böhm C., Freese D.: Agroforstsysteme als eine an zunehmende Trockenheit angepasste Form der Landnutzung, In: *Land- Und Ernährungswirtschaft Im Klimawandel; Auswirkungen, Anpassungsstrategien Und Entscheidungshilfen*, R. Bloch, J. Bachinger, R. Fohrmann, R. Pfriem (eds). Vol. *Klimawandel in Regionen Zukunftsfähig Gestalten*. München, Niemcy, 2014, pp. 125-135.
5. Baldwin C.S.: The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 191-203. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90018-7)
6. Bayala J., Prieto I.: Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, 2020, **453**: 17-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>
7. Bertness M.D., Callaway R.: Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, **9**(5): 191-193. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90088-4)
8. Bird P.R., Jackson T.T., Kearney G.A., Roache A.: Effects of windbreak structure on shelter characteristics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, **47**(6): 727-737. <https://doi.org/10.1071/EA06086>
9. Blanchet G., Barkaoui K., Bradley M., Dupraz C., Gosme M.: Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, **208**(5): 583-598. <https://doi.org/10.1111/jac.12488>
10. Böhm C., Kanzler M., Freese D.: Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems*, 2014, **88**: 579-591. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
11. Borek R., Mosquera-Losada M.: Trawy i rośliny bobowate odporne na zacinienie. Broszura AFINET, 2019. https://euraf.isa.utl.pt/files/pub/20191014_factsheet_43_pl_web_0.pdf
12. Brande J.R., Hodges L., Zhou X.H.: Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, 2004, **61**: 65-78. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62>
13. Cablík J., Jůva K.: Protierozní ochrana půdy. SZN, Praha, 1963, pp. 324.
14. Caldwell M.M., Dawson T.E., Richards J.H.: Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 1998, **113**: 151-161. <https://doi.org/10.1007/s004420050363>

15. Carrick J., Abdul Rahim M.S.A.B., Adjei C., Ashraa Kalee H.H.H., Banks S.J., Bolam F.C., Campos Luna I.M., Clark B., Cowton J., Domingos I.F.N., Golicha D.D.: Is planting trees the solution to reducing flood risks? *Journal of Flood Risk Management*, 2019, **12**(S2): p.e12484. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12484>
16. Chandler K.R., Stevens C.J., Binley A., Keith A.M.: Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation. *Geoderma*, 2018, **310**: 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.011>
17. Cleugh H.A., Hughes D.E.: Impact of shelter on crop microclimates: a synthesis of results from wind tunnel and field experiments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, **42**(6): 679-701. [10.1071/EA02005](https://doi.org/10.1071/EA02005)
18. Cleugh H.A.: Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, 1998, **41**: 55-84. <https://doi.org/10.1023/A:1006019805109>
19. Cornelis W.M., Gabriels D.: Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*, 2005, **61**(2): 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.005>
20. Day W., Legg B.J., French B.K., Johnston A.E., Lawlor D.W., Jeffers W.D.C.: A drought experiment using mobile shelters: The effect of drought on barley yield, water use and nutrient uptake. *The Journal of Agricultural Science*, 1978, **91**: 599-623. <https://doi.org/10.1017/S0021859600059992>
21. Dupont S., Patton E.G.: Influence of Stability and Seasonal Canopy Changes on Micrometeorology within and above an Orchard Canopy: The CHATS Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **157**: 11-29. <https://doi.org/10.48044/jauf.1993.049>
22. Espeleta J.F., West J.B., Donovan L.A.: Species-specific patterns of hydraulic lift in co-occurring adult trees and grasses in a sandhill community. *Oecologia*, 2004, **138**: 341-349. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1460-8>
23. Gagné G., Lorenzetti F., Cogliastro A., Rivest D.: Soybean performance under moisture limitation in a temperate tree-based intercropping system. *Agricultural Systems*, 2022, **201**: 103460. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103460>
24. Gardiner B., Palmer H., Hislop M.: The principles of using wood for shelter. Forestry Commission, 2006, UK, pp. 8. <https://cdn.forestryresearch.gov.uk/2006/03/fcin081.pdf>
25. Gavazov K., Spiegelberger T., Buttler A.: Transplantation of subalpine wood-pasture turfs along a natural climatic gradient reveals lower resistance of unwooded pastures to climate change compared to wooded ones *Oecologia*, 2014, **174**(4): 1425-1435. [doi:10.1007/s00442-013-2839-9](https://doi.org/10.1007/s00442-013-2839-9)
26. Ghazavi G., Thomas Z., Hamon Y., Marie J.C., Corson M., Merot P.: Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, **22**(24): 4723-4735. <https://doi.org/10.1002/hyp.7081>
27. Ghazavi R., Thomas Z., Hamon Y., Merot P.: Soil water movement under a bottomland hedgerow during contrasting meteorological conditions. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(9): 1431-1442. <https://doi.org/10.1002/hyp.7909>
28. Heisler G.M., De Walle D.R.: Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22/23**: 41-69. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90007-2)
29. Hernández-Salmerón I.R., Holmgren M.: Global meta-analysis: Sparse tree cover increases grass biomass in dry pastures. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 949185. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.949185>
30. Hoek van Dijke A.J., Herold M., Mallick K., Benedict I., Machwitz M., Schlerf M., Pranindita A., Theeuwes J.J., Bastin J.F., Teuling A.J.: Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(5): 363-368. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00935-0>

31. Jacobs S.R., Webber H., Niether W., Grahmann K., Lüttschwager D., Schwartz C., Breuer L., Bellingrath-Kimura S.D.: Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, **323**: 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
32. Jaehne S.C., Dohrenbusch A.: Ein Verfahren zur Beurteilung der Bestandesdiversität. *Forstwiss Cent*, 1997, **116**: 333-345. <https://doi.org/10.1007/BF02766909>
33. Judd M.J., Raupach M.R., Finnigan J.J.: A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity fields. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, **80(1-2)**: 127-165. <https://doi.org/10.1007/BF00119015>
34. Kanzler M., Böhm C., Mirck J., Schmitt D., Veste M.: Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 2019, **93**: 1821-1841. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>
35. Kędziora A.: Podstawy agrometeorologii. PWRiL, 1999, ss. 364.
36. Kujawa A., Kujawa K., Zajączkowski J., Borek R., Tyszkó-Chmielowiec P., Chmielowiec-Tyszkó D., Józefczuk J., Krukowska-Szopa I., Śliwa P., Witkoś-Gnach K.: Zadrzewienia na obszarach wiejskich – dobre praktyki i rekomendacje. Fundacja Ekorozwoju, Wrocław, 2018. <http://drzewa.org.pl/publikacja/1655-2/>
37. List H.H., White J.C.: Plant hydraulic lift of soil water—implications for crop production and land restoration. *Plant and Soil*, 2008, **313**: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9696-z>
38. Lunka P., Patil D.S.: Impact of tree planting configuration and grazing restriction on canopy interception and soil hydrological properties: implications for flood mitigation in silvopastoral systems. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 945-958. <https://doi.org/10.1002/hyp.10630>
39. Markwitz C., Knoch A., Siebicke L.: Evapotranspiration over agroforestry sites in Germany. *Biogeosciences*, 2020, **17**: 5183-5208. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5183-2020>
40. Markwitz C., Siebicke L.: Low-cost eddy covariance: a case study of evapotranspiration over agroforestry in Germany. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**: 4677-4696. <https://doi.org/10.5194/amt-12-4677-2019>
41. Marshall J.K.: The effect of shelter on the productivity of grasslands and field crops. *Field Crop Abstracts*, 1967, **20**: 1-14.
42. Martin R.J., Jamieson P.D.: Effect of timing and intensity of drought on the growth and yield of field peas (*Pisum sativum* L.). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1996, **24**: 167-174. <https://doi.org/10.1080/01140671.1996.9513949>
43. McNoughton K.: Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 17-39. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90006-0)
44. Neumann M., Starlinger F.: The significance of different indices for stand structure and diversity in forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, **145(1-2)**: 91-106. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00577-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00577-6)
45. Norton R.L.: Windbreaks: Benefits to orchard and vineyard crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 205-213. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90019-9)
46. Nosek Š., Kellnerov R., Jurčáková K., Jaňour Z., Chaloupecká H., Jakubcová M.: Effect of shelter porosity on downwind flow characteristics. *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, 2016, **114**: 02084. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402084>
47. Pašák V.: Wind erosion on soils. *Scientific Monographs, Výzkumný ústav meliorací, Zbraslav nad Vltavou*, 1970.
48. Ramananjatovo T., Chantoiseau E., Guillermin P., Gu'enon R., Delaire M., Buck Sorlin G., Cannavo P.: Growth of vegetables in an agroecological garden/orchard system: The role of spatiotemporal variations of microclimatic conditions and soil properties. *Agronomy*, 2021, **11**: 1888. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091888>

49. Řeháček D., Khel T., Kučera J., Vopravil J., Petera M.: Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion. *Soil and Water Research*, 2017, **12**(2): 128-135. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/swr/2017/02/07.pdf>
50. Rutkowski P.: Woda w ekosystemach leśnych Wielkopolski. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 2008, **10**(2[18]): 236-241. <https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmetal.element.agro-article-36735b1e-a10d-48fb-bd91-d27e2ac909e2/c/Rutkowski.pdf>
51. Ryszkowski L., Kędziora A.: Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(4): 388-400. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.023>
52. Schippers B., Schroth M.N., Hildebrand D.C.: Emanation of water from underground plant parts. *Plant Soil*, 1967, **27**: 81-91. <https://doi.org/10.1007/BF01373979>
53. Schmidt M., Jochheim H., Kersebaum K.C., Lischeid G., Nendel C.: Gradients of microclimate, carbon and nitrogen in transition zones of fragmented landscapes—a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **232**: 659-671. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.022>
54. Shi X., Conway-Anderson A.: Assessing the sustainability of silvopasture systems. *CABI Reviews*, 2022. <https://doi.org/10.1079/cabireviews202217047>
55. Souch C.A., Souch C.: The Effect of Trees on Summertime below Canopy Urban Climates: A Case Study Bloomington, Indiana. *Arboricultural Journal*, 1993, **19**: 303-312.
56. Sudmeyer R., Bicknell D., Coles N.: Tree windbreaks in the wheatbelt. Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia, Perth. Bulletin 4723, 2007, pp. 27. <https://library.dpird.wa.gov.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1196&context=bulletins>
57. Sudmeyer R.A., Adams M.A., Eastham J., Scott P.R., Hawkins W., Rowland I.C.: Broadacre crop yield in the lee of windbreaks in the medium and low rainfall areas of south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, **42**(6): 739-750. <https://doi.org/10.1071/EA02011>
58. Thomas Z., Ghazavi R., Merot P., Granier A.: Modelling and observation of hedgerow transpiration effect on water balance components at the hillslope scale in Brittany. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(26): 4001-4014. <https://doi.org/10.1002/hyp.9198>
59. Vacek Z., Řeháček D., Cukor J., Vacek S., Khel T., Sharma R.P., Kučera J., Král J., Papaj V.: Windbreak efficiency in agricultural landscape of the Central Europe: multiple approaches to wind erosion control. *Environmental Management*, 2018, **62**: 942-954. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1090-x>
60. van Noordwijk M., Barges-Tobella A., Muthuri C., Gebrekirstos A., Maimbo M., Leimona L., Bayala J., Xing M., Lasco R., Xu J., Ong C.K.: Trees as part of nature-based water management. In: Sustainable development through trees on farms: agroforestry in its fifth decade, van Noordwijk M. et al. (eds). Bogor, Indonesia: World Agroforestry (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, 2019, pp. 299-327. <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/BC19024.pdf>
61. Wang H., Takle E.S.: Momentum budget and shelter mechanism of boundary-layer flow near a shelterbelt. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **82**: 417-437. <https://doi.org/10.1023/A:1000262020253>
62. Wang Z., Wu Y., Cao Q., Shen Y., Zhang B.: Modeling the coupling processes of evapotranspiration and soil water balance in agroforestry systems. *Agricultural Water Management*, 2021, **250**: 106839. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106839>
63. Wołoszyn E.: *Meteorologia i klimatologia w zarysie*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2009, ss. 357.
64. Wu T., Zhang P., Zhang L., Wang J., Yu M., Zhou X., Wang G.G.: Relationships between shelter effects and optical porosity: A meta-analysis for tree windbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **259**: 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.013>

-
65. Wu Y.S., Feng Y.A.N.G., Gong W.Z., Ahmed S., Fan Y.F., Wu X.L., Yong T.W., Liu W.G., Kai S.H.U., Jiang L.I.U., Du J.B.: Shade adaptive response and yield analysis of different soybean genotypes in relay intercropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(6): 1331-1340. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61525-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61525-3)
66. Yoder C.K., Nowak R.S.: Hydraulic lift among native plant species in the Mojave Desert. *Plant Soil*, 1999, **215**: 93-102 <https://doi.org/10.1023/A:1004729232466>
67. Zajączkowski J., Zajączkowski K.: *Hodowla lasu. Zadrzewienia*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 2013, ss. 179.
68. Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R.: Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, **37**(3): 701-708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>
69. Zhu X., Liu W., Chen J., Bruijnzeel L.A., Mao Z., Yang X., Cardinael R., Meng F.R., Sidle R.C., Seitz S., Nair V.D.: Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes. *Plant and Soil*, 2020, **453**: 45-86. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Robert Borek
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786 763
email: rborek@iung.pulawy.pl

AUTOR
Robert Borek

ORCID
0000-0001-9414-3181

Rafał Wawer, Eugeniusz Nowocień

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

OCHRONA RETENCYJNOŚCI GLEB.
EROZJA WODNA I WIETRZNA W POLSCE*

Słowa kluczowe: erozja gleb, melioracje przeciwerozyjne, ochrona gleb

Wstęp

W latach 80. ubiegłego stulecia badania przeprowadzone w wielu ośrodkach naukowych wykazały, że na wszystkich kontynentach obniża się produktywność gleb użytkowanych rolniczo. Tę niepokojącą prognozę zmian środowiska przyrodniczego podjęła i upowszechniła organizacja FAO. Za jedną z głównych przyczyn obniżania się produktywności gleb uznano erozję wodną, a w krajach tropikalnych erozję wietrzną (10, 14). W różnych strefach geograficznych na kuli ziemskiej podejmowane są odpowiednie kierunki działań zapewniające rolnictwu trwałość i produktywność. W strefach klimatycznych zagrożonych suszą i erozją wietrzną upowszechnia się zadrzewienia przydrożne i śródpolne (3, 6, 20, 21, 22, 44, 61), a w terenach degradowanych przez erozję wodną stosuje się zabiegi techniczne (22, 61), fitomelioracyjne (3, 21, 22, 41, 58, 60, 61), agromelioracyjne (3, 21, 28, 61), agrotechniczne (9, 21, 61) i urzędzeniowo-rolne (21, 22, 57), ukierunkowane zwłaszcza na zwiększenie retencyjności gruntów i ograniczenie powierzchniowych spływów wody ze stoków.

O rozmiarach degradowania świadczą średnie roczne straty gleby, które dla Polski oszacowano na $76 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ wobec $84,7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ w Europie (18, 19), przy regionalnym zróżnicowaniu od $2,7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ na Nizinach Środkowopolskich do $280 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ w Karpatach Fliszowych (29). Dla porównania straty te na innych kontynentach przedstawiają się następująco: Afryka, Ameryka Południowa i Antyle – ok. $700 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, Azja – ok. $600 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, Ameryka Północna i Środkowa – ok. $500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, Australia – ok. $300 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ (18).

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

W Polsce najbardziej negatywne skutki przyrodnicze i gospodarcze są powodowane przez erozję wodną powierzchniową (fot.1) i erozję wązową (fot. 2) (1, 2, 15, 16, 18, 19, 27, 30, 31, 38, 39, 40, 47, 48). Erozja wietrzna (fot. 3) chociaż występuje powszechnie, to w znacznie mniejszym stopniu degraduje gleby niż erozja wodna (16, 17, 18, 19, 38). Lokalnie dewastację gruntów powodują również ruchy mas ziemnych, zwłaszcza osuwiska (21, 22, 34, 35, 36, 37, 52, 53, 54, 61).



Fot. 1. Pole zniszczone przez erozję wodną powierzchniową liniową podczas jednej ulew (fot. R. Wawer)



Fot. 2. Zniszczone pole pocięte wązami podczas jednej ulew (fot. Józefaciukowie)



Fot. 3. Odsłonięta gleba narażona na erozję wietrzną.
Wiosenna susza w kwietniu 2019 r. na glebie po ziębli (fot. R. Wawer)

Erozja wodna powierzchniowa

Erozja wodna jest jednym z czynników degradujących środowisko przyrodnicze, zwłaszcza rolniczą przestrzeń produkcyjną. Jej skutki przejawiają się w niekorzystnych, przeważnie trwałych zmianach warunków przyrodniczych (rzeźby, gleb, stosunków wodnych, naturalnej roślinności) i warunków gospodarczo-organizacyjnych (deformowanie granic i rozczłonkowanie pól, pogłębianie dróg, niszczenie urządzeń technicznych). Zmiany takie prowadzą do obniżenia potencjału produkcyjnego i walorów ekologicznych terenów podlegających erozji.

Przeprowadzone analizy potencjalnego zagrożenia erozją wodną (17) wykazały, że ok. 29% obszaru Polski, w tym 21% użytków rolnych, głównie gruntów ornych i ok. 8% powierzchni lasów jest zagrożonych erozją wodną (tab. 1), w tym silną – 4%, średnią – 11%, a słabą – 14% (18). Analiza erozji wodnej aktualnej (56) wskazuje na znacznie niższy udział obszarów zagrożonych najintensywniejszymi stopniami erozji, co jest wynikiem korzystnego układu użytków, przede wszystkim porzucenia użytkowania ornego stromych stoków. Ze względu na niską rozdzielczość mapy użytkowania terenu CORINE Land Cover 2000 w dalszej części pracy pozostaniemy przy wskaźniku potencjalnego zagrożenia erozją.

Najsilniej zagrożone krainy fizjograficzne to: Beskid Żywiecki w woj. śląskim, Góry Świętokrzyskie i Wyżyna Sandomierska w woj. świętokrzyskim, Rostocze i centralny pas Wyżyny Lubelskiej w woj. lubelskim oraz Sudety w woj. dolnośląskim. Wymienione województwa są objęte drugim stopniem pilności ochrony przeciwo-erozyjnej gruntów – ochrona pilna. Taki sam stopień pilności ochrony występuje także w woj. pomorskim i zachodniopomorskim. W tych województwach erozja średnia przeważa lub zajmuje takie same powierzchnie jak erozja słaba, od 13% do 23%

ogólnego obszaru. W sześciu pozostałych województwach: lubuskim, łódzkim, mazowieckim, opolskim, podlaskim i wielkopolskim – o równinnym charakterze rzeźby terenu, erozja średnia występuje na kilku procentach ogólnej powierzchni, a silna na poniżej 1%. Są to województwa o najmniej pilnej ochronie przed erozją (tab. 1).

Biorąc pod uwagę warunki regionalne (5, 26), można wyróżnić cztery rozległe obszary – regiony o różnym stopniu zagrożenia erozją gleb.

Region górski. Bardzo silnie zagrożone erozją wodną są wszystkie góryste krainy karpackie znajdujące się w południowej części województw podkarpackiego, małopolskiego i śląskiego (7, 8, 11, 12, 13). Potencjalna erozja gleb o stopniu silnym i średnim występuje na powierzchni krain: od ok. 80% w Tatrach i Beskidach Zachodnich, ok. 60% w Bieszczadach i na Podhalu, do ok. 50% w Beskidach Środkowych. Silnie zagrożone są Sudety (4, 6), gdzie erozja silna i średnia występuje na 45% całości obszaru. Takie zagrożenie przez erozję wodną regionów karpackiego i sudeckiego determinują bardzo duże wysokości względne (do ok. 2600 m n.p.m.), duże nachylenia stoków oraz wysokie roczne sumy opadów atmosferycznych, od 800 do 1800 mm, najczęściej powyżej 1000 mm.

Region pogórzy. Silnie zagrożone erozją wodną jest Pogórze Beskidzkie (42), gdzie erozja silna i średnia występuje na ok. 45% obszaru. Jest to uwarunkowane bardzo urozmaiconą rzeźbą terenu i dużymi spadkami stoków, rocznymi sumami opadów od 600 do 1000 mm oraz znaczną powierzchnią pokrytą najbardziej podatnymi na zmywanie powierzchniowe glebami lessowymi. W północnej części regionu występują gleby pseudobielicowe i gleby bielicowe utworzone z lessów i utworów lessowatych, kompleksu pszennego górskiego. W części południowej wprawdzie przeważa typ gleb pseudobielicowych i gleb brunatnych wyługowanych utworzonych z glin słabo podatnych na zmywy i należących do kompleksu zbożowego górskiego, lecz już w części zachodniej duży udział mają gleby lessowe.

Pogórze Sudeckie natomiast jest średnio zagrożone. Erozja silna i średnia występuje na powyżej 10% obszaru tej krainy.

Region wyżyn. Wyżyna Lubelska wraz z Rostoczem (22, 32, 33, 54, 55, 59), Niecka Nidziańska i Wyżyna Krakowsko-Częstochowska są silnie, a Wyżyna Kielecko-Sandomierska średnio zagrożone erozją wodną. Istotnie wysokie zagrożenie erozją wodną powierzchniową występuje również na lessowym obszarze Wzgórz Trzebnickich w woj. dolnośląskim (45, 46, 49, 50). Jest to wynikiem urozmaiconej rzeźby terenu, bardzo dużej podatności gleb lessowych na zmywy powierzchniowe, generalnie małej powierzchni lasów (w znacznej części zlewni zaledwie po kilka procent) i trwałych użytków zielonych oraz przewagi wzdłużstokowego układu działek.

Region pojezierzy. Obejmuje Pojezierza Wschodniobałtyckie oraz Pojezierza i Pobrzeża Południowobałtyckie (46, 51). Generalnie jest to obszar zagrożony erozją wodną w stopniu średnim, a tylko Pojezierza Suwalskie i Wschodniopomorskie w stopniu silnym.

Potencjalnie najbardziej zagrożone erozją wodną powierzchnią jest woj. małopolskie – ok. 57% ogólnego obszaru, w tym dominuje erozja silna (26% obszaru) nad średnią (21% obszaru). Również w woj. podkarpackim przeważa zagrożenie erozją silną – 17% ogólnego obszaru. Erozja o stopniu średnim występuje w nim na ok. 11%, a w stopniu słabym na 8% obszaru województwa. Głównie jest zagrożona cała południowa część województwa, przy czym w Bieszczadach i na pogórzu Karpat przeważa zagrożenie o stopniu silnym. W obu wymienionych województwach występuje pierwszy stopień pilności przeciwdziałania erozji – ochrona bardzo pilna. Poważny problem, chociaż występujący bardziej lokalnie, stwarza erozja wodna w województwach śląskim, świętokrzyskim, lubelskim i dolnośląskim, gdzie erozja silna łącznie ze średnią zagraża takiej samej lub nawet większej powierzchni województwa niż erozja słaba.

Rozpoznanie struktury sieci wąwozów umożliwia ocenę stopnia nasilenia erozji wąwozowej w różnych jednostkach przyrodniczych i gospodarczych – krainach fizjograficznych, zlewniach hydrograficznych, województwach i gminach. To daje podstawę dla programowania działań w zakresie rekultywacji i zagospodarowania gruntów zdewastowanych wąwozami.

Erozja wąwozowa występuje na ok. 18% powierzchni Polski (tab. 2), w tym największy obszar – ok. 11% (2,5 mln ha gruntów rolnych i 0,8 mln ha gruntów leśnych) zajmuje erozja słaba o gęstości wąwozów $0,1\text{--}0,5 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ (19). Znacznie mniejszy obszar – ok. 4% (1 mln ha gruntów rolnych i 0,3 mln ha gruntów leśnych) przypada na erozję średnią o gęstości wąwozów $0,5\text{--}1,0 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. Obszar ok. 2% (0,6 mln ha gruntów rolnych i 0,15 mln ha leśnych) zajmuje erozja silna o gęstości wąwozów $1,0\text{--}2,0 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. Na najmniejszym obszarze – poniżej 1% (0,1 mln ha gruntów rolnych i 25 tys. ha leśnych) występuje erozja bardzo silna o gęstości wąwozów powyżej $2,0 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. Łączna długość wąwozów w Polsce wynosi ok. 40 tys. km (18, 19, 20, 21, 38).

Tabela 1

Potencjalne zagrożenie powierzchniową erozją wodną gleb w Polsce według województw (21, 23)

Lp.	Województwo	Pow. ogólna km ²	Zagrożenie erozją w stopniu											
			1 – słabym				2 – średnim				3 – silnym			
			UR		Ls		UR		Ls		UR		Ls	
			km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
1.	dolnośląskie	19947,8	924,4	9,6	990,0	5,0	1361,5	6,8	754,2	3,8	289,7	1,5	346,1	1,7
2.	kujawsko-pomorskie	17969,7	2116,2	11,8	520,3	2,9	1773,6	9,9	671,2	3,7	57,0	0,3	3,6	0,0
3.	lubelskie	25114,5	3386,7	13,5	456,4	1,8	1927,3	7,7	280,7	1,1	1307,3	5,2	219,6	0,9
4.	lubuskie	13984,4	807,2	5,8	842,9	6,0	587,3	4,2	847,8	6,1	12,9	0,1	14,9	0,1
5.	łódzkie	18219,1	2139,9	11,7	442,1	2,4	771,0	4,2	287,2	1,6	78,9	0,4	16,8	0,1
6.	małopolskie	15144,1	1198,5	7,9	256,5	1,7	1712,5	11,3	1440,5	9,5	3116,0	20,6	848,2	5,6
7.	mazowieckie	35597,8	2641,1	7,4	539,4	1,5	1232,8	3,5	745,6	2,1	147,2	0,4	50,6	0,1
8.	opolskie	9412,5	676,3	7,2	156,9	1,7	200,8	2,1	116,9	1,2	8,1	0,1	1,2	0,0
9.	podkarpackie	17926,3	1168,2	6,5	349,6	2,0	1084,0	6,0	832,4	4,6	2015,6	11,2	1052,3	5,9
10.	podlaskie	20179,6	2836,1	14,0	692,5	3,4	488,9	7,4	479,2	2,4	51,2	0,2	13,2	0,1
11.	pomorskie	18292,9	2235,9	12,2	1023,4	5,6	2409,0	13,2	1789,0	9,8	29,2	0,2	20,9	0,1
12.	śląskie	12294,4	1914,8	1,6	560,2	4,6	831,6	6,8	840,8	6,8	658,9	5,4	199,1	1,6
13.	świętokrzyskie	11672,3	2269,9	19,4	500,3	4,3	982,9	8,4	192,7	1,7	829,8	7,1	92,0	0,8
14.	warmińsko-mazurskie	24203,0	2863,8	11,8	756,8	3,1	2566,9	10,6	872,0	3,6	10,0	0,0	9,5	0,0
15.	wielkopolskie	29825,6	1977,1	6,6	650,4	2,2	1416,9	4,8	885,0	3,0	45,1	0,2	49,3	0,2
16.	zachodniopomorskie	22901,5	2724,5	11,9	1401,1	6,1	1717,8	7,5	1355,0	5,9	4,0	0,0	2,3	0,0
	Polska	312685,0	32980,6	10,5	10138,8	3,2	22064,8	7,1	12390,2	4,0	8660,9	2,8	2939,6	0,9

Do 1. stopnia pilności przeciwerozryjnej ochrony w poszczególnych województwach należą powiaty:

Dolnośląskim – Jelenia Góra, Kłodzko, Lubań, Wałbrzych; **Lubelskim** – Hrubieszów, Janów Lubelski, Krasnostaw, Krasnik, Lublin, Świdnik, Zamość; **Małopolskim** – Bochnia, Chrzanów, Gorlice, Kraków, Limanowa, Miechów, Mysłenice, Nowy Sącz, Nowy Targ, Olkusz, Proszowice, Sucha Beskidzka, Tarnów, Tatrzański, Wadowice, Wieliczka; **Podkarpackim** – Bieszczadzki, Brzozowski, Dębica, Jasło, Krosno, Przemyśl, Ropczycko-Sędziszowski, Rzeszów, Sanok, Strzyżów; **Podlaskim** – Suwałki; **Pomorskim** – Bytów, Gdynia, Kartuzy, Kościerzyna, Lębork, Sopot, Wejherowo; **Śląskim** – Bielsko Biala, Bytom, Cieszyń, Jastrzębie Zdrój, Jaworzno, Wodzisław Śląski, Żywiec; **Świętokrzyskim** – Kazimierza Wielka, Opatów, Ostrowiec Świętokrzyski, Sandomierz, Starachowice; **Warmińsko-Mazurskim** – Nowe Miasto Lubawskie, Olecko

Źródło: Józefaciuk i Józefaciuk, 1998b (21); Józefaciuk i in., 2014 (23)

Najbardziej rozwiniętą sieć wąwozów ma województwo małopolskie, gdzie wąwozy występują na ok. 53% obszaru. Wprawdzie największy obszar (25%) zajmuje erozja wąwozowa średnia o gęstości wąwozów $0,5\text{--}1\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, to jednak na 14% obszaru występuje erozja silna o gęstości wąwozów $1\text{--}2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, a na powyżej 1% obszaru – erozja bardzo silna o gęstości wąwozów powyżej $2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. Województwo to zaliczono do pierwszego stopnia pilności ochrony – zagospodarowanie wąwozów bardzo pilne. Silnie rozczłonkowane wąwozami jest województwo podkarpackie, w którym 24% obszaru ma gęstość wąwozów powyżej $0,5\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, w tym aż 14% ma gęstość wąwozów $1\text{--}2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ (podobnie jak w woj. małopolskim). Szczególny problem stwarza erozja wąwozowa w województwie lubelskim. Ma ona bowiem największy (spośród wszystkich województw) obszar (około 3%) rozczłonkowany wąwozami o gęstości powyżej $2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$. Oprócz tego powyżej 4% obszaru ma gęstość wąwozów $1\text{--}2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, 7% obszaru gęstość $0,5\text{--}1\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, a tylko 6% obszaru gęstość poniżej $0,5\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$.

Duża gęstość wąwozów występuje także w woj. świętokrzyskim. Wąwozy występują tam na podobnym obszarze jak w woj. lubelskim – ok. 20%. Również podobny jak w woj. lubelskim obszar – 14% (jak w lubelskim) jest rozczłonkowany siecią wąwozów o gęstości powyżej $0,5\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, z tym że gęstość wąwozów powyżej $2\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ zajmuje niecałe 1% obszaru. Trzy województwa: podkarpackie, lubelskie i świętokrzyskie, zostały zaliczone do drugiego stopnia pilności zagospodarowania wąwozów – zagospodarowanie pilne.

Pozostałe województwa mają trzeci stopień pilności przeciwdziałania erozji wąwozowej – zagospodarowanie wąwozów pilne lokalnie. W tych województwach wąwozy o gęstości powyżej $0,5\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ występują na poniżej 10% powierzchni (18, 19, 20, 21, 24).

Połowę ogólnej sieci wąwozowej w Polsce stanowią wąwozy drogowe, których łączna długość wynosi 19 100 km, a powierzchnia ok. 17% ogólnej powierzchni wąwozów. Najwięcej wąwozów drogowych występuje w południowo-wschodniej i południowo-zachodniej części kraju, zwłaszcza w wyżynnych terenach lessowych. Największą gęstością wąwozów drogowych, powyżej $0,5\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, charakteryzują się województwa: podkarpackie, małopolskie, dolnośląskie i świętokrzyskie.

Erozja wietrzna

Przeprowadzone w IUNG-PIB badania wykazały (25), że ok. 36% obszaru Polski zagrożonych jest erozją wietrzną, w stopniu silnym i bardzo silnym – 37,5%, średnim – 14,3%, a w stopniu słabym – 24,1% (tab. 3).

Najbardziej zagrożone erozją wietrzną są województwa: wielkopolskie – ok. 77,6% ogólnego obszaru, w tym dominuje erozja silna (51,4% obszaru) nad średnią (22,2% obszaru); łódzkie – ok. 70,2% ogólnego obszaru, w tym erozja silna (44,3% obszaru) i średnia (15,1% obszaru) oraz mazowieckie – ok. 70,1% ogólnego obszaru, w tym erozja silna (41,6% obszaru) i średnia (17,9% obszaru). Znacznie zagrożone erozją wietrzną w najsilniejszych stopniach 3–5 są również województwa: lubuskie w 64,4% – przeważa zagrożenie erozją silną (41,4% ogólnego obszaru); podlaskie w 58,3% – przeważa zagrożenie erozją silną (41,0% ogólnego obszaru); zachodniopomorskie w 56,5% – przeważa zagrożenie erozją silną (34,3% ogólnego obszaru); pomorskie w 54,5% – przeważa zagrożenie erozją silną (32,4% ogólnego obszaru); kujawsko-pomorskie w 52,5% – przeważa zagrożenie erozją silną (32,0% ogólnego obszaru).

Najmniej zagrożone najsilniejszymi stopniami (3–5) erozji wietrznej są województwa: dolnośląskie – 24,0% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 15,6%, a erozją w stopniu średnim 8%; podkarpackie – 24,8% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 18,5%, a średnią 5%; opolskie – 26,7% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 15,5%, a średnią 10%.

Szczegółowe mapy i dane tabelaryczne zagrożenia poszczególnymi typami erozji dla gmin, powiatów i województwa znajdują się w następujących monografiach dostępnych za darmo na fanpage Puławskiego Ośrodka Badań Erozyjnych:

1. Józefaciuk A., Nowocien E., Wawer R., 2014. Erozja gleb w Polsce – skutki środowiskowe i gospodarcze, działania zaradcze. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB, nr 44, ss. 263. ISBN 978-83-7562-181-5 (23).
2. Józefaciuk A., Nowocien E., Wawer R., 2016. Rozwój, skutki i występowanie erozji wąwozowej w Polsce oraz metody zagospodarowania wąwozów. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB, nr 48, ss. 376. ISBN 978-83-7562-208-9 (24).
3. Józefaciuk A., Nowocien E., Wawer R., 2018. Erozja wietrzna w Polsce – występowanie, skutki, działania zaradcze. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB, nr 57, ss. 224. ISBN 978-83-7562-286-7 (25).

Tabela 3

Zagrożenie erozją wietrzną w województwach w stopniach od 1 do 5 z wyróżnieniem zagrożenia w stopniach od 3 do 5

Województwo	UR	Zagrożenie erozją wietrzną - stopnie											
		0		1		2		3		4		5	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Dolnośląskie	1259343	439347	34,9	125261	9,9	391887	31,1	100279	8,0	196567	15,6	6002	0,5
Kujawsko-pomorskie	1421647	228361	16,1	90964	6,4	355923	25,0	199657	14,0	455174	32,0	91568	6,4
Lubelskie	1927895	80047	4,2	221981	11,5	897866	46,6	213392	11,1	475489	24,7	39120	2,0
Lubuskie	762272	93976	12,3	89829	11,8	87829	11,5	143380	18,8	315658	41,4	31602	4,1
Łódzkie	1468426	32219	2,2	92668	6,3	313194	21,3	221073	15,1	650934	44,3	158338	10,8
Małopolskie	894452	267827	29,9	148379	16,6	392188	43,8	29143	3,3	53703	6,0	3212	0,4
Mazowieckie	2864924	158188	5,5	216257	7,5	482440	16,8	513957	17,9	1192167	41,6	301915	10,5
Opolskie	663461	249367	37,6	37718	5,7	199339	30,0	66044	10,0	102647	15,5	8345	1,3
Podkarpackie	887868	183766	20,7	53317	6,0	430384	48,5	44376	5,0	164038	18,5	11987	1,4
Podlaskie	1438026	150617	10,5	193479	13,5	255619	17,8	205231	14,3	588972	41,0	44107	3,1
Pomorskie	1167056	227509	19,5	148368	12,7	155397	13,3	202346	17,3	377960	32,4	55477	4,8
Świętokrzyskie	776739	90735	11,7	106379	13,7	276951	35,7	68769	8,9	177167	22,8	56737	7,3
Śląskie	641191	129103	20,1	103026	16,1	138390	21,6	67614	10,5	176710	27,6	26348	4,1
Warmińsko-mazurskie	1595297	500703	31,4	197536	12,4	258354	16,2	191980	12,0	412523	25,9	34202	2,1
Wielkopolskie	2521666	73327	2,9	186483	7,4	304752	12,1	560967	22,2	1295180	51,4	100956	4,0
Zachodniopomorskie	1447427	156482	10,8	179019	12,4	294324	20,3	273381	18,9	495883	34,3	48338	3,3
UR	21737691	3061575	14,1	2190664	10,1	5234837	24,1	3101593	14,3	7130776	32,8	1018260	4,7
Polska	31267900		9,8		7,0		16,7		9,9		22,8		3,3
													36,0

Źródło: Józefaciuk i in., 2018 (25)

Praktyki ochronne zapobiegające erozji wodnej – melioracje przeciwerozyjne

Obszary zagrożone erozją gleb, zwłaszcza tereny z erozją średnią, silną i bardzo silną, wymagają stosowania specjalnych działań prewencyjnych i rehabilitacyjnych, jakimi są melioracje przeciwerozyjne.

Melioracje przeciwerozyjne to nie tylko ochrona gleb i gruntów przed erozyjną degradacją i dewastacją, ale równocześnie najtańszy sposób walki z suszą, „stepowaniem” i powodziami.

Główne cele melioracji przeciwerozyjnych to:

- ograniczenie występowania i zmniejszenie nasilenia procesów erozyjnych;
- zachowanie potencjału produkcyjnego gleb i niedopuszczenie do jego niekorzystnych przemian;
- wydłużenie obiegu wody w krajobrazie i przeciwdziałanie deformacyjnym zmianom hydrografii i hydrologii cieków rzecznych;
- poprawienie ekotechnicznych warunków użytkowania ziemi, włącznie z rekultywacją gruntów zdewastowanych.

Podstawowymi zabiegami przeciwerozyjnymi są (23, 61):

- rozmieszczenie przestrzenne użytków produkcyjnych i ochronnych stosownie do rzeźby terenu;
- wprowadzenie układu działek i pól umożliwiającego poprzecznostokową (warstwicową) uprawę roli;
- stosowanie agrotechniki przeciwerozyjnej;
- planowanie dróg rolniczych z uwzględnieniem rzeźby terenu i ściśle skoordynowane z układem działek i pól oraz umacnianie erodowanych odcinków dróg;
- rekultywacja i zagospodarowanie nieużytków erozyjnych (np. wąwozów, stromych zboczy) oraz likwidowanie trudnej mikrorzeźby terenu;
- stosowanie urządzeń do rozpraszania i odprowadzania powierzchniowych spływów wody.

Każdy z wymienionych zabiegów wykazuje określone działanie ochronne, lecz najlepsze efekty uzyskuje się przy ich kompleksowym stosowaniu. Oczywiście udział poszczególnych zabiegów w systemie kompleksowym zależy od rodzaju form występowania i nasilenia erozji oraz warunków przyrodniczych i sposobu gospodarowania ziemią.

Pozytywne oddziaływanie zabiegów przeciwerozyjnych na produkcję rolną jest następujące:

- zapobieganie obniżaniu się urodzajności gleb i niekorzystnym zmianom właściwości fizykochemicznych i ubytkowi profilu gleby;
- przeciwdziałanie zakłócaniu stosunków wodnych w glebach i niekorzystnym zmianom hydrologii cieków wodnych oraz niszczeniu urządzeń melioracyjnych, a także zabagnianiu lub nadmiernemu osuszaniu gruntów;

- niedopuszczanie do rozczłonkowania rzeźby terenu przez wąwozy i inne formy erozyjne;
- zmniejszanie erozyjnych strat plonów;
- polepszanie warunków dla intensyfikacji produkcji przez uporządkowanie rozłogu gruntów rolnych – struktury użytków, układu pól i dróg, agrotechniki, rekultywacji nieużytków i innych.

Dodatni wpływ zabiegów przeciwoerozyjnych na inne dziedziny gospodarcze przejawia się między innymi w zmniejszaniu nakładów na następujące prace i zabiegi:

- usuwanie namulów i renowacje dróg oraz szlaków komunikacyjnych, urządzeń melioracyjnych i wodnych, budynków itp.;
- oczyszczanie z namulów szlaków wodnych oraz utrzymywanie w odpowiednim stanie czystości wód pitnych i przemysłowych;
- ochrona terenów zabudowanych (osiedli, obiektów przemysłowych i innych) przed zamulaniem i uszkodzaniem przez erozję;
- ochrona powietrza przed zanieczyszczeniem pyłem glebowym;
- utrzymanie walorów chronionego krajobrazu.

Zabiegi przeciwoerozyjne pod względem okresu działania można podzielić na trwałe (wieloletnie) i okresowe (sezonowe). Do działań trwałych należą przede wszystkim zabiegi o charakterze urządzeniowym, takie jak transformacja użytków, układ pól i dróg, zabudowa wąwozów, urządzenia techniczne (tarasowanie zboczy, umacnianie dróg i cieków stałych, budowa grobli itp.), zaś do działań okresowych należą agrotechnika przeciwoerozyjna, rowy odprowadzające okresowe spływy powierzchniowe i inne.

Nakłady finansowe na wykonanie poszczególnych zabiegów są różne. Duże nakłady i wysokie koszty jednostkowe mają zabiegi wymagające opracowania projektów technicznych i znacznego zmechanizowania robót wykonawczych, a zatem zabiegi określone jako techniczne oraz zabudowa wąwozów. Wymagają one również nakładów na bieżącą konserwację. Natomiast takie zabiegi jak wprowadzenie przeciwoerozyjnego układu użytków, pól i dróg praktycznie niewiele kosztują, zwłaszcza jeśli są połączone ze scalaniem gruntów. Nakłady na zabiegi okresowe corocznie wchodziły w koszty własne produkcji rolnej.

Melioracje przeciwoerozyjne mają wybitnie regionalny charakter i im bardziej są dostosowane do przyrodniczych i gospodarczych warunków danego obszaru, tym większa ich skuteczność ochronna i efektywność ekonomiczna (23).

Biorąc pod uwagę przyczyny i zjawiska erozji wodnej w rejonie gór i pogórzy oraz jej negatywne skutki gospodarcze, za nadrzędny cel melioracji przeciwoerozyjnych należy uznać ochronę i kształtowanie krajobrazu oraz gospodarkę zasobami wodnymi – wydłużenie obiegu wody w ekosystemach rolno-leśnych oraz magazynowanie jej nadwyżek podczas spływów powierzchniowych. Dlatego w systemie melioracji przeciwoerozyjnych priorytet powinny mieć: transformacja użytków – zwiększenie powierzchni lasów, łąk i pastwisk oraz rozmieszczenie użytków rolno-leśnych stosownie

do siedliskowej strefowości stoków; stosowanie poprzecznostokowego układu pól i pełnej agrotechniki przeciwoerozyjnej; korekta sieci dróg gruntowych – polegająca zwłaszcza na właściwym ich lokalizowaniu w rzeźbie terenu i umacnianiu odcinków erodowanych; biologiczno-techniczne utrwalanie form intensywnej erozji – wąwozów, debrzy, wciósów, osuwisk i innych; techniczno-biologiczna zabudowa sieci hydrograficznej wraz z budową zbiorników retencyjnych i rumowiskowych.

W rejonie wyżyn, zwłaszcza lessowych intensywnie degradowanych zmywami powierzchniowymi i erozją wąwozową pierwszoplanowym zadaniem jest ochronne kształtowanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej, którego głównymi elementami będą: poprzecznostokowy układ działek i pól, z sytuowaniem pól w możliwie jednorodnych siedliskach agrotechnicznych i stosowaniem pełnej agrotechniki przeciwoerozyjnej; przebudowa sieci dróg gruntowych, z uwzględnieniem zasad ochrony przeciwoerozyjnej i zwróceniem szczególnej uwagi na rozwiązanie problemu dróg w wąwozach; rekultywacja i zagospodarowanie nieużytków, zwłaszcza wąwozów. Transformacja użytków ma ograniczone możliwości ze względu na wysoką rolniczą bonitację gleb lessowych, dlatego w miejsce ewentualnych zalesień korzystniej jest wprowadzać sady urządzone przeciwoerozyjnie, co oczywiście nie wyklucza zwiększania powierzchni leśnej, jeśli tylko jest to uzasadnione ekonomicznie. Natomiast łąki i pastwiska znajdują odpowiednie warunki głównie w dolinach rzek. Warunki fizjograficzne umożliwiają także budowę zbiorników retencyjnych o charakterze wielofunkcyjnym, w tym również w wąwozach.

W regionie pojezierzy melioracje przeciwoerozyjne to głównie korekta struktury użytków – właściwe rozmieszczenie w rzeźbie stoku, zwiększenie powierzchni zalesień i trwałych zadarnień, a następnie stosowanie przeciwoerozyjnej struktury zasiewów i zmianowania roślin.

W regionie nizin zabiegi przeciwoerozyjne będą potrzebne tylko lokalnie i głównie o charakterze fitomelioracyjnym. Wyjątek stanowią tereny przymorskie, które wymagają kompleksowej ochrony przed abrazją (20, 21).

Agrotechnika przeciwoerozyjna

Agrotechnika przeciwoerozyjna może stanowić samodzielny zabieg na gruntach z erozją słabą i umiarkowaną oraz zabieg uzupełniający na gruntach bardziej erodowanych – począwszy od erozji średniej (21, 23).

Wśród zabiegów agrotechnicznych podstawowe znaczenie ma poprzecznostokowa uprawa roli. Poprzecznostokowa orka jesienna, na zboczach o spadku do 10%, kilkakrotnie zmniejsza nasilenie erozji i równocześnie zwiększa, od kilkunastu do kilkudziesięciu milimetrów, zapas wody w jednometrowej warstwie gleby (po roztopach śniegowych) oraz zwiększa plony. Im orka jest głębsza, bardziej wyskibiona, tym większy jest jej wpływ na retencjonowanie wody. Orkę najlepiej wykonuje się pługiem obracalnym, z odkładaniem skiby w górę stoku. Wówczas glebę przemieszcza

się w odwrotnym kierunku niż procesy erozyjne, co w znacznym stopniu równoważy bilans przemieszczeń poziomu orno-próchniczego.

Oprócz orki ważny jest poprzecznostokowy kierunek siewu i sadzenia, który w okresie wegetacji roślin znacznie ogranicza nasilenie erozji. Termin siewu zwłaszcza ozimin, powinien być możliwie wczesny, ponieważ wtedy zapewnia dobre ukorzenie i rozkrzewienie roślin, a przez to lepszą przeciwoerozyjną ochronę gleby. Wskazany jest głębszy wysiew nasion - ziarno jest lepiej chronione przed ewentualnym zmyciem, a wężły krzewienia są lepiej zabezpieczone przed odsłonięciem.

Nawożenie gleb w terenach erodowanych powinno być zróżnicowane na poszczególnych elementach rzeźby, ze względu na wyraźne odrębności siedliskowe. Najobfitszego nawożenia wymagają gleby na zboczach, zwykle najuboższe i łatwo przesychające. Szczególnie wskazane są tam nawozy organiczne. Zwiększone dawki nawozów mineralnych, zwłaszcza azotu i potasu, są również wykorzystywane efektywnie. Słabo lub wcale nieerodowane gleby na wierzchołkach wymagają mniejszego nawożenia niż na zboczach, a najmniejszego zwykle zasobne w próchnicę gleby u podnóżu zboczy oraz w dolinach.

Odpowiedni dobór i następstwo roślin w płodozmianie stanowią kolejne podstawowe ogniwo w systemie agrotechniki przeciwoerozyjnej. Największe właściwości przeciwoerozyjne mają trawy i ich mieszanki z roślinami bobowatymi, a następnie wieloletnie bobowate. Gatunki jednoroczne charakteryzują się mniejszymi zdolnościami ochronnymi, przy czym zboża ozime – żyto i rzepak, a następnie pszenica i jęczmień – lepiej chronią glebę przed erozją niż zboża jare. Zmianowanie roślin w terenach podlegających erozji wodnej powinno być różne na poszczególnych elementach stoku. Na wierzchołkach można stosować płodozmiany z przewagą gatunków towarowych, na zboczach z przewagą glebochronnych, na podnóżach płodozmiany intensywne z dwuletnią uprawą roślin dobrze chroniących glebę, a w dolinach płodozmiany z nasileniem upraw na zieloną masę.

Płodozmiany przeciwoerozyjne. Właściwy dobór gatunków roślin i odpowiednie ich zmianowanie stanowi kapitalny zabieg przeciwoerozyjny na gruntach ornych, niestety często jeszcze niedoceniany. Gatunki wieloletnie, takie jak trawy i ich mieszanki z bobowatymi, a następnie tylko same bobowate (koniczyna, lucerna) mają największą wartość przeciwoerozyjną. Spośród roślin jednorocznych pierwszeństwo mają rośliny ozime w kolejności – żyto, rzepak, jęczmień i pszenica. Następną grupą są jare. Okopowe najslabiej chronią glebę przed erozją. W górach i na pogórzu, gdzie krytycznym okresem występowania erozji są ulewy letnie nie ma zasadniczej różnicy w wartości przeciwoerozyjnej zbóż jarych i ozimych. Natomiast na wyżynach, gdzie procesy erozyjne występują głównie podczas roztopów śniegowych, zróżnicowanie wartości ochronnej jest bardzo wyraźne (na korzyść ozimych).

Zmianowanie roślin zależy od rzeźby terenu, układu i wielkości pól, warunków siedliskowych i sposobu gospodarowania. W płodozmianach przeciwoerozyjnych powinny dominować rośliny o dużych właściwościach ochronnych, a zabiegi spulch-

niające glebę powinny być ograniczone i wykonywane w okresach małego nasilenia erozji (21, 23, 61).

Płodozmiany na zboczach z poprzecznostokowym układem pól powinny być tak dobrane, aby pola z roślinami dobrze chroniącymi glebę sąsiadowały z polami słabiej chronionymi przez szatę roślinną.

Płodozmiany powinny się szczególnie starannie układać dla zboczy, na których będą one stanowiły zasadniczy lub jedyny zabieg przeciwoerozyjny, zwłaszcza dla zboczy z poprzecznostokową, skośnostokową lub nawet wzdłużstokową uprawą roli. W takich przypadkach wskazane jest ograniczenie zabiegów spulchniających glebę i skracanie okresów pozostawienia roli bez okrywy roślinnej, zwłaszcza w okresach krytycznych, podczas których występuje duże zagrożenie erozyjne.

Uprawy polowe w obniżeniach terenu, którymi okresowo przepływa większa ilość wód powierzchniowych (dolinki śródpolne i różnego rodzaju obniżenia) powinny być raczej ograniczone na korzyść użytków zielonych.

Rozmieszczenie użytków. Dla terenów wyżyn południowo-wschodnich nie ma dotychczas ustalonej granicy rolno-leśnej i struktury użytków, uwzględniających ochronę gleb przed erozją. Jest to obszar intensywnego rolnictwa, który ze względu na dobre gleby został silnie wylesiony. Lasy w niektórych regionach wyżynnych zajmują zaledwie kilka procent ogółu gruntów. Jednak radykalne zwiększenie powierzchni leśnej nie ma tu gospodarczego uzasadnienia. Szerzej natomiast powinno się uwzględnić różnego typu zadrzewienia o charakterze fitomelioracyjnym, przeciwdziałające erozji wodnej i wietrznej. Zadrzewiać należy przede wszystkim zbocza o nachyleniu powyżej 30–35%, bez względu na rodzaj gleb, a także zbocza o mniejszym nachyleniu powyżej 20%, ale silnie wyerodowane, na których regeneracja gleb jest trudna i bardzo powolna oraz wąwozy i tereny bardzo silnie pocięte wąwozami. W terenach wyżynnych szczególną rolę w ochronie gleb przed erozją, a także w intensyfikacji rolnictwa mogą odegrać zadrzewienia sadownicze – zarówno duże sady produkcyjne, jak również małe plantacje drzew i krzewów owocowych oraz krzewów dla celów prywatnych.

Typowanie gruntów pod uprawy polowe powinno uwzględniać nachylenie zboczy, zróżnicowanie mikrorzeźby, rodzaj gleb i stopień ich wyerodowania oraz strukturę agrarną. Grunty orne w gospodarstwach wielkoobszarowych mogą występować na stokach o nachyleniu przeważnie do 20%, a w gospodarstwach indywidualnych na nieco większych spadkach.

Trwałe użytki zielone w terenach wyżynnych również spełniają ważną funkcję przeciwoerozyjną i gospodarczą. Powinny przede wszystkim zajmować doliny rzek a ponadto należy je lokalizować na dnach dolin smużnych, w których koncentrują się okresowo spływy powierzchniowe i ewentualnie na stromych zboczach o nachyleniu do 25%, lecz o glebach średnio związłych i związłych.

Działania ograniczające erozję wietrzną

Ochrona gleb przed erozją wietrzną jest bardziej potrzebna na obszarach nizin środkowej Polski z przewagą gleb piaszczystych i na obszarze wyżyn południowo-wschodniej Polski z dominacją gleb lessowych. Działania jakie należałoby tam podejmować są następujące (25):

Na terenach nizinnych za pierwszoplanowe kierunki zaradcze należy uznać:

- stosowanie zabiegów fitomelioracyjnych, takich jak zalesianie gruntów nisko-produkcyjnych, dodrzewianie krajobrazu rolniczego oraz racjonalne gospodarowanie użytkami zielonymi, zwłaszcza ograniczenie ich likwidacji;
- wprowadzanie poplonów ozimych chroniących glebę podczas wiosennych susz (fot. 4.);
- stosowanie odpowiedniej agrotechniki umożliwiającej poprawę struktury i żyzności gleb;
- wprowadzanie urządzeń melioracyjnych umożliwiających gromadzenie wody (zbiorniki) i nawadnianie;
- zapobieganie nadmiernemu pobieraniu wody przez zakłady przemysłowe, co prowadzi do przesuszania terenów (dotyczy to zwłaszcza powiatów konińskiego i plockiego).



Fot. 4 Pole po prawej z przesuszoną glebą (V i VI klasa) uprawioną po ziębli w porównaniu z polem po lewej obsianym żytem ozimym podczas suszy w kwietniu 2019 roku (fot. R. Wawer)

Na terenach wyżyn lessowych do podstawowych zabiegów przeciwdziałających erozji wietrznej należy:

- dodrzewianie krajobrazu, w tym również zakładanie sadów na zboczach;
- magazynowanie wody w gruncie i w zbiornikach, niedopuszczanie do przesuszania powierzchni gleby oraz do pozostawiania pól okrywy roślinnej na

wierzchowinach i na zboczach dowietrznych, zwłaszcza w okresie zimowym i wiosennym;

- korygowanie przestrzennego układu użytków rolno-leśnych poprzez ich rozmieszczanie w terenie odpowiednio do ich funkcji wiatrochronnych i wodochronnych;
- zapobieganie nadmiernemu wyczerpywaniu wód głębinowych przez przemysł.

Należy podkreślić, że na terenach wyżynnych wszelkie działania zmierzające do ochrony przed erozją wodną przyczyniają się również do zmniejszania erozji wietrznej.

Literatura

1. B a c S.: Przyczynek do badań nad zmianą położenia powierzchni ornych gruntów loesowych. *Rocz. Nauk Rol. i Leś.*, Poznań 1928, **19(3)**: 1-28.
2. B a c S.: Słowo o badaniach nad erozją gleb w Polsce. W: *Procesy erozyjne i problemy ochrony gleb w Polsce*, S. Ziemiński, Z. Mazur, J. Repelewska-Lekalowa (red.). WSR Lublin, PWRiL, 1968, **2**: 20-25.
3. B e n n e t H.H.: *Elements of soil conservation*. Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, Londyn 1955, ss. 256.
4. C z a m a r a W.: Prognoza erozji powierzchniowej w zlewniach zbiorników wodnych zlokalizowanych na przedgórzu sudeckim. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie*, 1992, 271: 79-89.
5. D y l i k o w a A.: *Geografia Polski. Krainy Geograficzne*. Państw. Zakład Wyd. Szkol., 1973, ss. 125.
6. F a t y g a J.: Kształtowanie granic rolno-leśnej i darniowo-polowej w Sudetach w systemie ochrony gleby przed erozją wodną. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, Warszawa, 2002, 487: 67-77.
7. F i g u ł a K.: Wstępna charakterystyka zjawisk erozji na terenie kilku powiatów województwa krakowskiego. *Roczniki Nauk Rolniczych*, Warszawa 1955, **71-F-1**: 111-148.
8. F i g u ł a K.: 1960. Erozja w terenach górskich. *Wiad. Inst. Melior.*, 1960, **1(4)**: 190-197.
9. F i g u ł a K.: Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu. *Wiad. Inst. Melior.*, 1966, **6(3)**: 131-145.
10. F i s c h e r G., van Velthuisen H., Shah M., Nachtergaele F.: *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21 Century*. FAO/IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg 2002, ss. 259.
11. F r o e h l i c h W., S ł u p i k J.: 1980a. Importance of splash in erosion process within a small flysh catchment basin. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, XIV: 77-111.
12. F r o e h l i c h W., S ł u p i k J.: Drogi polne jako źródło dostawy wody i zwietrzliny do koryta cieku. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1980b, **225**: 257-268.
13. F r o e h l i c h W.: Monitoring bed load transport using acoustic and magnetic devices. W: *Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers*, Jim Bogen and Des E. Walling (red.). Technological and Methodological Advances. Proceedings of the Oslo Workshop (19–21 June 2002), IAHS Publication, 2003, **283**: 201-210.
14. G e n t i l e A.R. (red.): Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe – A challenge for the 21st century. EEA, 2000, **32**: 241-255.
15. G e r l a c h T.: Współczesny rozwój stoków w dorzeczu Górnego Grajczarka (Beskid Wysoki – Karpaty Zachodnie). *Prace Geograficzne*, 1966, **52**: 1-52.
16. J ó z e f a c i u k A., J ó z e f a c i u k C.: Próba oceny zagrożenia gruntów w Polsce erozją wietrzną. *Pamiętnik Puławski*, 1979, **71**: 12-21.

17. Józefaciuk C., Józefaciuk A., Barbaś S., Budzyńska K.: Metoda opracowania mapy potencjalnej erozji wodnej gleb w Polsce. *Roczniki Gleboznawcze*, 1985, **XXXVI(1)**: 177-183.
18. Józefaciuk C., Józefaciuk A.: Struktura zagrożenia erozją wodną fizjograficznych krain Polski. *Pamiętnik Puławski*, 1992a, suplement do zeszytu **101**: 23-50.
19. Józefaciuk C., Józefaciuk A.: Gęstość sieci wąwozowej w fizjograficznych krainach Polski. *Pamiętnik Puławski*, 1992b, suplement do zeszytu **101**: 51-66.
20. Józefaciuk A., Józefaciuk C.: *Agrotechnika przeciwoerozyjna*. Bibl. Monit. Srod., Warszawa 1998a, ss. 89.
21. Józefaciuk A., Józefaciuk C.: *Erozja i melioracje przeciwoerozyjne. Terminologia*. BN-88/9100-07. Znowelizowana jako Pr PN-R-04152, 1998b.
22. Józefaciuk C., Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: *Przeciwoerozyjne zagospodarowanie zlewni wyżynnej potoku Grodarz z uwzględnieniem ograniczania powodzi*. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG Puławy 2002, **4**: 1-65.
23. Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: *erozja gleb w Polsce – skutki środowiskowe i gospodarcze, działania zaradcze*. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB, 2014, **44**: 1-264.
24. Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: *Rozwój, skutki i występowanie erozji wąwozowej w polsce oraz metody zagospodarowania wąwozów*. Monografie i Rozprawy Naukowe IUNG-PIB, 2016, **48**: 1-374.
25. Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: *Erozja wietrzna w Polsce*. Monografie i Rozprawy Naukowe IUNG-PIB, 2018, **57**: 1-224.
26. Kondracki J.: *Geografia Polski. Mezoregiony fizyczno-geograficzne*. PWN, Warszawa 1994, ss. 339.
27. Koreleski K., Żurek E.: *Analiza potrzeb w zakresie przeciwoerozyjnego zabezpieczenia gruntów w Polsce*. *Roczniki AR w Poznaniu CCXCIV, Melioracje i Inżynieria Środowiska*, 1997, t. 19, **1**: 177-184.
28. Kosturkiewicz A., Szafranski C., Fiedler M.: *Agromelioracje jako czynnik ograniczający erozję wodną gleb terenów bogato rzeźbionych*. *Roczniki AR w Poznaniu CCLXVI, Melioracje i Inżynieria Środowiska*, 1994, **14**: 281-293.
29. Maruszczak H.: *Warunki geologiczno-geomorfologiczne rozwoju erozji gleb w południowej części województwa lubelskiego*. *Wiad. Inst. Melior.*, 1963, **4**: 19-44.
30. Maruszczak H.: *Erozja wąwozowa we wschodniej części pasa wyżyn południowopolskich*. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1973, **151**: 15-30.
31. Niewiadomski W.: *Badania nad erozją gleb północy Polski (okres 1950–1967)*. PWRiL, Warszawa 1968, **2**: 29-49.
32. Nowocień E.: *Dynamika rozwoju wąwozów drogowych na obszarach lessowych*. *Pamiętnik Puławski*, Puławy 1996a, **107**: 101-111.
33. Nowocień E.: *Umacnianie rowów i ścieków dróg rolniczych w terenach lessowych zagrożonych erozją*. *IUNG Puławy*, 1996b, **K(11/1)**: 313-319.
34. Nowocień E.: *Badania nad planowaniem i projektowaniem wybranych elementów dróg rolniczych na wyżynnych obszarach chronionego krajobrazu*. *Pamiętnik Puławski*, 1999a, **119**: 93-100.
35. Nowocień E.: *Podstawy geometrycznego projektowania wybranych elementów dróg rolniczych na obszarach wyżynnych*. *Zeszyty Naukowe AR Kraków*, 1999b, **68**: 325-333.
36. Nowocień E.: *Wstępne wyniki badań nad technologią utwardzania dróg rolniczych w terenach erodowanych na przykładzie gminy Wąwolnica*. *Pamiętnik Puławski*, 1999c, **119**: 83-93.
37. Nowocień E.: *Technologia utwardzania dróg rolniczych w terenach lessowych*. *Wytyczne*. Wyd. IUNG. 1999d, ss. 22.
38. Nowocień E.: *Wybrane zagadnienia erozji gleb w Polsce*. *Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy*, 2002, **10**: 9-38.
39. Ostromecki J.: *Erozja gleb jako zagadnienie melioracyjne*. *Gospodarka wodna*, 1947, **4 i 5**: 1-20.

40. Prochal P.: Badania nad erozją gleb w terenach górskich. PWRiL, Warszawa 1968, ss. 50-90.
41. Prochal P. (red.): Podstawy melioracji rolnych, PWRiL, Warszawa 1987, t. 2, s. 264-342.
42. Rajda W., Ostrowski K., Kowalik T., Marzec J.: Erozja chemiczna w mikrozewniach rolniczych na terenie podgórskim. Roczniki AR w Poznaniu CCLXVI, Melioracje i Inżynieria Środowiska, 1994, **14**: 139-152.
43. Reniger A.: Próba oceny nasilenia i zasięgów potencjalnej erozji gleb w Polsce. Rocz. Nauk. Rol., 1950a, **54**: 1-59.
44. Reniger A.: Zalesienia i zadrzewienia śródpolne jako czynnik ochrony gleb Polski przed erozją. Rocz. Nauk Rol., 1950b, **54(1)**: 1-54.
45. Sasik J., Szewrański S., Żmuda R.: Rola zbiornika małej retencji wodnej w kształtowaniu denudacji odpływowej i chemizmu odpływu. Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis 217, Agricultura, Szczecin 2001, **87**: 209-212.
46. Stasiak R., Szafranski C.: Zmiany w pokrywie glebowej erodowanych terenów Pojezierza Gnieźnieńskiego. Acta Agrophysica, Lublin 2005, **5(2)**: 447-454.
47. Starkel L.: Studia nad typologią i oceną środowiska geograficznego Karpat i Kotliny Sandomierskiej. Prace Geograficzne, 1978, ss. 35.
48. Starkel L.: Erozja gleb a gospodarka wodna w Karpatach. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 1980, **235**: 103-118.
49. Szewrański S., Sasik J., Wawer R., Żmuda R.: Propozycje rolnośrodowiskowego zagospodarowania przestrzennego zlewni w aspekcie ochrony gruntów rolnych przed erozją wodną. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 2008a, **2(40)**: 34-42.
50. Szewrański S., Szabla K., Wawer R., Żmuda R.: Ocena przedsięwzięć rolnośrodowiskowych w aspekcie ochrony gleb przed erozją wodną. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 2008, **526**: 235-242.
51. Szpikowski J.: Wzajemne relacje rozbryzgu i splukiwania jako przejaw zmienności erozji wodnej gleb na stokach o zróżnicowanym użytkowaniu rolniczym (Zlewnia Chwalimskiego Potoku, Górna Parsęta). Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis, Agricultura, 2001, **87**: 221-226.
52. Wawer R.: Zastosowanie cyfrowego modelowania obszaru zlewni Grodarza dla celów zagospodarowania przeciwoerozyjnego. Rozprawa doktorska. IUNG, 2003, ss. 91.
53. Wawer R., Nowocień E.: Application of Sinmap terrain stability model in Grodarz stream watershed. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Environmental Development Series. 2003, t. 6, **1**: 33-42.
54. Wawer R.: Cyfrowy model zlewni jako podstawa do planowania melioracji przeciwoerozyjnych w zlewniach rolniczych. Acta Agrophysica 115, Lublin 2005, **5(1)**: 201-209.
55. Wawer R., Nowocień E., Budzyńska K., Podolski B.: Cyfrowa mapa podatności gleb użytków rolnych na erozję wodną powierzchniową. Skala referencyjna 1:500000. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CCCLXXV, Rolnictwo, 2006, **65**: 223-227.
56. Wawer R., Nowocień E.: Mapa erozji wodnej aktualnej w oparciu o CORINE Land Cover 2000. Pamiętnik Puławski, 2006, **142**: 537-546.
57. Wawer R., Nowocień E., Podolski B., Szewrański S., Żmuda R.: Analiza sieci dróg rolniczych pod kątem ochrony przed erozją wodną powierzchniową. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 2008, **526**: 257-264.
58. Wawer R., Nowocień E., Podolski B., Kozyra J., Pudełko R.: Protective role of grassland against soil water erosion caused by extreme rainfall events as compared to black follow Journal of Food Agriculture and Environment, 2013, Vol. 11, **1**: 1069-1071.
59. Wawer R., Podolski B., Nowocień E.: Analiza zmian użytkowania w zlewni potoku Grodarz w kontekście zagrożenia erozją wodną powierzchniową z wykorzystaniem systemów GIS i teledetekcji. Pamiętnik Puławski, 2004, **137**: 163-175.

60. Zachar D.: Soil erosion. Developments in soil science 10, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, Oxford, New York, 1982, ss. 450.
61. Ziemiński S.: Ochrona gleb przed erozją. PWRiL, Warszawa 1978, ss. 250.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. inż. Rafał Wawer; prof. IUNG-PIB; dr Eugeniusz Nowocień
Zakład Gleboznawstwa Eroзии i Ochrony Gruntów
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
ul. Czarzoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 4786 773; 771
e-mail: Rafał.Wawer@iung.pulawy.pl;
Eugeniusz.Nowocien@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Rafał Wawer	0000-0001-9266-9577
Eugeniusz Nowocień	0000-0002-2673-0023

Rafał Wawer

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

ROLNICTWO 4.0 – PRECYZYJNE NAWADNIANIE*

Słowa kluczowe: celnictwo cyfrowe, rolnictwo precyzyjne, przemysł 4.0

Rolnictwo precyzyjne i inteligentne

Rolnictwo precyzyjne to dopasowanie terminów i dawek wysiewu nawozów, aplikacji środków ochrony roślin oraz wody do pola na podstawie map i pomiarów. Powstało w latach 70. Typowym jego elementem jest wykorzystywanie mapy zasobności gleby w NPK i dopasowanie do niej dawek nawozów (13, 24).

Pojęcie **rolnictwa inteligentnego** (Smart Farming), używane zamiennie z **Rolnictwem 4.0**, obejmuje oprócz elementów rolnictwa precyzyjnego również automatyzację procesów w gospodarstwie, w szczególności wprowadzenie autonomicznych systemów monitoringu i sterowania, dających rolnikowi możliwość obsługiwanie procesów w gospodarstwie z poziomu swojego smartfonu lub komputera (rys. 1) (8, 10, 11, 19, 23, 24, 27).

Wśród wielu systemów kompleksowego zarządzania gospodarstwem oferowanych (17) na rynku światowym raport Garner Insights (24) wskazał 8 liderów rynkowych: Agrivi (obecne również w Polsce), Granular, Trimble, FarmERP, FarmLogs, AgWold, AgriWebb oraz Conservis. Produkty te posiadają przeważnie szerokie spektrum modułów, poczynając od inwentarza maszyn, środków produkcji, pól, zwierząt itd., poprzez dane dotyczące produktywności pól wraz z monitoringiem stanu upraw prowadzonym satelitarnie bądź z użyciem czujników zamontowanych na maszynach rolniczych (np. czujniki EC, czujniki NDVI), po systemy księgowe i funkcje pomocne w raportowaniu. Systemy kompleksowe umożliwiają również automatyzację

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

niektórych operacji w gospodarstwie, np. nawadniania i fertygacji, jak również stanowią podstawę systemową dla rozwiązań autonomicznych, w tym robotów, które wykorzystują dane z sensorów (np. rys. 2) i mapy terenu. Nie ma jednak jeszcze na rynku światowym systemów oferujących kompleksowo wszystkie elementy Smart Farming, tj. monitoring, wspieranie decyzji i wykonanie działania całościowo dla danego profilu gospodarstwa (24).



Rys. 1. Rolnictwo inteligentne oparte na technologii Internetu Rzeczy (IoT).

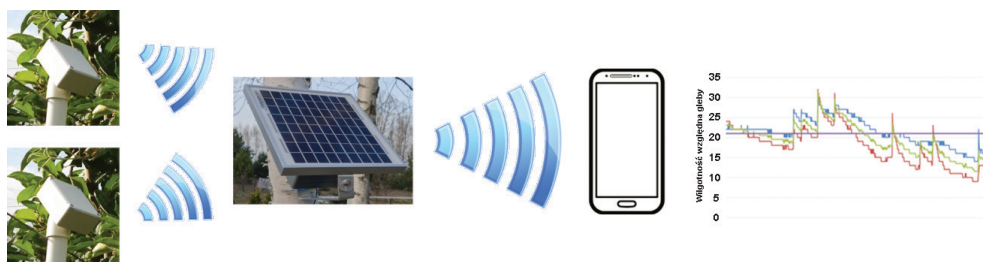
„Cyfrowe technologie mogą wspierać rolników w produkcji więcej za pomocą mniej i znaleźć zrównoważone rozwiązania dla wyzwań dnia dzisiejszego i jutra”

Źródło: EIP-AGRI, 2019 (8)

Oprócz rozwiązań kompleksowych systemów zarządzania gospodarstwem istnieje niezliczona liczba rozwiązań specjalistycznych oferujących realizowanie elementów Smart Farming, np. doradztwo nawodnieniowe (Aquastatus – Polska; rys. 3, SIDSS – Hiszpania, FIGARO – Włochy i Izrael), narzędzia teledetekcyjne (16) do strefowania pól pod rolnictwo precyzyjne (AgroAPI – UK, SQAPP – Holandia) po aplikacje związane z zarządzaniem flotą maszyn i optymalizacją zużycia nawozów, pestycydów i paliwa. Ważną częścią oferty rynkowej są nieautonomiczne selektywne siewniki nasion i aplikatory nawozów (np. wysiewacze polskie Unia MXL premium).



Rys. 2. Czujnik wilgotności gleby zintegrowany ze stacją meteorologiczną eAgronom
(fot. R. Wawer)



Rys. 3. Przykład polskiego systemu wspierania decyzji dla nawodnień rolniczych Aquastatus opartego na bezprzewodowej sieci czujników wilgotności gleby i apce Android

Źródło: opracowanie własne

Istotną częścią rynku są także drony (rys. 4). Dokonał się duży postęp w technologii sterowania i napędów, co obniżyło zarówno koszty, jak i próg know-how wykorzystania ich w praktyce. Malejące ceny rozwiązań multispektralnych (np. Parrot Sequoia – Francja) przyczyniły się do znacznego wzrostu tego segmentu rynku w latach 2015 i 2016 (24). Postęp w dziedzinie sensorów hiperspektralnych może jeszcze bardziej upowszechnić zastosowanie tych platform w rolnictwie oraz szerokie wykorzystanie dronów jako elementów zwiadowczych platform autonomicznych robotów obsługujących funkcje rozpoznania lokalizacji wymagających interwencji w obrębie pól gospodarstwa.



Rys. 4. Dron z kamerą multispektralną

Źródło: EIP-AGRI

Dynamika inwestycji w rolnictwie wskazuje na gwałtowny wzrost zainteresowania inwestorów tym sektorem na przełomie lat 2013 i 2014, z załamaniem szybkiego trendu wzrostowego 2 lata później wynikającym szczególnie z nasycenia rynku rozwiązaniami UAV oferowanymi na różnych poziomach cenowych. Pomimo spadku wielkość inwestycji typu venture capital w roku 2016 wyniosła 3,2 miliarda \$, tj. ponad 3 razy więcej niż w roku 2013 (24).

Na rynku istnieje mnogość aplikacji cyfrowych dla rolników. Niestety wiele z nich, budowana przez informatyków bez konsultacji ze specjalistami od agronomii, nie nadaje się do praktycznego wykorzystania. Wielu rolników testowało różne apki pisane pod systemy iOS i Android, nabierając przekonania o bezużyteczności nowych technologii, co pokutuje w obiegowej opinii, że apki są tylko zabawkami. Rolnictwo to jedno z najbardziej ryzykownych działów gospodarki, więc rolnicy z natury rzeczy podchodzą z dużą nieufnością do niesprawdzonych nowinek technicznych. Jest to jedna z podstawowych barier zidentyfikowana przez EIP-AGRI (7, 8), potwierdzona w raporcie Wawra (24). Niestety w ogólnodostępnym dla rolników obiegu informacji brakuje poradników związanych z technologiami cyfrowymi.

Wyzwania związane ze zmianami demograficznymi i klimatycznymi stawiają rolnika przed koniecznością inwestycji w nowe technologie, optymalizujące zużycie wody, nawozów, paliw i pracy ludzkiej oraz ułatwiające sprzedaż, zamawianie i świadczenie usług, współpracę czy wreszcie marketing własnych produktów. Ze względu na duże potencjalne straty spowodowane błędami w nowoczesnych narzędziach informatycznych lub nieumiejętnym ich zastosowaniem, należy jak najszybciej podnieść poziom wiedzy

rolników w zakresie korzyści i wad różnych rozwiązań, jak i zadbać o rzetelny opis i certyfikację nowych produktów. Obecnie rolnik styka się najczęściej tylko z informacją handlową, która z zasady nie zawiera granic stosowalności urządzeń, ale też ukrywa szczegóły techniczne rozwiązań, np. metodę pomiaru wilgotności gleby.

Szacuje się, że ok. 70% gospodarstw w USA korzysta z technologii cyfrowych w zarządzaniu gospodarstwem, podczas gdy w UE to zaledwie ok. 20%. Z raportu Wawra (24) wynika, że należy się spodziewać szybkiego rozwoju produktów rolnictwa inteligentnego polskich producentów. Trendy te potwierdza raport Kordowskiej i in. z 2023 (13). Aby te produkty znalazły rynek zbytu, należy przygotować ów rynek i świadomego użytkownika na nadchodzące innowacje Smart Farming, aby umiał on dokonać świadomego wyboru i zwiększył dzięki temu konkurencyjność swojego gospodarstwa.

Ponadto w świetle strategii Komisji Europejskiej opublikowanych 20 maja 2020 r. – strategii Farm to Fork (F2F) i strategii bioróżnorodności, narzędzia Smart Farming będą kluczowe w zapewnieniu odpowiedniego raportowania i przepływu informacji wzdłuż łańcucha dostaw produktów żywnościowych od pola do widelca.

Najchętniej obecnie kupowanym w Polsce rozwiązaniem Smart Farming są rozwiązania do nawigacji i sterowania via GPS (13, 24). Rosnącą popularnością cieszą się rozsiewacze, opryskiwacze i siewniki z funkcją różnicowania dawki, dając oszczędności środków produkcji od 5 do 15%. Mapowanie plonu jest używane dość często, dzięki wbudowanym w nowe maszyny układom, jednak funkcje oceny jakości plonu nie są już tak powszechnie używane, a wykorzystanie tych danych w zarządzaniu gospodarstwem jest dalekie od możliwości i potrzeb. Usługi oceny zasobności gleb i mapowania ich zmienności są oferowane na polskim rynku od co najmniej 15 lat, przy czym nowe technologie nie przyjmują się w firmach zbyt szybko. Kilka firm oferuje pomiary konduktometryczne oraz mapy gleb i upraw pozyskane z teledetekcji. Niestety najmniejsze gospodarstwa rzadko prowadzą monitoring jakości gleb i planowaną gospodarkę środkami produkcji. Tylko największe gospodarstwa mogą sobie pozwolić na zakup i używanie nowoczesnych urządzeń aplikujących zmienne dawki czy sterowane przez nawigację satelitarną. Rolnictwo precyzyjne jest nauczane na uniwersytetach przyrodniczych oraz od niedawna w szkołach średnich o profilu rolniczym.

Powstaje coraz więcej rozwiązań roboczych i robotycznych (roboty współpracujące z człowiekiem), przeważnie w stadium prototypu. Nieliczne rozwiązania seryjne trafiły już na rynek polski. W IUNG-PIB drugi sezon jest używany robot uprawowy operujący automatycznie na zadanych mapach z dopasowaną do gatunku gleby normą wysiewu (rys. 5).



Rys. 5. Robot rolniczy używany do siewu w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym IUNG-PIB „Kępa” w Puławach (fot. R. Wawer)

Rolnictwo inteligentne w gospodarce wodnej

Czujniki i powiązane z nimi systemy wspierania decyzji mają wielorakie zastosowanie w optymalizacji zużycia wody w rolnictwie i ochrony jej jakości. Niektóre narzędzia do nawodnień polskiej produkcji są już dostępne (Aquastatus, Agreus), a niektóre wejdą na rynek w tym roku (SensorAI). Ponadto opracowywane są narzędzia do automatycznej regulacji sieci melioracyjnych, automatycznego sterowania zastawkami stawów i zbiorników wraz z monitoringiem ilości i jakości wody.

Należy zwrócić uwagę, że narzędzia, które podają informacje wyłącznie o wilgotności gleby są nieprzydatne w praktyce, ponieważ każdy gatunek gleby ma inną charakterystykę pojemności wodnej, np. 12% dla piasków słabo gliniastych oznacza optymalne wysycenie wodą, a ta sama wartość dla glin oznaczałaby trwałe wędnięcie roślin.

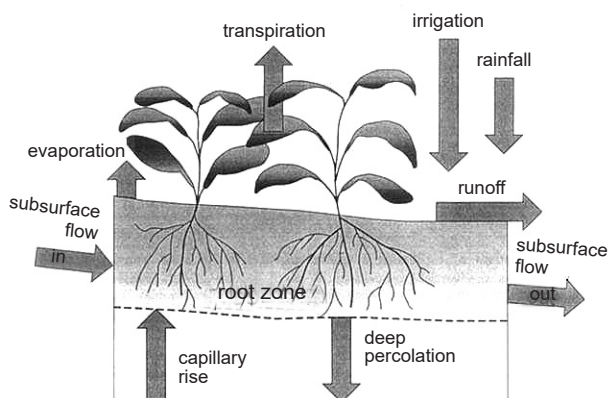
Obecnie w IUNG-PIB prowadzony jest Living Lab (żywe laboratorium) ukierunkowane na ocenę praktyk poprawiających wykorzystanie wody w rolnictwie – <https://aquadavida.mendixcloud.com>.

Nawadnianie precyzyjne z wykorzystaniem technologii Rolnictwa 4.0

Woda jest kluczowym zasobem, bez którego nie mogą funkcjonować żadne organizmy żywe na Ziemi. W przypadku królestwa roślin (Regnum Vegetabile) dostępność wody warunkuje wszystkie procesy życiowe i związane z nimi pobieranie składników z gleby, przyrost biomasy, a więc w przypadku roślin uprawnych plon i jego jakość (1, 14, 21). Stres wodny bardzo niekorzystnie wpływa na roślinę; prowadzi do obniżenia jej odporności na patogeny, a w skrajnych przypadkach do zamierania rośliny (4, 5). Zapewnienie uprawie optymalnej wilgotności gleby w trakcie sezonu wegetacyjnego sprowadza się do dwóch podstawowych decyzji: kiedy i ile nawadniać?

Najczęściej stosowaną metodą określania potrzeb nawodnień stosowaną przez rolników pozostaje w praktyce metoda organoleptyczna – polegająca na ludzkich zmysłach. Jest ona oparta na obserwacji stanu uwilgotnienia gleby bądź stanu rośliny (15, 25). Człowiek na podstawie oceny gleby przez dotyk oraz własnego doświadczenia jest w stanie oszacować, kiedy należy nawadniać. Decyzja, ile nawadniać zwykle opiera się na założeniu wysycenia gleby wodą, tj. nawadnianiu do pełnej pojemności wodnej gleby, której osiągnięcie manifestuje się pojawieniem zastoisk wody na powierzchni gleby. Z oczywistych względów metoda organoleptyczna jest dalece niedoskonała. Po pierwsze człowiek decyduje na podstawie własnego doświadczenia, niepopartego jakimkolwiek pomiarem bezwzględny wilgotności w glebie, czyli nigdy naprawdę nie wie, ile jej w glebie jest i jaka jej zawartość jest optymalna dla danej rośliny. Po drugie często po okresie posuszny opady deszczu zwilżają tylko wierzchnią część poziomu orno-próchnicznego, więc ocena uwilgotnienia powierzchni gleby może sugerować dostatek wody, podczas gdy 5 cm poniżej warstwy uwilgotnionej występuje przesuszenie profilu glebowego. Podlewanie uprawy do osiągnięcia nasycenia gleby jest zarówno nieekonomiczne, jak i szkodliwe dla środowiska. Woda z gleby nasyconej (wszystkie kapilary i pory nasycone wodą) odcieknie zwykle w ciągu 1 doby do zawartości wilgoci odpowiadającej połowej pojemności wodnej. Rolnik traci całą tę nadmiarową objętość wody wraz z nawozami łatwo rozpuszczalnymi, jak K i N, które trafiają do wód gruntowych, zanieczyszczając je.

Kolejną metodą stosowaną w ocenie kiedy i ile nawadniać jest obliczanie dziennego parowania, zwanego ewapotranspiracją (25). Metoda ta opiera się na skomplikowanych równaniach biorących pod uwagę z jednej strony gatunek gleby i rośliny (również fazę jej wzrostu), a z drugiej pomiary meteorologiczne. Pozwala ona względnie łatwo oszacować dzienną dawkę strat wody na podstawie szacowanej wysokości parowania, które można uzupełnić przez nawodnienie. Wadą tej metody jest uproszczenie oceny strat wody na odciek w głąb gleby. Wiąże się to z ryzykiem jej przesuszenia. Nigdy też nie wiadomo, w jakim stanie uwilgotnienia jest gleba i czy wilgotność jest optymalna dla danej rośliny.



Rys. 6. Skomplikowany bilans wody w glebie

Źródło: USDA

Ostatnią grupą metod są metody oparte na bezpośrednich pomiarach wilgotności gleby w strefie korzeniowej roślin (15, 22, 25). Pomiar pozwala ocenić w sposób jednoznaczny bieżącą wilgotność gleby, a zarazem deficyt wody w glebie. Umożliwia też utrzymywanie wilgotności ściśle w zakresie optymalnym dla danego gatunku i odmiany rośliny uprawnej. Pozwala również automatyzować nawadnianie na zadaną wilgotność docelową, przy czym dawkę można łatwo i precyzyjnie wyliczyć lub nastawić system na wyłączenie, gdy wilgotność gleby osiągnie zadaną wartość. W nowoczesnych systemach wspomagania nawodnień czujniki są instalowane na stałe w systemie korzeniowym i pomiar robiony jest w odstępach godzinowych, a wartości odczytuje się poprzez smartfony, które od razu przeliczają wilgotność na optymalną dawkę dla danego pola.

Do niedawna potrzeby nawodnień szacowano na podstawie obliczeń parowania z terenu i transpiracji roślin (ewapotranspiracja), jako części Klimatycznego Bilansu Wodnego liczonego jako różnicę między skumulowanym opadem a skumulowaną ewapotranspiracją w danym momencie czasu. Metoda ta została zaimplementowana w modelu FAO56. Niedostatki tej metody polegają na niedoskonałym odwzorowaniu strat wody przez perkolację w głąb profilu i nieuwzględnienie podpowierzchniowego spływu lateralnego (4, 5).

Obecnie dzięki postępowi w miniaturyzacji i elektronice, możliwe są precyzyjne pomiary rzeczywistego stresu wodnego roślin w danej glebie i dopasowanie optymalnej dawki nawodnieniowej dla danego gatunku rośliny i gleby.

Optymalizacja zużycia wody w nawodnieniach na podstawie pomiaru bezpośredniego. System ENORASIS

W latach 2012–2014 zespół naukowców z IUNG-PIB i uniwersytetów europejskich wraz z firmami informatycznymi opracowywał innowacyjny system wspierania

decyzji dla nawodnień rolniczych ENORASIS oparty na najnowszych osiągnięciach technologicznych. Prace finansowała Komisja Europejska w ramach 7 Programu Ramowego i jego transzy finansowej Ekoinnowacja.

Na podstawie wywiadów z rolnikami, doradcami rolniczymi i przedstawicielami instytucji zarządzających wodą w różnych krajach Europy opracowano kryteria, jakie powinien spełniać docelowy system oraz określono sposoby prezentacji wyników użytkownikowi końcowemu (22).

Opracowany w następnych latach system posiadał 3 interfejsy użytkownika: GIS dla doradców rolniczych oraz dla rolników: stronę www i aplikację na smartfona pod systemem Android. System zapewniał wgląd w ustawienia stref nawodnieniowych, prognozę pogody oraz bieżącą i historyczną wilgotność gleby wraz z planem nawodnieniowym na najbliższe 3 dni, który uwzględniał prognozę pogody, w szczególności prawdopodobieństwo wystąpienia opadu.

Tworzony system informatyczny (22) określał potrzeby nawodnienia upraw na podstawie modeli matematycznych z wykorzystaniem bieżących warunków meteorologicznych, zdjęć satelitarnych, prognozy pogody na kolejne dni, a przede wszystkim pomiarów wilgotności gleby pod uprawą. Informacja o terminie i dawce wody potrzebnej do nawodnienia była przesyłana do rolnika przez sieć telefonii komórkowej za pomocą krótkiej wiadomości tekstowej (SMS). Jest ona również dostępna po zalogowaniu się na stronach systemu ENORASIS w Internecie oraz w aplikacji na telefony komórkowe.

Nowością systemu było wykorzystywanie bezprzewodowych sieci czujników wilgotności gleby, które przez sieć telefonii komórkowej przesyłają wyniki pomiarów wilgotności gleby bezpośrednio do platformy ENORASIS. O tym kiedy i ile nawadniać może decydować rolnik, jednak system daje również możliwość sterowania automatycznego z wykorzystaniem elektrozaworów współpracujących z siecią czujników wilgotności gleby.

System został przetestowany na 5 obiektach pilotażowych w Polsce (2), Serbii, Turcji i na Cyprze (tab. 1).

Tabela 1

Lokalizacja i główne charakterystyki wdrożeń pilotażowych systemu ENORASIS

Wyszczególnienie	Pilotaż 1		Pilotaż 2	Pilotaż 3		Pilotaż 4		Pilotaż 5
Kraj	Polska		Polska	Serbia		Turcja		Cypr
Roślina doświadczalna	ziemniak	kukurydza	malina	jabłoń (Breaburn)	czereśnia (Burlat)	kukurydza	bawełna	grejfrut
Typ wdrożenia	doświadczenie poletkowe		pole produkcyjne	pole produkcyjne		doświadczenie poletkowe		pole produkcyjne

Testowe obiekty pilotażowe wyposażono w bezprzewodową sieć czujników wilgotności gleby, automatyczną stację meteorologiczną oraz serwis numerycznych prognoz pogody przygotowywanych dla tych lokalizacji (rys. 7 i 8).



Rys. 7. Czujniki bezprzewodowe ENORASIS na polu ziemniaka (fot. R. Wawer)



Rys. 8. Czujniki zainstalowane na stałe w strefie korzeniowej ziemniaka (fot. R. Wawer)

Kontrola systemu nawadniania w obiektach pilotażowych była możliwa przez aplikację ENORASIS działającą w przeglądarce internetowej oraz aplikację mobilną na telefony z systemem Android (rys. 11). Sterowanie zaworami również odbywało się przez aplikację Android (rys. 9).

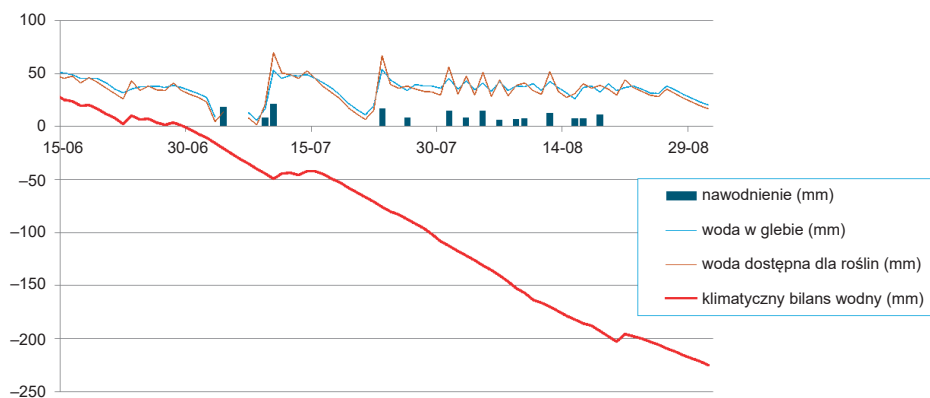


Rys. 9. Widok strony ENORASIS z dawką nawodnieniową, prognozą meteo i historią pomiarów dla każdego pola w gospodarstwie (fot. R. Wawer)

W pierwszym roku prowadzono dwa poziomy nawodnień: brak nawodnienia i nawadnianie optymalizowane przez ENORASIS. W Grabowie w 2013 r. nawadnianie według systemu ENORASIS doprowadziło do wzrostu plonów kukurydzy o 61%, a ziemniaka o 110% w porównaniu z obiektem bez nawadniania (rys. 12). Wyniki doświadczenia polowego w Grabowie wskazują również, że zastosowanie nawodnienia wpłynęło na poprawę jakości plonów badanych roślin. Zwiększył się udział suchej masy w kolbach kukurydzy oraz wzrosła masa tysiąca ziaren. W przypadku ziemniaka zmniejszyło się porażenie przez choroby (rys. 13) oraz znacznie wzrósł udział plonu przeznaczonego na konsumpcję (rys. 14). Obniżono przy tym koszty eksploatacyjne systemu nawodnieniowego i zużycie wody (rys. 15). Nawadnianie pozwoliło w konsekwencji na znaczne zwiększenie opłacalności uprawy badanych roślin (rys. 16).

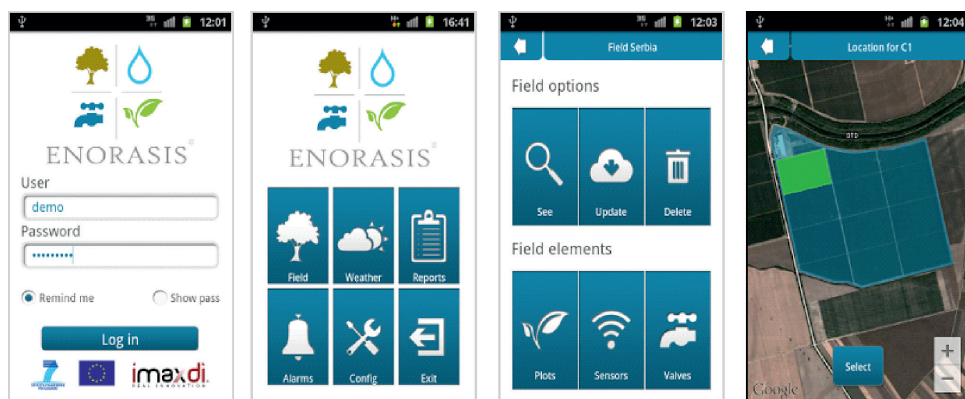
Jak widać na rysunku 10, w roku 2013 już od połowy lipca wystąpił znaczny deficyt opadu w stosunku do intensywności parowania. Niedobory wody były na bieżąco uzupełniane na podstawie odczytów z czujników wilgotności gleby. Dobór dawki oparto na zaawansowanych modelach matematycznych uwzględniających optymalne dla danej rośliny uwilgotnienie gleby, jak i parametry gleby.

W roku 2014 wprowadzono 3 poziomy nawodnień – bez nawodnienia (najczęstsza w Polsce praktyka dla ziemniaka i kukurydzy), podlewanie na parowanie maksymalne (standard stosowany w istniejących systemach wspierania decyzji), podlewanie optymalizowane według wilgotności gleby i preferencji rośliny.

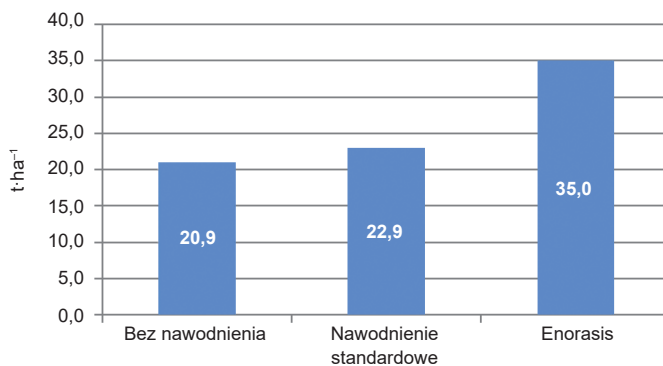


Rys. 10. Wpływ nawodnienia ENORASIS na dostępność wody dla ziemniaka w RZD Grabów w sezonie 2013

Źródło: opracowanie własne

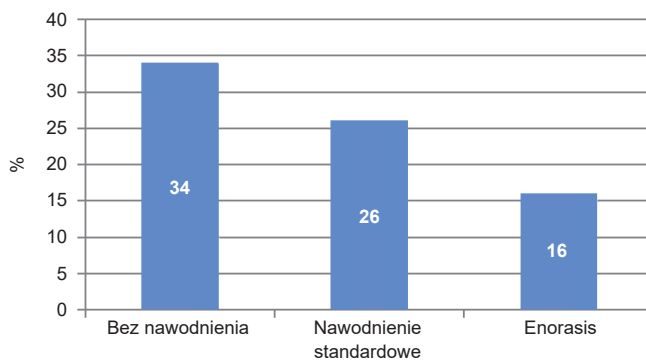


Rys. 11. Widok interfejsu Android systemu ENORASIS (fot. R. Wawer)



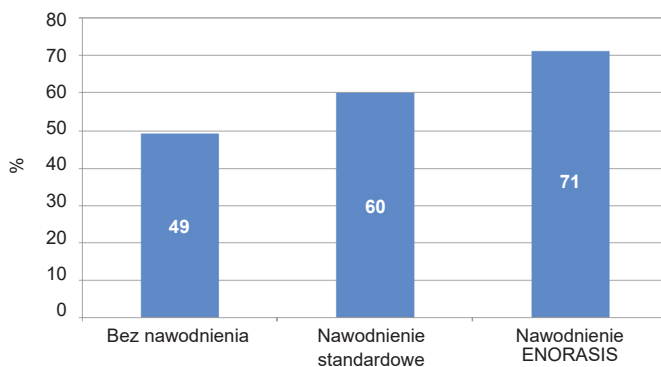
Rys. 12. Plon ziemniaka w roku 2014

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB



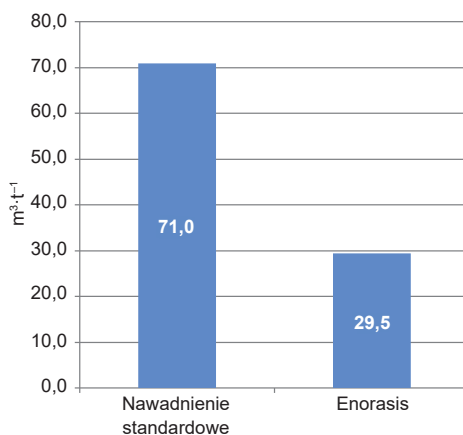
Rys. 13. Udział bulw dotkniętych chorobami w roku 2014

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB



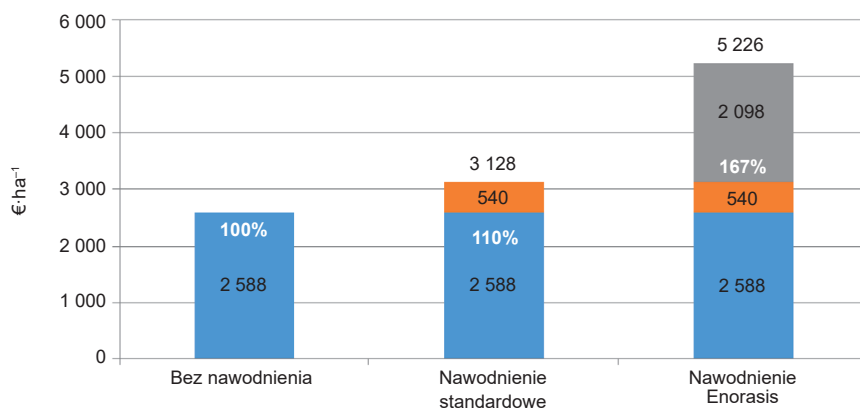
Rys. 14. Udział bulw do bezpośredniej konsumpcji w roku 2014

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB



Rys. 15. Zużycie wody na tonę plonu ziemniaka w roku 2014

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB



Rys. 16. Przychód z plantacji ziemniaka w zależności od systemu nawadniania w roku 2014

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB

System przetestowano również na plantacji maliny wczesnej i maliny jesiennej. Plantacja testowa położona była na płytkich glebach piaszczystych zalegających na zeszczelinowanym marglu. Układ gleby powodował bardzo szybką odciekalność profilu. Według relacji właściciela plantacji i jego pracowników nigdy nie zdarzyło się, by osiągnięto na tej glebie pełne wysycenie wodą – nigdy nie zaobserwowano zastoisk wody na powierzchni gleby.

Po zainstalowaniu czujników wilgotności gleby, określeniu gatunku gleby oraz głębokości strefy korzeniowej malin skonfigurowano system oraz podłączono elektrozawory do źródła wody. Dzięki zastosowaniu bezpośredniego pomiaru wilgotności gleby w strefie korzeniowej maliny, udało się osiągnąć 10-krotne (!) zmniejszenie zużycia wody przy braku wpływu na plon. Według relacji właściciela plantacji owoc miał nieco lepsze parametry jakościowe, a same rośliny były dużo zdrowsze.

Na zakończenie projektu ENORASIS przeprowadzono szereg warsztatów z rolnikami i doradcami rolniczymi. Wyrażali się oni bardzo entuzjastycznie o możliwościach systemu, jak i o dużych oszczędnościach w zużyciu wody, a także podkreślali wyżkę plonów i polepszenie ich jakości. Jednak według opinii większości zainteresowanych cena sieci czujników i zaworów ENORASIS oraz abonamentu prognozy pogody była stanowczo za wysoka.

System Aquastatus

System Aquastatus powstał jako uproszczona, a zatem mniej kosztowna alternatywa dla ENORASIS. System został opracowany przez polską firmę i w całości był produkowany w Polsce. Aquastatus jest przeznaczony do określania optymalnych dawek nawodnienia na podstawie pomiarów wilgotności gleby i wyświetlania zaleceń w aplikacji na smartfon z systemem Android (rys. 17). Aby zejść do ceny końcowej

dostosowanej do możliwości nawet małych gospodarstw rolnych, system ten pomija koszty związane z interfejsem i abonamentami innych usług.

Wilgotność gleby jest mierzona za pomocą czujników zainstalowanych na stałe w strefie korzeniowej roślin (rys. 18). Dane z czujników wysyłane są raz na godzinę do koordynatora pola (centralki) drogą radiową. Rolnik za pomocą swojego telefonu komórkowego odczytuje dane z pola, łącząc się z centralką przez protokół Bluetooth. Aplikacja na telefonie komórkowym pokazuje wilgotność gleby na danym polu oraz dostarcza zalecenia dawek nawodnieniowych (rys. 19).

Zalecana dawka nawodnieniowa jest dopasowana do gleby i rośliny dla zapewnienia optymalnego wzrostu roślin i plonu przy minimalnym zużyciu wody.

Bezprzewodowe czytniki podłączone do 2 czujników
umieszczonych w glebie

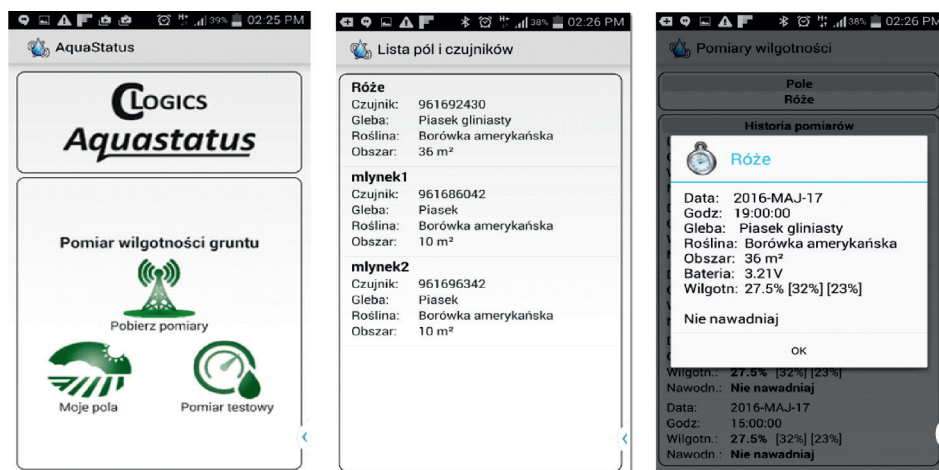


Rys. 17. Schemat systemu Aquastatus

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Zestaw podstawowy Aquastatus na jedną sekcję nawodnieniową (fot. R. Wawer)



Rys. 19. Aplikacja Aquastatus pod Andoridna na przykładowym poletku testowym pod przydomową uprawą róż (fot. R. Wawer)

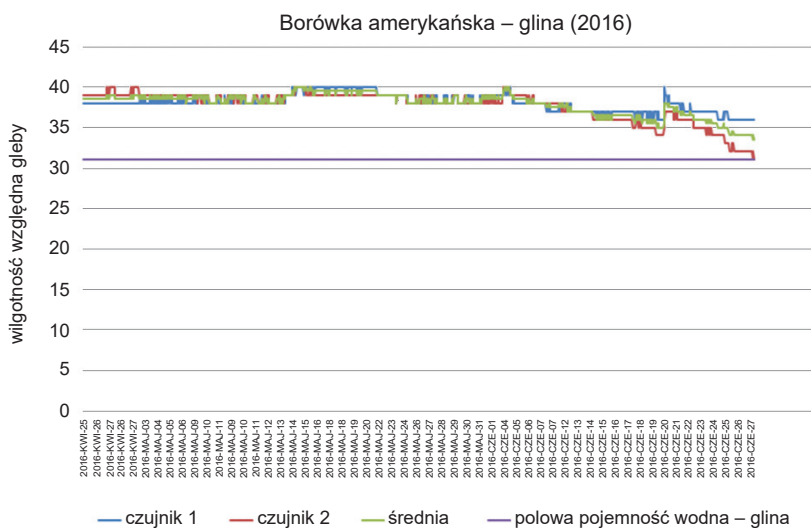
Aquastatus był testowany w latach 2014–2015 na kilku polach testowych i produkcyjnych, m.in.: borówki amerykańskiej (16 ha) (rys. 20), porzeczek czerwonej deserowej (4 ha) (rys. 21), maliny wczesnej (5 ha) i jesiennej (4 ha). Obecnie jest używany w kilku innych plantacjach borówki, maliny i w sadzie jabłoniowym. W roku 2015 plantatorzy doświadczyli niedoborów wody do nawodnień (12). Zastosowanie Aquastatus na plantacjach pozwoliło na zróżnicowanie nawadniania poszczególnych sekcji tak, by nawadniane były tylko sekcje zagrożone przesuszeniem. W przypadku borówki okazało się, że dzięki korzystnemu układowi terenu, jedna z sekcji w ogóle nie musiała być nawadniana (rys. 22), co pozwoliło na oszczędzenie wody na podlewania 2 pozostałych sekcji, w tym jednej bardzo zagrożonej przesuszeniem (rys. 23).



Rys. 20. Widok na sekcje borówki amerykańskiej obsługiwane przez system Aquastatus (fot. R. Wawer)

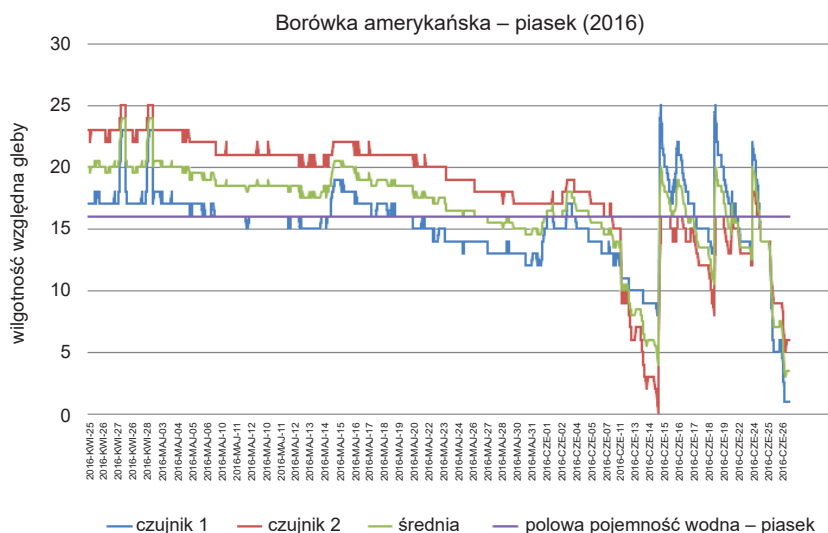


Rys. 21. Aquastatus na plantacji porzeczek deserowej (gleby piaszczyste na marglu) (fot. R. Wawer)



Rys. 22. Monitoring wilgotności na sekcji borówki amerykańskiej niewymagającej nawadniania (glina w podglebiu)

Źródło: wydruk z danych Aquastatus; opracowanie R. Wawer



Rys. 23. Monitoring wilgotności gleby na sekcji borki amerykańskiej wymagającej nawodnienia (piasek w całym profilu; skoki wilgotności odpowiadają nawodnieniu)

Źródło: wydruk z danych Aquastatus; opracowanie R. Wawer

Uwagi końcowe

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się ocieplenie klimatu. Powtarzające się susze są według klimatologów załedwie zapowiedzią katastrofalnych susz, których będziemy doświadczać w niedalekiej już przyszłości (12). Według scenariuszy IPCC (6, 9, 18, 20) częstość występowania katastrofalnych susz 100-letnich na naszym obszarze zwiększy się ponad 10-krotnie, więc możemy się spodziewać ekstremalnie katastrofalnych susz już nie co 100 lat, a co 8–9. Podobnie przewiduje się, że nasilenie tych susz wzrośnie o 25%.

Bez racjonalnego gospodarowania wodą na poziomie gospodarstwa rolnicy nie będą w stanie poradzić sobie z zapewnieniem wody w ciągu całego sezonu wegetacyjnego – o ile scenariusze się potwierdzą. Same oszczędności wody w gospodarstwach indywidualnych mogą okazać się niewystarczające, jeśli jej zabraknie w całej okolicy. Tu należałoby wreszcie ruszyć programy tworzenia małej retencji na obszarach wiejskich i opracować monitoring dostępności wód powierzchniowych i gruntowych dla rolnictwa. Zespół, który pracował nad systemem ENORASIS w IUNG-PIB zgłosił już wnioski projektowe mające na celu opracowanie systemu monitoringu dostępności wody w gminach rolniczych.

Jak wspomniano wyżej, w 2015 r. w 2 monitorowanych gospodarstwach prawie zabrakło wody. W 2016 r. ta sytuacja się powtórzyła. Jeśli po wodę sięgną również sąsiednie gospodarstwa, a może się to okazać nieuniknione, intensywne pobieranie wody z wód gruntowych czy powierzchniowych może spowodować, że nikt

w okolicy nie będzie mógł zapewnić wody dla upraw przez cały sezon. Odnawianie zasobu wód gruntowych trwa długo: miesiące i lata (głębsze poziomy wodonośne, np. te eksploatowane przez wodociągi, mogą się odnawiać przez dziesięciolecia), a wobec braku zbiorników małej retencji i coraz rzadszego występowania śnieżnych zim odnowa zasobów wodnych może trwać jeszcze dłużej.

Aby móc efektywnie zarządzać jakimkolwiek zasobem, jego użytkownik powinien mieć ciągły dostęp do informacji, wielkości i jakości tego zasobu. Według badań Tredera (26) bardzo niewielki odsetek nawadniających rolników stosuje jakiekolwiek systemy wspierania decyzji do określenia terminów i dawek nawadniania. Jeszcze mniej jest rolników monitorujących zużycie i wielkość zasobów dostępnej wody.

Niekontrolowany i de facto ukryty pobór wód w ramach zwykłego korzystania z nich, przewidziany w Prawie wodnym, obejmujący deklaracyjny limit 5 m³ na dobę średniorocznie (w sumie 1825 m³ na rok), może doprowadzić do degradacji zasobów wód gruntowych, jak to się stało w Hiszpanii (2, 3, 28), gdzie połowa zasobów jest zdegradowana według stanu na rok 2006 (!). Strategiczne dokumenty, jak np. Program Przeciwdziałania Niedoborowi Wody (PPNW), kształtują ramy gospodarki wodnej na przyszłe lata na bieżącym rejestrowanym poborze (około dwustu ujęć zarejestrowanych w pozwoleniach wodno-prawnych w skali kraju), nie uwzględniając poboru rzeczywistego. Cała strategii opiera się więc na założeniu minimalnego poboru wód przez rolnictwo, co nie jest zgodne ze stanem faktycznym. Podobnie układanie scenariusza na założeniu, że pobór pozostanie w następnych latach ten sam jest nieracjonalny, ponieważ według szacunków rolnicy najprawdopodobniej będą zmuszeni do wprowadzania nawodnień jako podstawowej praktyki adaptacji do zmieniającego się klimatu (26).

Literatura

1. A l i M.H.: Fundamentals of Irrigation and on-Farm Water Management. Volume 1. Springer, 2010, pp. 560. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-4419-6335-2.pdf>, doi: 10.1007/978-1-4419-6335-2
2. B a k e r S.: Spain's vast network of illegal wells exposed after death of toddler. Deutsche Welle (DW), 2019. <https://www.dw.com/en/spains-vast-network-of-illegal-wells-exposed-after-death-of-toddler/a-47311150>
3. B a r e a L u c h e n a J.: Los pozos ilegales nos roban el agua. Greenpeace, 2018. <https://es.greenpeace.org/es/noticias/los-pozos-ilegales-nos-roban-el-agua/>
4. B u r t o n M.: Irrigation Management: Principles and Practices. Wyd. CPI, 2010, pp. 375.
5. D o n e e n L.D., W e s t c o t D.W., I t a l c o n s u l t S.p.A., Rome (Italy): Irrigation Practice and Water Management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 1, Revision 1, 1984.
6. EEA, 2017: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. EEA report 1/2017, pp. 424. <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>.
7. EIP-AGRI, 2018: Shaping the digital (r)evolution in agriculture. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_brochure_digital_revolution_2018_en_web.pdf.
8. EIP-AGRI, 2019: Seminarium EPI-AGRI – Wielopoziomowe strategie cyfryzacji rolnictwa i obszarów wiejskich. Raport końcowy, ss. 24.

9. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Dahe Q., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (red.): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press, 2012, pp. 582. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf
10. Gelb E., Maru A., Brodgen J., Dodsworth E., Samii R., Pesce V.: Adoption of ICT Enabled Information Systems for Agricultural Development and Rural Viability. The AFITA, IAALD and WCCA Conference in Atsugi Japan, Pre-Conference workshop summary, August 2008, GFAR, pp. 30. http://www.fao.org/docs/eims/upload/258775/workshop_summary_final.pdf
11. Hubbard N., Zarco-Tejada P.J., Loudjani P.: Precision agriculture: an opportunity for EU farmers – potential support with the CAP 2014-2020. In-depth analysis. European Parliament, Directorate-General For Internal Policies, Policy Department B: Structural And Cohesion Policies, Agriculture And Rural Development, PE 529.049, 2014, pp. 57.
12. IUNG-PIB, 2006. Monitoring Suszy, IUNG-PIB: <http://susza.iung.pulawy.pl>
13. Kordowska M., Baranowski M., Pisarek J., Ziemacki Z., Wawer R., Czech T.: ROLNICTWO 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych., Wyd. NCBiR, 2023, pp. 91. ISBN 978-83-967832-1-9
14. Kozyra J., Król-Badziak A., Żyłowski T., Koza P., Pudełko R.: Zmiany klimatu i ich wpływ na gospodarkę wodną i rolnictwo. Konferencja „Adaptacja gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu”, IUNG-PIB, Puławy, 05.03.2020 r. <http://iung.pl/images/pdf/2020/woda/kozyra.pdf>
15. Kozyra J., Wawer R.: Nawadnianie z wykorzystaniem pomiarów wilgotności gleby. Szydłów 26.10.2016.
16. Liaghat S., Balasundram S.K.: A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2010, **5(1)**: 50-55, doi: 10.3844/ajabssp.2010.50.55.
17. Ministerstwo Cyfryzacji, 2019. IoT w polskiej gospodarce. Raport grupy roboczej do spraw Internetu Rzeczy przy Ministerstwie Cyfryzacji, ss. 112.
18. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (red.): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
19. Schrijver R., Poppe K., Dewar D., Kempenaar C., Lokhorst K., Bogaardt M.J., van der Wal T., De Baerdemaker J., Quinn J.: Precision Agriculture and the Future of Farming in Europe. Technical Horizon Scan, European Parliamentary Research Service, PE 581.832, 2016, ss. 274.
20. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (red.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, pp. 1535, IPCC. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf
21. Stuczynski T., Kozyra J., Łopatka A., Siebielec G., Jadczyzyn J., Koza P., Doroszewski A., Wawer R., Nowocień E.: Przyrodnicze uwarunkowania produkcji rolniczej w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, **7**: 77-115.
22. Syropoulou P., Symeonidou M., Tekes S., Wawer R., Kazantzidis A., Crnojevic V., Bruggeman A.: Developing an intelligent ICT system for environmentally optimized irrigation management in agriculture. Journal of Agricultural Informatics, 2017, **8(2)**: 22-32.

-
23. T z o u n i s A., Katsoulas N., Bartzanas T., Kittas C.: Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 2017, **164**: 31-48.
 24. W a w e r R.: Mapa rozwoju rynków i technologii dla obszaru rolnictwa inteligentnego (Smart Farming), Wyd. PARP, 2019, ss. 104.
 25. W a w e r R., Matyka M., Łopatka A., Kozyra J.: Systemy wspomagania decyzji w nawodnieniach upraw rolniczych. W: *Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie*, W. Dembek, J. Kuś, M. Wiatkowski, G. Żurek (red.), Wyd. CDR w Brwinowie, 2016, ss. 165-182. ISBN: 978-83-88082-18-4
 26. T r e d e r W., Szymczak T., Wawer R.: Raport końcowy z pilotażu tworzenia lokalnych partnerstw ds. wody (LPW). Wyd. CDR w Brwinowie, 2021, ss. 260.
 27. W o l f e r t S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.J.: Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 2017, **153**: 69-80; doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
 28. WWF, 2006. Illegal water use in Spain. Causes, effects and solutions, 2006. WWF/Adena, pp. 20.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. inż. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786 773
e-mail: Rafał.Wawer@iung.pulawy.pl;

AUTOR
Rafał Wawer

ORCID
0000-0001-9266-9577

Rafał Wawer, Damian Badora

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

**ROLA ORGANIZACJI LOKALNYCH SAMORZĄDÓW WODNYCH
W ZARZĄDZANIU ZASOBAMI WODNYMI W POLSCE
W KONTEKŚCIE ZMIAN KLIMATU***

Słowa kluczowe: adaptacja do zmiany klimatu, gospodarka wodna, nawadnianie

Wstęp

W ostatnich latach zauważamy postępujące zmiany klimatu w Polsce, które przejawiają się zarówno wzrostem średniej temperatury i zwiększoną zmiennością warunków termicznych, jak i istotnymi modyfikacjami w dystrybucji opadów przez cały rok. Charakterystyczne są zimy ubogie w śnieg, które nie tylko nie przynoszą oczekiwanej regeneracji zasobów wody w glebie, ale również powodują deficyt już na samym początku okresu wegetacyjnego (rys. 1). Wcześniej, po roztopach śniegowych gleba zazwyczaj była nasycana wodą niemal do pełnej pojemności. To co nie mieściło się w glebie, płynęło do rzek, często powodując powódzie roztopowe w różnych regionach kraju. Pozostała ilość wody w glebie stopniowo przesiąkała pod powierzchnią terenu w kierunku rzek i wód gruntowych. Jednak duża część z niej zatrzymywała się na miejscu, stanowiąc zasób dla roślin ozimych i jarych, które rozpoczynały swój cykl wegetacyjny.

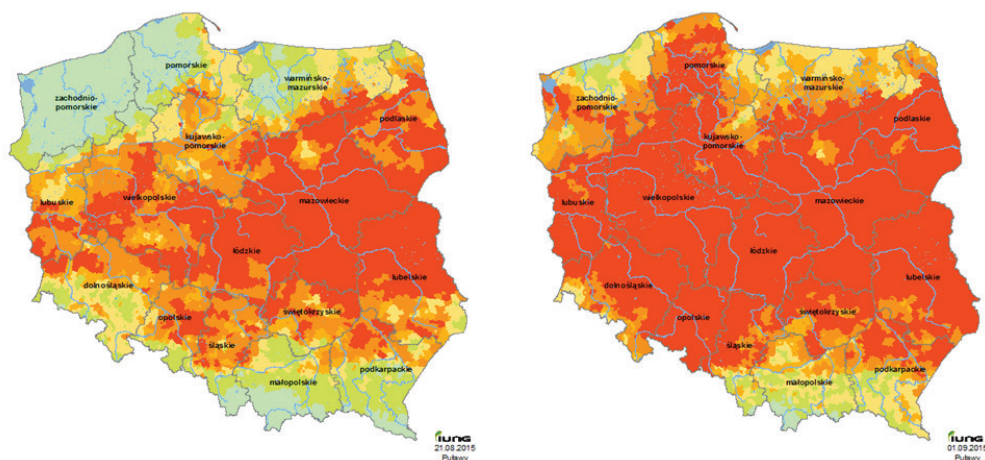
*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.



Rys. 1. Pole uprawiane po ziębli na glebie klas V i VI, wystawione na przesuszenie i erozję wietrzną, kwiecień 2020 r. (fot. R. Wawer)

Częstość występowania susz w okresach krytycznych dla roślin uprawnych znacznie się zwiększyła, miejscami przybierając rozmiary klęski żywiołowej (12, 15).

W latach 2015, 2018, 2023 susze były tak silne, że niekiedy większość obszaru kraju była objęta klęską suszy (rok 2015) (rys. 2) (12).



Rys. 2. Zasięg suszy rolniczej w okresach raportowania 9 i 10 dla ziemiaków w 2015 r.

Źródło: Monitoring Suszy (12)

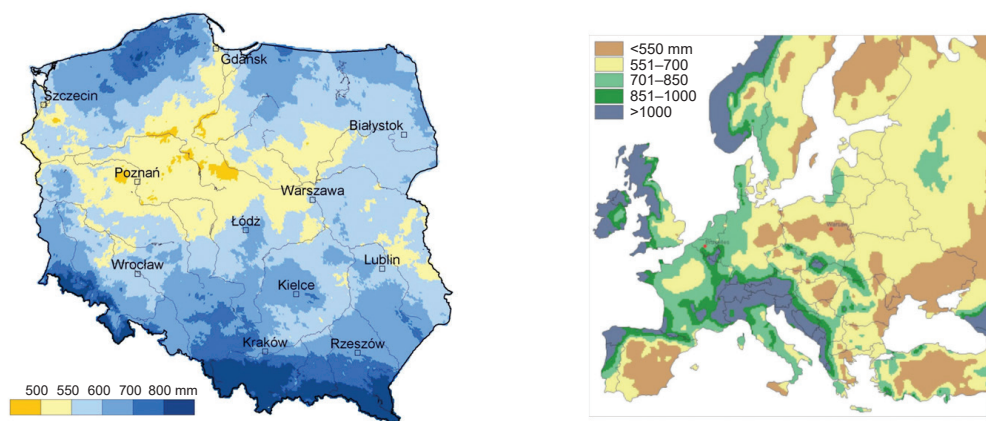
Według prognoz Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC) z roku 2007 (13) częstość susz 100-letnich, a więc występujących w „poprzednim” klimacie raz na 100 lat, miała wzrosnąć do roku 2020 co najmniej 10-krotnie. Z obserwacji corocznych deficytów wody wynika, że prognozy sprawdziły się, jeśli nie w pełnym zakresie, to przynajmniej w zakresie częstości występowania susz na tyle dotkliwych, że w „poprzednim” klimacie przed rokiem 1970 zdarzały się rzeczywiście około raz na 100 lat.

Według scenariuszy klimatycznych opracowanych na lata 2050 i 2100 należy oczekiwać znacznego wzrostu temperatury (14), czego efektem będzie wydłużający się okres wegetacyjny oraz nieznaczny wzrost opadów. Opady będą się koncentrowały w miesiącach zimnych, a w miesiącach ciepłych prognozuje się długie okresy bez deszczu, z rzadkimi opadami nawałnymi. Doprowadzi to do dużych niedoborów wody, które teoretycznie moglibyśmy pokryć, zwiększając retencję wodną w krajobrazie.

Podstawowym wyzwaniem staje się więc zgromadzenie nadmiarów opadów z miesięcy chłodnych i przechowanie ich na posuszne miesiące gorące. Niestety tempo wdrażania programów małej retencji, zainicjowanych w 1995 r., jest tak powolne, że horyzont uzyskania docelowej objętości zbiorników małej i dużej retencji równej 15% odpływu rocznego rzek nie jest osiągalny w perspektywie najbliższych lat. Prognozy przyszłego klimatu stawiają więc pod znakiem zapytania bezpieczeństwo żywnościowe Polski.

Przygotowanie polskiego rolnictwa na nadchodzące zmiany klimatyczne jest zatem pilnie potrzebne i wymaga zaangażowania nie tylko administracji rządowej i samorządowej, ale przede wszystkim samych użytkowników wód, których decyzje bezpośrednio wpływają na ilość i jakość wody na obszarach wiejskich. Ramowa Dyrektywa Wodna UE (2000/60/WE), będąca nadrzędnym instrumentem prawnym obowiązującym wszystkie państwa członkowskie Unii, traktuje wodę jako dziedzictwo, które powinno podlegać ochronie: „Woda nie jest produktem handlowym takim jak każdy inny, ale raczej dziedzictwem, które musi być chronione, bronię i traktowane jako takie”. Wobec przewidywanych susz i braków wody dla rolnictwa, woda powoli zaczyna być postrzegana jako dobro wspólne i to dobro o znaczeniu strategicznym i w tym kontekście jej zasoby rzeczywiście winniśmy traktować jak dziedzictwo, ponieważ od naszych działań w gospodarowaniu wodą będzie zależała jakość życia dzisiejszego i przyszłych pokoleń zamieszkujących polską wieś.

Obszar Polski położony jest w klimacie umiarkowanym, stanowiącym przejście między klimatem kontynentalnym na wschodzie i morskim na zachodzie. Roczna suma opadów jest jedną z najniższych w środkowej i północnej Europie, dorównując miejscami minimom notowanym w Europie Południowej (rys. 3).



Rys. 3. Średnia (z wielolecia) roczna suma opadu dla Polski i Europy

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB, 2015

Generalnie w okresie wegetacyjnym na obszarze Polski występuje ujemny bilans wodny, tj. parowanie przeważa nad opadem atmosferycznym (tab. 1), więc uprawy muszą bazować na zasobach wody zgromadzonych w glebie podczas chłodnego, dżdżystego okresu kilku miesięcy między jesienią a wiosną.

Tabela 1

Średni z wielolecia klimatyczny bilans wodny dla Polski dla okresu kwiecień–wrzesień

Miesiąc	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Suma
Opad	42	58	72	88	76	52	388
Parowanie	69	98	105	118	107	64	562
Bilans	–27	–40	–33	–30	–31	–12	–174

Źródło: Wawer, 2023 (18)

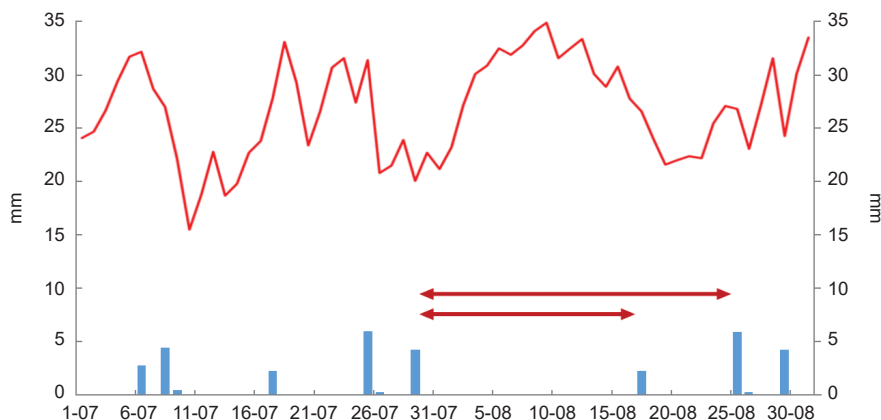
Z naszych obserwacji wynika, że wobec odnotowanych w pierwszej dekadzie XXI w. okresów posusznych w sezonie letnim rolnicy coraz częściej uciekają się do nawadniania upraw. Na obszarach dotykanych notorycznie suszami rolnicy zmieniają profil produkcji, przechodząc ze zbóż do upraw, które opłaca się nawadniać: warzyw, krzewów jagodowych, sadów.

Niestety, większość z instalowanych systemów nawodnieniowych nie jest wyposażona w narzędzia wspomagania decyzji służące do optymalizacji zużycia wody. Niezrównoważone nawadnianie może doprowadzić do powstawania braków wody oraz jest związane z ryzykiem zwiększonego wymywania azotu do wód gruntowych

w wyniku wzmożonego przepływu wody w głąb profilu glebowego. Łatwo rozpuszczalne formy azotu wymyte poniżej strefy korzeniowej są stracone dla roślin i mogą się przyczyniać do zanieczyszczenia wód gruntowych. Ponadto przy braku powszechnego systemu oceny zasobów wodnych dostępnych dla rolnictwa, intensywne i niekontrolowane zużycie wód do nawodnień może doprowadzić do zaburzenia cyklu odnawiania zasobów (rys. 2), co miało już miejsce w Hiszpanii (1, 2, 20).

W drugiej dekadzie XXI w. obserwujemy nasilenie susz. Według ciągłego monitoringu suszy rolniczej, prowadzonego przez IUNG-PIB, susze występują co roku, jednak ich przestrzenna lokalizacja i zasięg nieco się różni, dotycząc w niejednakowym stopniu różnych regionów kraju.

Rysunek 4 obrazuje trudną sytuację gospodarstw rolnych; przedstawia przebieg pogody przez 2 miesiące 2015 r., w okresie wegetacyjnym w gospodarstwie nastawionym na produkcję maliny wczesnej i późnej oraz porzeczki deserowej.



Rys. 4. Przebieg temperatury i opadów w roku 2015 w gospodarstwie jagodowym w Kosiorowie

Źródło: Kozyna i Wawer, 2016 (10)

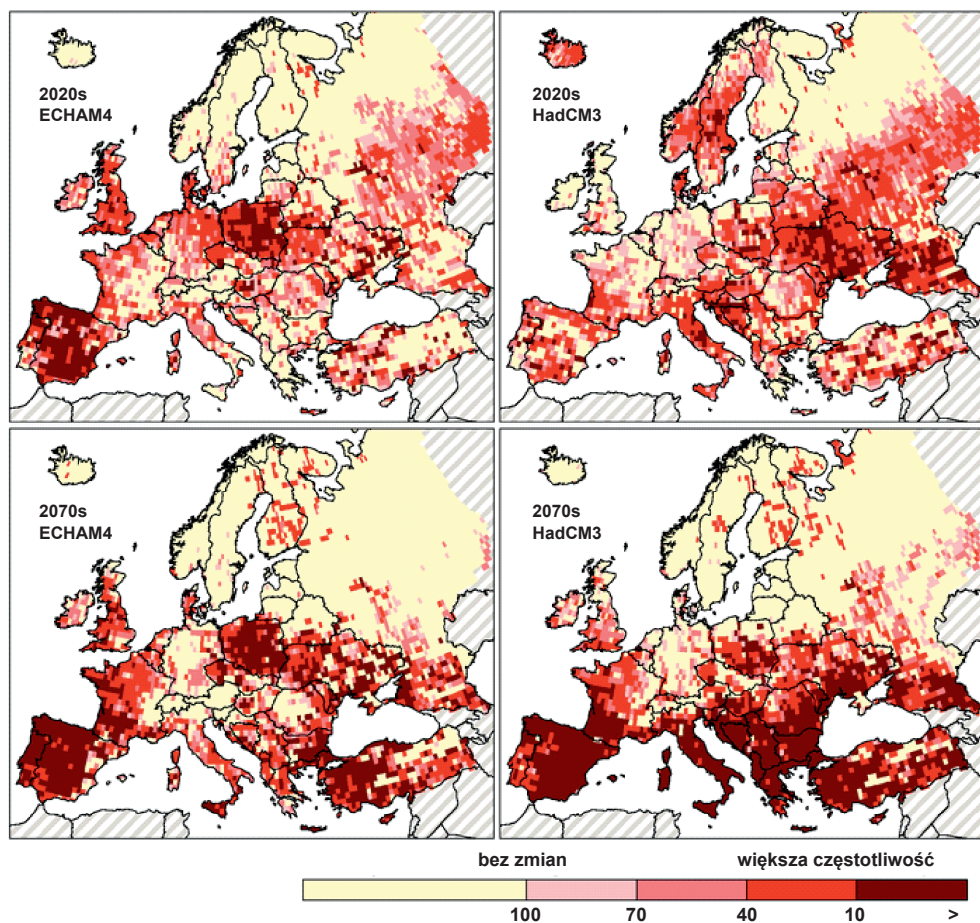
W okresie od 1 lipca do końca sierpnia 2015 r. spadło na tym obszarze zaledwie 31,5 mm deszczu, przy czym temperatura powietrza przez większość tego okresu oscylowała wokół 25–30°C, co daje wartość dziennego parowania w granicach 4–7 mm, w zależności od prędkości wiatru. W czasie pierwszych 25 dni sierpnia spadło tylko 3 mm deszczu (czerwone strzałki na rys. 4). Szacunkowy bilans wodny dla tego okresu wynosi więc średnio 31,5 mm – 305 mm = –273,5 mm. Gospodarstwo prowadzi uprawę na bardzo lekkich rędzinach podścielonych miejscami cienką warstwą gliny zalegającej na zeszczelinowanej skale marglowej. Gleby te mają niewielką pojemność wodną, ponadto woda dość szybko odcieka z nich przez zeszczelinowaną skalę podścielającą. Bez nawadniania uprawa na tym obszarze owoców miękkich nie byłaby możliwa, a bez zastosowania systemu wspierania decyzji kiedy i ile nawadniać

na podstawie pomiarów wilgotności gleby, nawadnianie byłoby bardzo kosztowne (20). Dzięki wdrożeniu systemów wspierania decyzji w nawodnieniach Enorasis (16) i Aquastatus (10) oraz zastosowaniu czujników wilgotności gleby, obniżono zużycie wody na tych polach aż dziesięciokrotnie (!).

Ocieplający się klimat przyniesie dalsze zwiększenie parowania z powierzchni ziemi i spowoduje intensywniejsze zużycie wody przez rośliny. Wzrost średniej temperatury (bez uwzględnienia usłonecznienia, wiatru i innych czynników) o 1 stopień powoduje wzrost dziennego parowania o ok. 10% (o 0,3–0,4 mm) (9). W kategoriach zapotrzebowania uprawy na wodę wynosi to 3–4 m³·ha⁻¹ dziennie. W skali tej części sezonu wegetacyjnego, kiedy występuje wysoka temperatura (np. przez 60 dni), zwiększenie zapotrzebowania na wodę do nawodnień wyniesie 180–240 m³·ha⁻¹. Pamiętać również należy, że ocieplenie wywoła przesunięcie dat wyznaczających początek i koniec okresu wegetacyjnego, co spowoduje jego wydłużenie, a więc i zwiększą się ogólne straty wody na parowanie.

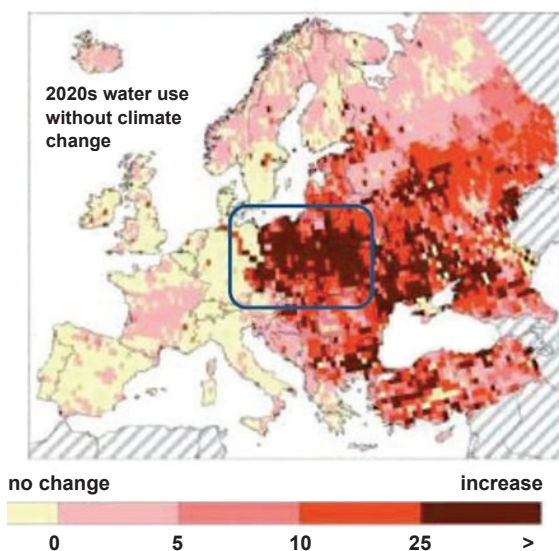
Jak wspomniano we wstępie, większość scenariuszy zmian klimatu opracowanych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) wskazuje na znaczne zwiększenie częstości występowania katastrofalnych susz 100-letnich na obszarze Polski (5, 13). Termin „susza 100-letnia” określa suszę o natężeniu tak dużym, że pojawia się nie częściej niż raz na 100 lat. Jest to wartość, do której odnoszą się prognozy i pochodzi ona z „ubiegłego” klimatu, tj. okresu 1900–1990. Obecnie obserwowane corocznie okresy posuszne i lokalne klęski suszy wydają się potwierdzać prognozy IPCC dla roku 2020 (12). Kolor czerwony w legendzie map prognoz IPCC (rys. 5) oznacza zwiększenie częstości susz z dotychczasowych raz na 100 lat do częstszych niż raz na 10 lat. Kolor czerwony na rysunku 6 oznacza zwiększenie intensywności susz stuletnich o cn. 10%.

Nowsze opracowania IPCC z 2013 r. (6, 13) są daleko bardziej ostrożne w prognozowaniu susz, jednak z prognoz elementów bilansu hydrologicznego: opadu (od 0 do +10%), odpływu powierzchniowego (od –20 do ponad –30%) i odpływu do wód gruntowych (od –10 do 10%), wynika jasno, że brakujące od 20% do ponad 30% odpływu z terenu do rzek i morza bierze się ze zwiększonego parowania terenowego stymulowanego przez wzrost temperatury atmosfery. Może to powodować istotne straty w plonowaniu upraw (rys. 7). Rozważając niekorzystne scenariusze, które wydają się potwierdzać bieżące obserwacje susz, należy się zastanowić, czy polskie rolnictwo jest gotowe na nadchodzące potencjalne klęski. Zdaniem wielu hydrologów, klimatologów i agronomów przy obecnym reżimie hydrologicznym, sprzyjającym szybkiemu odpływowi, Polska nie jest gotowa na takie zmiany (19).



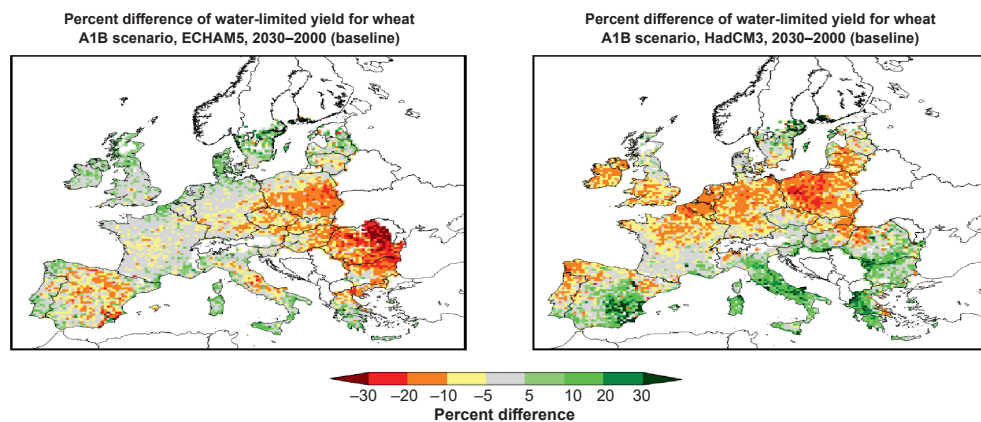
Rys. 5. Prognozy częstości występowania susz stuletnich (wg klimatu 1900–1990)

Źródło: Parry i in., 2007 (13)



Rys. 6. Prognoza zwiększenia intensywności susz stuletnich (w procentach)

Źródło: IPCC, 2007 (13)



Rys. 7. Prognozy zmian plonowania pszenicy na rok 2030 według dwóch scenariuszy w odniesieniu do roku 2000

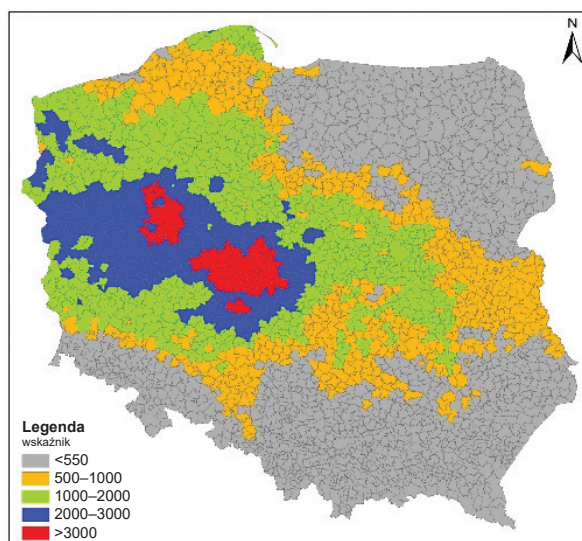
Źródło: IPCC, 2012 (6)

Podsumowując, obecnie obserwowane susze (rys. 8) oraz ich przewidywane nasilenie w niedalekiej przyszłości stawiają pod znakiem zapytania bezpieczeństwo żywnościowe Polski.

Z racji dużych strat plonów w wyniku susz wielu rolników podejmuje strategiczne decyzje zmiany profilu produkcji z upraw bazujących na opadach atmosferycznych

i naturalnej retencji glebowej na uprawy nawadniane według prostych praktyk organoleptycznej oceny potrzeb nawadniania (4, 18), która może powodować znaczne straty wody i zanieczyszczenie wód podziemnych (18).

Scenariusze zmian klimatu sugerują na tyle dotkliwe niedobory opadów w przyszłości, że prognozuje się stopniowe przechodzenie w Polsce na rolnictwo nawadniane.



Rys. 8. Wskaźnik intensywności susz (% obszaru razy % okresów dekadowych z suszą) w latach 2007–2021 w gminach w Polsce

Źródło: opracowanie własne IUNG-PIB

Prognozy klimatycznego bilansu wodnego dla zlewni rzeki Bystrej –woj. lubelskie

Do oceny zmiany parametrów klimatu istotnych dla rolnictwa wykorzystano wykresy pobrane ze strony Klimada 2¹. Portal Klimada zawiera wyniki symulacji zmiany klimatu dla różnych scenariuszy emisyjnych RCP (ang. *Representative Concentrations Pathways*), tj. scenariuszy emisji gazów cieplarnianych, od średniego RCP 4.5 po najbardziej niekorzystny RCP 8.5, zakładający ciągły intensywny wzrost emisji wynikający ze spalania paliw kopalnych, zwłaszcza na obszarach Azji i Ameryki Południowej, które będą się intensywnie rozwijać. Dane nie zostały dopasowane w pełni do obserwacji pogodowych, więc należałoby je czytać wyłącznie jako różnice między stanem z lewej strony wykresu a wybranym rokiem w przyszłości.

¹<https://klimada2.ios.gov.pl/klimat-scenariusze-portal/>

Nazwy poszczególnych RCP pochodzą od przypisanych im wartości globalnego wymuszenia radiacyjnego w górnych warstwach atmosfery, prognozowanego na koniec XXI w. (aktualnie $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Wielkość ta jest zależna od zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze (410 ppm CO_2 w 2020 r.).

- RCP 2.6 – redukcja wymuszenia radiacyjnego do wartości $2,6 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$ w roku 2100 i wyhamowanie globalnego ocieplenia w połowie stulecia. Zakładana jest stabilizacja ilości CO_2 na poziomie 400 ppm pod koniec stulecia i utrzymanie wzrostu średniej temperatury o $1,5^\circ\text{C}$ względem epoki przedindustrialnej. Biorąc pod uwagę, że poziom 400 ppm został już przekroczony, uznaje się RCP 2.6 za mało realistyczny.
- RCP 4.5 – wprowadzanie nowych technologii w celu uzyskania wyższej niż obecnie redukcji emisji gazów cieplarnianych. Zakładany jest wyraźny spadek zawartości GHG w atmosferze w połowie stulecia oraz osiągnięcie w roku 2100 stężeń CO_2 ok. 540 ppm i wymuszenia radiacyjnego $4,5 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$. Wzrost średniej temperatury globalnej wyniesie ok. $2,5^\circ\text{C}$ pod koniec XXI w.
- RCP 6.0 – stopniowy wzrost emisji GHG. Zakłada się osiągnięcie poziomu stężeń CO_2 ok. 650 ppm i wymuszenia radiacyjnego $6,0 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$. Średnia temperatura globalna wzrośnie o ok. 3°C pod koniec XXI w.
- RCP 8.5 – utrzymanie aktualnego tempa wzrostu emisji gazów cieplarnianych, w formule „działania jak zwykle”. Pod koniec wieku zakłada się osiągnięcie poziomu stężeń CO_2 ok. 940 ppm oraz wymuszenia radiacyjnego $8,5 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$. Średnia temperatura Ziemi wzrośnie o $4,5^\circ\text{C}$ względem epoki przedindustrialnej. Scenariusz ten z 95% prawdopodobieństwem oznacza nieodwracalną destabilizację klimatu Ziemi².

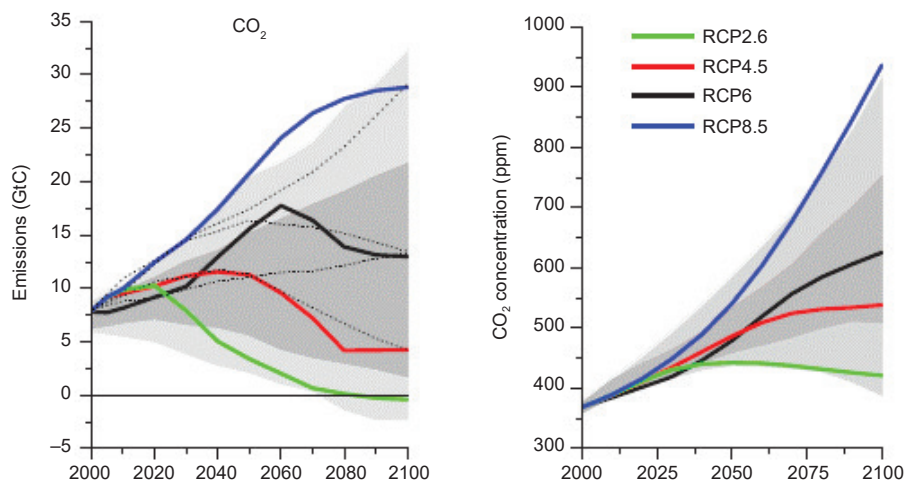
Różnice projekcji emisji CO_2 (lewy panel) i prognozowanych stężeń CO_2 (prawy panel) pomiędzy różnymi scenariuszami RCP przedstawia rysunek 9 (Klimada 2).

Symulację dla obszarów zlewni wykonał mgr inż. Damian Badora na podstawie danych udostępnionych przez GUGiK, IUNG-PIB oraz GIOŚ. Modelowanie zostało wykonane w programie SWAT (ang. *Soil and Water Assessment Tool*), używanym na całym świecie do symulowania wpływu zmian w zlewniach: użytkowanie terenu, uprawy, zbiorniki, praktyki rolnicze itd. oraz zmiany klimatu na hydrologię, plonowanie i jakość środowiska. Poniższe dane stanowią wycinek otrzymanych wyników dla zlewni rzeki Bystrej, położonej na Płaskowyżu Nałęczowskim (rys. 10).

Z symulacji klimatycznego bilansu wodnego (tab. 2) wynika, że w każdym przedziale dekadowym w latach 2021–2050 ujemny klimatyczny bilans wodny będzie się intensywnie pogłębiał, osiągając maksimum w dekadzie 2041–2050 dla RCP 4.5 na poziomie aż -153 mm oraz dla RCP 8.5 w dekadzie 2031–2040 w wysokości aż -207 mm . W porównaniu z obecnym poziomem rocznego KBW w wysokości -31 mm są to zmiany bardzo niekorzystne ze względu na negatywny wpływ na odnawianie się

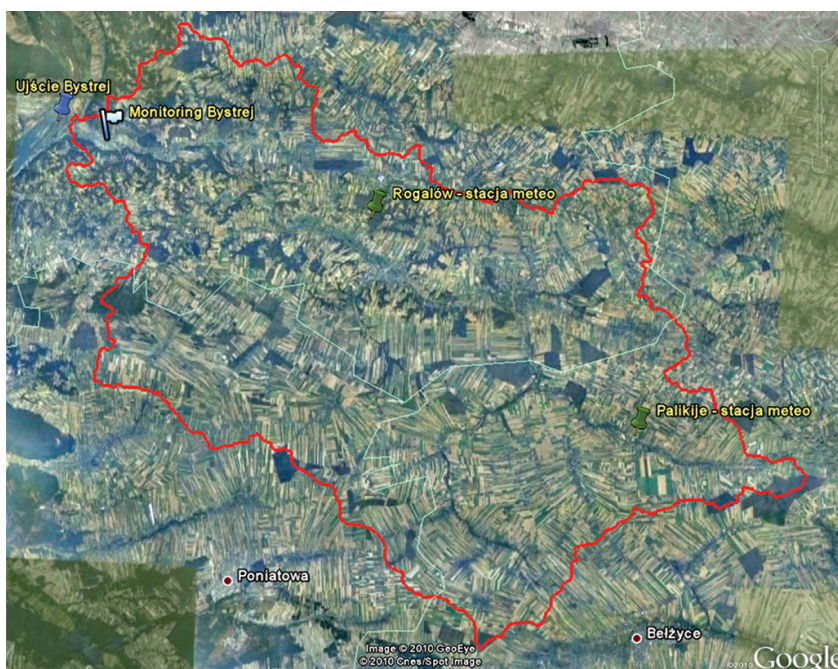
²<https://klimada2.ios.gov.pl/o-rcp/>

zasobów wód podziemnych. Największe przyrosty deficytu opadów wystąpią w okresie wiosennym, co wymusi przechodzenie na uprawy ozime lub uprawy wieloletnie.



Rys. 9. Wykresy scenariuszy emisji gazów cieplarnianych RCP oraz wywołane przez nie stężenie CO_2 w atmosferze

Źródło: Stocker i in., 2013 (14)



Rys. 10. Zarys granic hydrograficznych zlewni rzeki Bystrej na Płaskowyżu Nałęczowskim

Źródło: opracowanie własne

Jeśli chodzi o zagrożenie suszą (tab. 2), to symulacja wskazuje na znaczne zwiększenie zagrożenia jej wystąpienia w okresie wiosennym i niekiedy w okresie letnim. Prognozuje się obniżenie opadów w okresie zimowym we wszystkich dekadach i scenariuszach RCP.

Tabela 2

Symulacja klimatycznego bilansu wodnego (mm) zlewni rzeki Bystrej dla dekad 2021–2050

Projekcja klimatyczna	2013–2018	2021–2030	2031–2040	2041–2050	2021–2030	2031–2040	2041–2050
Scenariusz emisyjny	SWAT	RCP 4.5			RCP 8.5		
GSL (zima)	79	54	68	58	59	55	72
		–25	–11	–21	–20	–24	–7
MKM (wiosna)	–36	–68	–74	–72	–76	–93	–33
		–32	–37	–36	–40	–57	+4
CLS (lato)	–126	–120	–102	–166	–159	–169	–136
		+6	+25	–40	–33	–43	–9
WPL (jesień)	53	27	26	27	32	0	54
		–26	–27	–25	–21	–53	+1
Suma roczna	–31	–108	–81	–153	–144	–207	–42
		–77	–50	–122	–113	–176	–11

Źródło: opracowanie własne, D. Badora

Należałoby na tym obszarze położyć duży nacisk na planowanie przestrzenne, w którym stawia się gospodarkę wodną na pierwszym planie. Analizy: hydrologiczna, hydrogeologiczna, występowania susz, powinny być obowiązkową częścią studium uwarunkowań kierunków zagospodarowania przestrzennego gmin z priorytetem zwiększania retencji wodnej krajobrazu oraz zaleceniami do scaleń gruntów umożliwiającymi skuteczne przekształcenie krajobrazu w celu umożliwienia budowania dużej retencji wodnej. Ważnym elementem powinno być też zagadnienie renaturalizacji bagien i mokradel oraz torfowisk, jako naturalnych rezerwuarów wody w krajobrazie.

W przypadku zlewni rzeki Bystra, która położona jest na miąższach pokładach lessu zalegających na skale wapiennej, dostępność wód gruntowych na obszarach wyżej położonych może stanowić problem, dlatego przechodzenie na rolnictwo nawadniane

należałoby powiązać ze zwiększeniem retencji powierzchniowej na wierzchowinach, gdzie należy również zadbać o zasilanie wód podziemnych, których zasoby mogą być zagrożone zwiększoną eksploatacją przy niższej infiltracji opadów, które sugeruje zwiększające się z czasem wartości KBW.

Gospodarowanie wodą na poziomie krajobrazu – Wspólnoty Nawodnieniowe w Hiszpanii

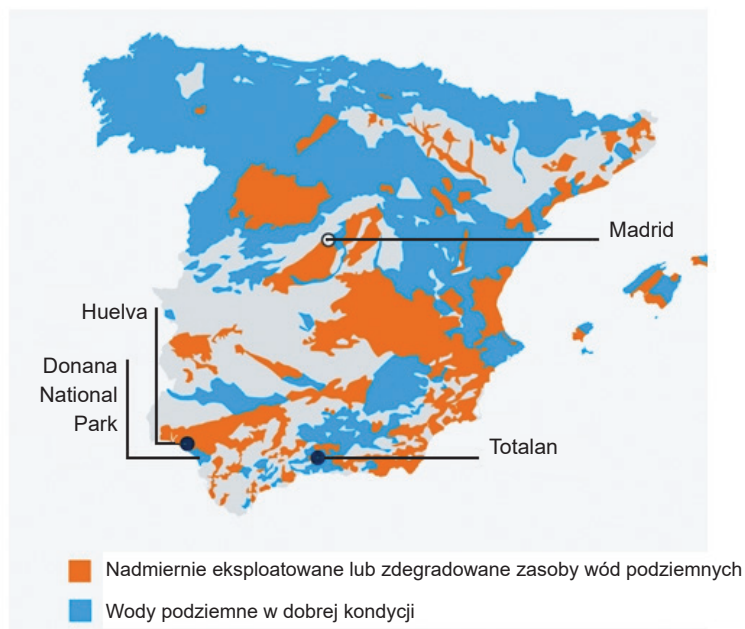
Dla obszaru kraju, gdzie dotychczasowe dotkliwe deficyty opadów objawiały się w postaci rozległych i intensywnych susz rolniczych, prognozuje się jeszcze większe pogłębienie tych deficytów, co prawdopodobnie wymusi przechodzenie rolnictwa na uprawy nawadniane. Polska nie ma długiego doświadczenia w zarządzaniu zasobami wód dla celów poboru do nawodnień w rolnictwie. Dobrym przykładem dojrzałego systemu dystrybucji zasobów może być system samorządów nawodnieniowych w Hiszpanii, gdzie niedobory wody są stałym elementem praktyki rolniczej.

Dystrybucja wody do nawodnień w Hiszpanii bazuje na ponad 1000-letnim systemie rozdziału wody z kanałów zasilających całe obszary rolnicze (3, 7), które wówczas znajdowały się pod panowaniem muzułmańskim. Ówczesni władcy tego regionu ciągle musieli rozstrzygać spory sąsiedzkie oscylujące wokół sprawiedliwego korzystania z wody do nawodnień zalewowych pól. Stopniowo powstał system samorządów wodnych oparty najpierw na Trybunałach Wodnych, które rozstrzygały spory poszczególnych użytkowników wód na danym obszarze, przy czym sędziowie byli wybierani spośród najbardziej szanowanych mieszkańców danego obszaru. Następnie powstały Wspólnoty Nawodnieniowe składające się z rolników korzystających z tego samego kanału zaopatrującego dany obszar w wodę. Wspólnoty były samorządne w zakresie podziału zasobów wodnych przydzielonych w koncesji przez wyższą administrację. System też został utrzymany przez katolickich władców Hiszpanii po pokonaniu i wypędzeniu władców muzułmańskich i dotrwał w niewiele zmienionej formie do dziś. Po wdrożeniu Ramowej Dyrektywy Wodnej 2000/60/WE zarządzanie wodą na poziomie zlewni prowadzą jednostki administracji państwowej, odpowiadające polskiemu KZGW i RZGW, oraz liczne inne jednostki specjalistyczne podległe różnym ministerstwom. Administracja państwowa jest odpowiedzialna za określanie limitów poboru wód dla poszczególnych Wspólnot Nawodnieniowych, które reprezentują swoich członków. Dzięki temu rozwiązaniu administracja nie jest zmuszona prowadzić spraw pojedynczych rolników, a pozostaje w kontakcie ze wspólnotami, co zmniejsza konieczną liczbę urzędników z jednej strony, a z drugiej skraca procedury, choć uważa się, że są one nadal zbyt długotrwałe.

Obecnie wspólnoty nawodnieniowe dostają koncesję z limitem rocznym zużycia wody, określanym przez administrację państwową lub samorządową na podstawie analiz hydrologicznych i hydrogeologicznych. Limit jest dzielony według powierzchni upraw – samorządnie w każdej wspólnocie osobno. Administracja określa limity

na podstawie badań hydrogeologicznych i monitoringu zasobów wody. Najstarsze wspólnoty wodne w Hiszpanii mają ponad 1200 lat. System hiszpański był prezentowany na spotkaniu w Ministerstwie Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej w październiku 2018 r. przez przedstawicieli regionalnych związków wspólnot wodnych FENACORE.

System hiszpański sprawdzał się przez setki lat do chwili, kiedy zaczęto pobierać wody podziemne, których nie potrafiąco odpowiednio opomiarować. Brak kontroli poboru wód podziemnych doprowadził do sytuacji, w której obecnie więcej wody jest pobierane ze źródeł nielegalnych niż z legalnych, a zasoby wód zagrożone są niedoborami i degradacją jakościową (rys. 11), na co wskazują raporty Greenpeace (2) i WWF (21).



Rys. 11. Stan wód gruntowych w Hiszpanii wg raportu Greenpeace

Źródło: Barea Luchena, 2018 (2)

Raport WWF z 2006 r. (21) dotyczący nielegalnego poboru wód podziemnych w Hiszpanii wyróżnił obszary problemowe związane z niedostosowaniem systemu rozdziału wód do nowych technologii pobierania wód gruntowych przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3

Przyczyny i skutki nielegalnego poboru wód podziemnych w Hiszpanii

Przyczyna	Jednostka odpowiedzialna	Skutki
Brak efektywnego monitoringu poboru i wymuszania egzekwowania prawa przez administrację wodną	Ministerstwo Środowiska	wzrost liczby nielegalnych studni głębinowych ze względu na brak konsekwencji prawnych
Polityczne naciski na zarządy obszarów zlewniowych (odpowiednik polskich RZGW), aby zapobiegać konfliktom z grupami nacisku (firmy budowlane, organizacje rolnicze)	użytkownicy wód, administracja regionalna	wzrost liczby się nielegalnych studni głębinowych ze względu na brak konsekwencji prawnych
Kradzież wody nie była raportowana, a czasem wręcz ukrywana	użytkownicy wód	powstało wrażenie, że bezpieczniej jest kraść wodę; niedobory wody u rolników nawadniających legalnie
Nielegalni użytkownicy wód otrzymywali subsydia	administracja regionalna	nielegalne studnie i czarnorynkowy obrót wodą do nawodnień
Dysproporcjonalny rozwój obszarów zurbanizowanych	administracja regionalna, rady miast	nielegalny pobór wód do potrzeb nierolniczych, m.in. podlewania trawników i pól golfowych
Powolne rozpatrywanie podań o pozwolenia poboru wód	Ministerstwo Środowiska	trudniej wykrywać nielegalne nawodnienia, ponieważ często składający oficjalne podanie wiercą studnie przed uzyskaniem pozwolenia
Brak odpowiedzialnego korzystania z wody	użytkownicy wód	nadmierny pobór, wiercenie nielegalnych studni
Brak szkoleń i podnoszenia świadomości użytkowników wód, co spowodowało, że zamiast optymalizować nawodnienia poszukuje się nowych źródeł, ponieważ dotychczasowe źródła są niewystarczające	użytkownicy wód	nadmierny pobór, wiercenie nielegalnych studni
Wartość plonów szacowana wg ilości nie jakości	przetwórcy, rynek	zasoby wodne zużywane na nawadnianie obszarów suchych, aby zwiększyć areał pod uprawy

Źródło: WWF, 2006 (21)

Z analizy stanu rzeczywistego aktualnego działania hiszpańskich Wspólnot Nawodnieniowych w praktyce należałoby wysnuć wniosek, że nadmierny nielegalny pobór wód wynika przede wszystkim z niedostosowania mechanizmów kontroli do nowoczesnych systemów poboru wód podziemnych oraz braku egzekwowania prawa w zakresie pozwoleń i kar za ich nieprzestrzeganie (17). System Wspólnot Nawodnieniowych powstał w czasach, gdy kontrola poboru polegała na obserwacji, kiedy dany rolnik otwiera służę doprowadzającą wodę na własne pola ze wspólnego kanału zasilającego. Pobór wód podziemnych rządzi się zupełnie innymi zasadami i ma swoją specyfikę – nie widać kiedy i ile wody jest pobierane; studnie są niewielkie i łatwo je ukryć, trudniej ocenić wielkość dostępnego zasobu oraz bezpieczny dla wszystkich poziom korzystania z niego.

Po analizie systemu hiszpańskiego oraz konsultacjach z rolnikami, wójtami gmin i pracownikami sejmików wojewódzkich opracowano propozycję systemu organizacji gospodarki wodnej dla rolnictwa na poziomie gminy, składającego się z 7 filarów:

1. Lokalne Partnerstwa ds. Wody (LPW) na poziomie powiatów, podparte studium zasobów wodnych w gminach, uzupełniające MPZP. Studium wód powierzchniowych i podziemnych wykonane przez hydrologów i hydrogeologów wraz z monitoringiem zasobów (nie tylko poziomu) wód do wykorzystania w rolnictwie i gospodarce wraz ze wskazaniem progów krytycznych dla odnawiania się zasobów.
2. Reforma spółek wodnych i opodatkowania na utrzymanie sieci drenarskich na obszarach wiejskich. Naprawa i automatyzacja regulacji sieci melioracyjnych.
3. Utworzenie lokalnych wspólnot nawodnieniowych (poziom obręb geodezyjnego). Wspólnoty zarządzałyby wodami powierzchniowymi i podziemnymi na wzór wspólnot wodnych w Hiszpanii. Samorządność spółek będzie gwarantować sprawiedliwy podział oraz zapewni skuteczną kontrolę poboru wód. Spółki ponosiłyby koszty utrzymania i budowy infrastruktury dystrybucyjnej oraz otrzymywałyby koncesję na pobór wód do nawodnień (zamiast dzisiejszych pozwoleń wodno-prawnych na każdego rolnika) od RZGW na podstawie dokumentów planistycznych, kontrolnych i monitoringu zasobów opracowanych dla danego obszaru (punkt 1).
4. Optymalizacja zużycia wody w nawodnieniach. Wymóg używania systemów wspierania decyzji w nawodnieniach (3, 10, 11, 21).
5. Zwiększenie retencji wodnej w krajobrazie poprzez małą retencję (zbiorniki wodne, zwiększenie pojemności wodnej gleb przez właściwe zmianowanie i nawożenie organiczne, spowolnienie odpływu powierzchniowego do wód itd.), zbieranie wody deszczowej z powierzchni utwardzonych w gospodarstwie, oszczędne metody gospodarowania wodą, jak ponowne wykorzystanie szarej wody itp., elementy przewidziane w znacznej mierze w programie „Stop Suszy”.

6. Edukacja rolników, doradców, administracji samorządowej w dziedzinie gospodarki wodnej i oszczędnego gospodarowania nią w rolnictwie.
7. System monitoringu i kontroli poboru zasobów wodnych zapewniający sprawiedliwy dostęp do wody oraz gwarantujący ich bezpieczeństwo (8, 11, 21).

Gospodarowanie wodą na poziomie krajobrazu – Lokalne Partnerstwa ds. Wody w Polsce

5 marca 2020 r. w Puławach odbyła się konferencja naukowa pt. „Adaptacja gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu”, którą zorganizowały na prośbę Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi instytuty badawcze: IUNG i ITP.

Na konferencji przedstawiono spodziewane zagrożenia związane ze zmianami klimatu (9), stan wiedzy o obecnym wpływie zmieniającego się klimatu na rolnictwo, stan badań naukowych mających na celu adaptację polskiego rolnictwa do zmieniającego się klimatu oraz przykłady rozwiązań w Hiszpanii i Izraelu. Przedstawiono również propozycje działań adaptacyjnych (19).

Dyskusje podejmowane w trakcie konferencji skłoniły MRiRW do podjęcia kroków organizacyjnych zmierzających do uprzedzenia nadchodzących problemów i umożliwienia poprawy gospodarki wodnej w rolnictwie na poziomie społeczności lokalnych. Opracowano założenia Lokalnych Partnerstw ds. Wody na poziomie powiatu, z ośrodkami doradztwa rolniczego jako liderami. Partnerstwa mają skupiać użytkowników wód (w tym rolników), samorządy, instytucje zarządzające wodą, infrastrukturą (jednostki Wód Polskich, spółki wodne) i przestrzenią (Lasy Państwowe, RDOŚ), uniwersytety, organizacje pozarządowe oraz inne podmioty zainteresowane współpracą na poziomie lokalnym.

Członkami LPW mogą być wszelkie osoby/podmioty zaangażowane w gospodarkę wodną na terenie danego powiatu – w szczególności: rolnicy, przedstawiciele spółek wodnych, samorządu (gminnego, powiatowego, wojewódzkiego), przedstawiciele terenowych organów PGW WP, Lasów Państwowych, organizacji pozarządowych. Preferowaną formą zawiązywania się Lokalnych Partnerstw ds. Wody jest list intencyjny bądź wewnętrzny regulamin.

Głównym celem funkcjonowania LPW jest poprawa gospodarki wodnej na terenie powiatu. Sprawnie funkcjonujące LPW może identyfikować problemy i podejmować inicjatywy prawne w zakresie niezbędnych zmian – zgłaszać do ministra właściwego ds. gospodarki wodnej; oraz wspierać aktywizowanie i umacnianie współpracy pomiędzy wszystkimi podmiotami.

Partnerstwa powinny zajmować się także diagnozowaniem sytuacji w zakresie zarządzania zasobami wody, wypracowaniem wspólnych rozwiązań (współdecydowanie) na rzecz poprawy szeroko pojętej gospodarki wodnej, opiniowaniem

i wypracowaniem planów inwestycyjnych (wskazywanie priorytetów), a także działaniami promocyjnymi i edukacyjnymi na rzecz racjonalnej gospodarki wodą wśród mieszkańców danego powiatu³.

Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi przewidziało w KPO budżet dla LPW mający umożliwiać zlecanie ekspertyz firmom lub ośrodkom naukowym w zakresie hydrologii wód powierzchniowych i podziemnych, retencji glebowej, wpływu zmian klimatu na dostępność wody i inne. Środki mają być przyznawane według zapotrzebowania zgłaszanego przez ośrodki doradztwa rolniczego – koordynatorów LPW.

Pilotaż przeprowadzony w 2020 r. w 16 województwach w 18 powiatach (w tym w woj. śląskim LPW powiatu cieszyńskiego) wykazał dużą przydatność tej inicjatywy: opracowano raporty dotyczące dostępności wód podziemnych, stanu sieci melioracyjnych, wyznaczono najbardziej palące społeczność problemy z wodą, co umożliwiło opracowanie strategii gospodarki wodnej wskazujących co i w jakiej kolejności powinno być zrobione, by poprawić stan dostępności i jakości wód na obszarze danego LPW. W roku 2021 zwiększono liczbę działających Partnerstw do ok. 330. Chęć założenia LPW lub przystąpienia do już istniejącego można zgłosić do właściwego dla miejsca zamieszkania ODR-u lub Państwowego Gospodarstwa Wodnego Polskie.

O tym, jak założyć LPW i jak je prowadzić, można przeczytać w opracowaniu pod redakcją Ryszarda Zarudskiego pt. „O Lokalnych Partnerstwach Wodnych (LPW) – dzisiaj i jutro” (22).

Według danych Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, koordynującego cały system państwowego doradztwa rolniczego w Polsce, do września 2023 r. powstało ponad 247 LPW, tj. w 78,66% wszystkich powiatów. Opracowano przy współudziale przedstawicieli doradztwa rolniczego blisko 265 planów wieloletnich dotyczących partnerstwa wodnego oraz odbyło się ok. 1100 spotkań w różnej formie, tj. szkoleń, konferencji regionalnych i wyjazdów studyjnych. Powstało 47 filmów edukacyjnych oraz wydano ponad 50 publikacji w tym temacie.

Wnioski z wdrażania partnerstwa wodnego wskazują na potrzebę dalszego wzmacniania koordynacji działań pomiędzy podmiotami uczestniczącymi w zarządzaniu zasobami wody na obszarach wiejskich na poziomie regionalnym i lokalnym.

Niezbędnym zadaniem LPW pozostaje współtworzenie długofalowych planów gospodarowania wodą opartych na analizach hydrologicznych, hydrogeologicznych oraz klimatologicznych, pozwalających na ocenę zagrożeń dla dostępności wody i kierunków inwestycji w skali lokalnej, aby odpowiednio wcześniej tym zagrożeniom zapobiegać.

³<https://www.gov.pl/web/rolnictwo/lokalne-partnerstwa-ds-wody2>

Literatura

1. Baker S.: Spain's vast network of illegal wells exposed after death of toddler. Deutsche Welle (DW), 2019. <https://www.dw.com/en/spains-vast-network-of-illegal-wells-exposed-after-death-of-toddler/a-47311150>
2. Barea Luchena J.: Los pozos ilegales nos roban el agua. Greenpeace, 2018. <https://es.greenpeace.org/es/noticias/los-pozos-ilegales-nos-roban-el-agua/>
3. Del Campo García A.: The Irrigators Communities of Spain and their National Federation. Las Comunidades de Regantes de España y su Federación Nacional, FENACORE, 2018, pp.104.
4. Doorenbos L.D., Westcot D.W., Italconsult S.p.A., Rome (Italy): Irrigation Practice and Water Management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 1, Revision 1, 1984.
5. EEA, 2017: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. EEA report 1/2017, pp. 424. <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>
6. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Dahe Q., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (red.): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press, 2012, pp. 582. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf
7. Historical Irrigation System at l'Horta de València, 2017. FAO, Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS). <http://www.fao.org/giahs/giahsaroundtheworld/designated-sites/europe-and-central-asia/historical-waterscape-of-lhorta-de-valencia/en/>
8. Hubbard N., Zarco-Tejada P.J., Loudjani P.: Precision agriculture: an opportunity for EU farmers – potential support with the CAP 2014-2020. In-depth analysis. European Parliament, Directorate-General For Internal Policies, Policy Department B: Structural And Cohesion Policies, Agriculture And Rural Development, PE 529.049, 2014, pp. 57.
9. Kozyra J., Król-Badziak A., Żyłowski T., Koza P., Pudełko R.: Zmiany klimatu i ich wpływ na gospodarkę wodną i rolnictwo. Konferencja „Adaptacja gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu”, IUNG-PIB, Puławy, 05.03.2020 r. <http://iung.pl/images/pdf/2020/woda/kozyra.pdf>
10. Kozyra J., Wawer R.: Nawadnianie z wykorzystaniem pomiarów wilgotności gleby. Szydłów 26.10.2016.
11. Liaghat S., Balasundram S.K.: A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2010, **5(1)**: 50-55, doi: 10.3844/ajabssp.2010.50.55.
12. Monitoring Suszy, IUNG-PIB: <http://susza.iung.pulawy.pl>
13. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (red.): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
14. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (red.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 ss., IPCC, 2013. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf
15. Stuczynski T., Kozyra J., Łopatka A., Siebielec G., Jadczyzyn J., Koza P., Doroszewski A., Wawer R., Nowocien E.: Przyrodnicze uwarunkowania produkcji rolniczej w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, **7**: 77-115.

16. Syropoulou P., Symeonidou M., Tekes S., Wawer R., Kazantzidis A., Crnojevic V., Bruggeman A.: Developing an intelligent ICT system for environmentally optimized irrigation management in agriculture. *Journal of Agricultural Informatics*, 2017, **8(2)**: 22-32.
17. Wawer R.: Gospodarowanie wodą w rolnictwie w zmieniającym się klimacie. Perspektywa przejścia na rolnictwo nawadniane a sprawiedliwe i zrównoważone korzystanie z wód w świetle rozwiązań hiszpańskich i postępu w informatyce. *Polish Journal of Agronomy*, 2020, **41**: 38-48. DOI: <https://doi.org/10.26114/pja.iung.424.2020.41.05>
18. Wawer R.: Racjonalne gospodarowanie wodą na terenach rolniczych. Województwo śląskie. ŚODR, 2023, ss. 44.
19. Wawer R., Łysoń P., (red.): Adaptacja gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu, 2020. https://esklep.iung.pl/pl/p/file/9c3aad2c4d59f91f4e8f27a3c88fddd5/Konferencja_woda_broszura_wersja_elektroniczna1.pdf
20. Wawer R., Matyka M., Łopatka A., Kozyra J.: Systemy wspomagania decyzji w nawodnieniach upraw rolniczych. W: *Innowacyjne metody gospodarowania zasobami wody w rolnictwie*, W. Dembek, J. Kuś, M. Wiatkowski, G. Żurek (red.), Wyd. CDR w Brwinowie, ss. 165-182. ISBN: 978-83-88082-18-4, 2016.
21. WWF, 2006: Illegal water use in Spain. Causes, effects and solutions, 2006. WWF/Adena, pp. 20.
22. Zarudzki R., Lewandowski Z., Kołacz M., Serafin R.: O Lokalnych Partnerstwach Wodnych (LPW) – dzisiaj i jutro, 2023. <http://technologia.kpodr.pl/wp-content/uploads/2023/01/Wydawnictwo-Wody-cale-3.01-2023-.pdf>

Materiały edukacyjne dostępne w Internecie:

- Wawer R., Łysoń P., (red.): Adaptacja gospodarki wodnej w rolnictwie do zmieniającego się klimatu. 2020. https://esklep.iung.pl/pl/p/file/9c3aad2c4d59f91f4e8f27a3c88fddd5/Konferencja_woda_broszura_wersja_elektroniczna1.pdf
- Wawer R., Kolasinska K. (red.): Kodeks Dobrych Praktyk Wodnych w Rolnictwie. 2022. <https://www.gov.pl/attachment/1879733c-e280-4a09-956a-f085ec015bf5>
- Treder W.: Kodeks Dobrych Praktyk Wodnych w Ogrodnictwie. 2022. <https://www.gov.pl/attachment/1879733c-e280-4a09-956a-f085ec015bf5>
- Wawer R., Kozyra J., (red.): Metody ochrony i racjonalnej gospodarki wodnej w rolnictwie i na obszarach wiejskich. 2017. <https://www.fdpa.org.pl/metody-ochrony-i-racjonalnej-gospodarki-wodnej-w-rolnictwie-i-na-obszarach-wiejskich-1>
- Materiały edukacyjne na stronie Fundacji na Rzecz Wspierania Polskiego Rolnictwa: <https://www.fdpa.org.pl/107,materiały-edukacyjne>

Adres do korespondencji:

dr hab. inż. Rafał Wawer, prof. IUNG-PIB
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786 773
e-mail: Rafal.Wawer@iung.pulawy.pl;

AUTOR	ORCID
Rafał Wawer	0000-0001-9266-9577
Damian Badora	000-0002-2497-8500

W serii wydawniczej „RAPORTY PIB”, a od 2007 r. „STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB” ukazały się następujące pozycje:

1. *Wybrane aspekty agrochemicznych badań gleby*. Puławy, 2006.
2. *Zasady wprowadzania nawozów do obrotu*. Puławy, 2006.
3. *Regionalne zróżnicowanie produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2006.
4. *Monitoring skutków środowiskowych planu rozwoju obszarów wiejskich*. Puławy, 2007.
5. *Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach*. Puławy, 2007.
6. *Możliwości rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2007.
7. *Współczesne uwarunkowania organizacji produkcji w gospodarstwach rolniczych*. Puławy, 2007.
8. *Efektywne i bezpieczne metody regulacji zachwaszczenia, nawożenia i uprawy roli*. Puławy, 2007.
9. *Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*. Puławy, 2007.
10. *Problem erozji gleb w procesie przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2008.
11. *Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Puławy, 2008.
12. *Wybrane zagadnienia systemów informacji przestrzennej i obszarów problemowych rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2008.
13. *Tworzenie postępu biologicznego w hodowli tytoniu i chmielu*. Puławy, 2008.
14. *Kierunki zmian w produkcji roślinnej w Polsce do roku 2020*. Puławy, 2009.
15. *Wybrane elementy regionalnego zróżnicowania rolnictwa w Polsce*. Puławy, 2009.
16. *Systemy wspomagania decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej*. Puławy, 2009.
17. *Stan i kierunki zmian w produkcji rolniczej (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2009.
18. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty współczesnych metod nawożenia i regulacji zachwaszczenia*. Puławy, 2009.
19. *Oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze w warunkach zmian klimatu*. Puławy, 2010.
20. *Ocena zrównoważenia gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach, powiatach i województwach*. Puławy, 2010.
21. *Możliwości rozwoju obszarów problemowych rolnictwa (OPR) w świetle PROW 2007–2013*. Puławy, 2010.
22. *Możliwości rozwoju gospodarstw o różnych kierunkach produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2010.
23. *Związki fitogeniczne jako naturalna alternatywa antybiotykowych promotorów wzrostu*. Puławy, 2010.
24. *Wybrane aspekty przemian strukturalnych na obszarach wiejskich*. Puławy, 2010.
25. *Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych*. Puławy, 2010.
26. *Stan obecny i perspektywy rozwoju rolnictwa ekologicznego w Polsce*. Puławy, 2010.
- 27(1). *Środowiskowe skutki działalności rolniczej i wdrażania PROW na obszarach problemowych rolnictwa*. Puławy, 2011.

- 28(2). *Techniki i technologie stosowane w produkcji roślinnej a środowisko przyrodnicze*. Puławy, 2012.
- 29(3). *Problemy zrównoważonego gospodarowania w produkcji rolniczej*. Puławy, 2012.
- 30(4). *Doskonalenie integrowanych technologii produkcji zbóż jarych i roślin pastewnych ze szczególnym uwzględnieniem początkowych elementów agrotechniki*. Puławy, 2012.
- 31(5). *Rola badań naukowych w kształtowaniu postępu w produkcji chmielu i tytoniu*. Puławy, 2012.
- 32(6). *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju i specjalizacji gospodarstw rolniczych*. Puławy, 2013
- 33(7). *Działalność Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-PIB w Puławach w zakresie wspierania doradztwa i praktyki rolniczej*. Puławy, 2013.
- 34(8). *Problemy gospodarki nawozowej w Polsce*. Puławy, 2013.
- 35(9). *Zagrożenia dla prawidłowego funkcjonowania gleb użytkowanych rolniczo – wybrane zagadnienia*. Puławy, 2013.
- 36(10). *Zmiany w technologiach produkcji roślinnej – oceny i wpływ na środowisko rolnicze*. Puławy, 2014.
- 37(11). *Dobre praktyki w nawożeniu*. Puławy, 2014.
- 38(12). *Jakość informacji w systemach wspomagania decyzji*. Puławy, 2014.
- 39(13). *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii pochodzenia rolniczego i ich wpływ na środowisko*. Puławy, 2014.
- 40(14). *Wybrane problemy rolnictwa polskiego z uwzględnieniem stanu jego zrównoważenia*. Puławy, 2014.
- 41(15). *Technologie produkcji zbóż i roślin pastewnych warunkujące wysoki plon i dobrą jakość*. Puławy, 2014.
- 42(16). *Podstawy nowoczesnego doradztwa nawozowego w Polsce*. Puławy, 2015.
- 43(17). *Wybrane problemy produkcji rolniczej z uwzględnieniem aspektu dóbr publicznych*. Puławy, 2015.
- 44(18). *Wybrane zagadnienia produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2015.
- 45(19). *Kształtowanie żyzności gleby*. Puławy, 2015.
- 46(20). *Wybrane zagadnienia związane z ochroną gleb przed degradacją*. Puławy, 2015.
- 47(1). *Problemy produkcji rolniczej w Polsce w kontekście ich oddziaływania na środowisko*. Puławy, 2016.
- 48(2). *Innowacje w nawożeniu*. Puławy, 2016.
- 49(3). *Siedliskowe i agrotechniczne uwarunkowania produkcji roślinnej w Polsce*. Puławy, 2016.
- 50(4). *Technologie produkcji roślinnej w warunkach zmieniającego się klimatu*. Puławy, 2016.
- 51(5). *Krajowe bazy danych o glebach*. Puławy, 2017.
- 52(6). *Redukcja emisji gazów cieplarnianych i amoniaku oraz metody adaptacji do zmian klimatu (wybrane zagadnienia)*. Puławy, 2017.
- 53(7). *Nawożenie a środowisko*. Puławy, 2017.
- 54(8). *Jakość gleb użytkowanych rolniczo i wskaźniki jej oceny*. Puławy, 2017.
- 55(9). *Uwarunkowania i kierunki zmian produkcji rolniczej w Polsce*. Puławy, 2018.
- 56(10). *Aktualne problemy nawożenia*. Puławy, 2018.
- 57(11). *Technologie produkcji roślinnej w warunkach zmieniającego się klimatu*. Puławy, 2018.

- 58(12).** *Stan zagrożeń dla jakości gleb w Polsce.* Puławy, 2018.
- 59(13).** *Środowiskowe aspekty gospodarki nawozowej.* Puławy, 2019.
- 60(14).** *Znaczenie postępu biologicznego i technologicznego w produkcji zbóż i roślin strączkowych.* Puławy, 2019
- 61(15).** *Wybrane zagadnienia agrotechniki roślin uprawnych.* Puławy, 2020.
- 62(16).** *Uwarunkowania i perspektywy rozwoju produkcji rolniczej w różnych regionach Polski.* Puławy, 2020.
- 63(17).** *Nawożenie – aspekty produkcyjne i środowiskowe.* Puławy, 2020.
- 64(18).** *Zagrożenia dla jakości gleb w Polsce – część II.* Puławy, 2020.
- 65(19).** *Teoretyczne podstawy racjonalnego nawożenia.* Puławy, 2021.
- 66(20).** *Zrównoważone użytkowanie i ochrona gleb jako element Europejskiego Zielonego Ładu.* Puławy, 2021.
- 67(21).** *Rolnictwo polskie wobec wyzwań klimatycznych.* Puławy, 2022.
- 68(22).** *Osiągnięcia i wyzwania produkcji chmielu i tytoniu.* Puławy, 2022.
- 69(23).** *Możliwości ograniczenia strat składników pokarmowych w perspektywie wdrażania wybranych strategii Europejskiego Zielonego Ładu.* Puławy, 2022.
- 70(24).** *Rolnictwo ekologiczne w Polsce.* Puławy, 2023.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW

W serii wydawniczej „**STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB**” publikowane są recenzowane prace z zakresu agronomii oraz ochrony i kształtowania środowiska rolniczego, wykonane w ramach zadań programów wieloletnich pn. „Kształtowanie środowiska rolniczego Polski oraz zrównoważony rozwój produkcji rolniczej” (2005-2010) oraz „Wspieranie działań w zakresie kształtowania środowiska rolniczego i zrównoważonego rozwoju produkcji rolniczej w Polsce” (2011-2015). W zeszytach problemowych o charakterze monografii, wydawanych w ramach tej serii, mogą być zamieszczane również prace autorów spoza IUNG-PIB, które merytorycznie mieszczą się w tematyce zadań programu wieloletniego. **Publikowane są prace problemowe, głównie mające charakter przeglądowy, z podkreśleniem znaczenia omawianych zagadnień dla rolnictwa polskiego.**

Wydruk tekstu do recenzji:

czcionka 12 p., z odstępem 1,5-wierszowym.

Przygotowanie do druku:

- tekst i tabele w programie Word,
- czcionka – Times New Roman
- układ pracy: słowa kluczowe, wstęp, wyniki i dyskusja bądź omówienie wyników, podsumowanie lub wnioski, literatura, dane kontaktowe, nr ORCID

tekst

- czcionka – 11 p. (spis pozycji literatury – 9 p.)
- wcięcie akapitowe – 0,5 cm

tabele

- podział na wiersze i kolumny (z funkcji tworzenia tabel)
- szerokość dokładnie 13 cm (tabele w pionie) lub 19 cm (tabele w poziomie)
- czcionka 9 p., pojedyncze odstępy międzywierszowe
- pod tabelą przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

rysunki/fotografie

- czarno-białe/kolorowe (możliwie duża rozdzielczość)
- wykresy w programie Word lub Excel
- wymiary w zakresie 13 cm × 19 cm
- w podpisach czcionka 9 p.
- na nośniku lub w oddzielnych plikach
- pod rysunkiem przypis ze wskazaniem źródła danych (autorstwa)

jednostki miary

- system SI
- jednostki zapisywać potęgowo (np. t·ha⁻¹)

literatura

- spis literatury na końcu pracy w układzie alfabetycznym wg nazwisk autorów, w kolejności: nazwisko (pismo rozstrzelone), pierwsza litera imienia, tytuł pracy, miejsce publikacji: tytuł wydawnictwa (wg ogólnie przyjętych skrótów tytułów czasopism), rok, numer (pismo pogrubione), strony,
- cytowanie w tekście – jako numer pozycji ze spisu literatury (w nawiasach okrągłych) lub dodatkowo z nazwiskiem autora (pismo rozstrzelone).

Pracę do recenzji należy złożyć w 1 egzemplarzu. Po recenzji oryginalny egzemplarz recenzowany złożyć/przesłać do Redakcji, a ostateczną wersję pracy, uwzględniającą uwagi recenzenta i redaktora, przesłać e-mailem.

Dane kontaktowe:

mgr Ewa Decka-Cywińska

Dział Upowszechniania i Wydawnictw IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: edeka@iung.pulawy.pl



ISBN 978-83-7562-404-5
Publikacja elektroniczna

Egzemplarz bezpłatny