

Współczesne uwarunkowania i wyzwania gospodarowania wodą w rolniczej przestrzeni produkcyjnej Wielkopolski

Pod redakcją
Jerzego Bykowskiego

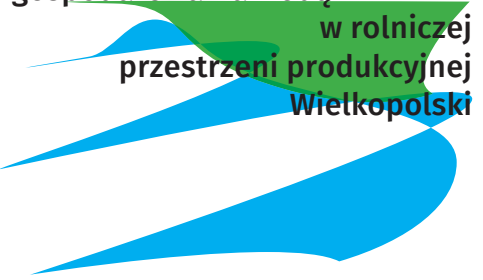


„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”.

Instytucja Zarządzająca PROW na lata 2014 – 2020 – Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

Publikacja opracowana w ramach działania „Lokalne Partnerstwo ds. Wody (LPW)” przez Wielkopolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Poznaniu współfinansowana jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Schematu II Pomocy Technicznej „Krajowej Sieci Obszarów Wiejskich” Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020.

**Współczesne
uwarunkowania
i wyzwania
gospodarowania wodą
w rolniczej
przestrzeni produkcyjnej
Wielkopolski**

An abstract graphic consisting of several overlapping shapes. A prominent green shape is at the top, with a blue shape below it. Below the blue shape is a large, light blue, teardrop-shaped element that tapers to a point on the left and has a wavy, organic edge on the right. The text is overlaid on these shapes.

**Współczesne
uwarunkowania
i wyzwania
gospodarowania wodą**

**w rolniczej
przestrzeni produkcyjnej
Wielkopolski**

Pod redakcją
Jerzego Bykowskiego

Przewodniczący Komitetu Redakcyjnego Wydawnictwa UPP
Prof. dr hab. Jacek Wójtowski

Recenzent
Prof. dr hab. inż. Czesław Przybyła
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań 2021, Poland

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody Wielkopolskiego Ośrodka Doradztwa Rolniczego w Poznaniu, ul. Sieradzka 29, 60-163 Poznań, tel. 61 868 52 72, email wodr@wodr.poznan.pl



ISBN 978-83-67112-00-0

Opracowanie redakcyjne
Anna Krybus

Opracowanie graficzne i komputerowe
Scriptor s.c.

Projekt książki i okładki
Jacek Grześkowiak Scriptor s.c.

Ilustracje na stronach rozdziałowych z publikacji *Wielka Pętla Wielkopolski*.
Za zgodą autora

Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
ul. Witosza 45, 61-693 Poznań
tel./faks 61 848 78 08, e-mail: wydawnictwo@up.poznan.pl

Wydanie I. Ark. wyd. 18,3, ark. druk. 14,2. Nakład 1000 + 30 egz.

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym
Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 67, 60-625 Poznań,
e-mail: zakgraf@up.poznan.pl

Autorzy

prof. UPP dr hab. inż. JERZY BYKOWSKI

Katedra Melioracji, Kształtowania Środowiska i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr hab. MICHAŁ FIEDLER

Katedra Melioracji, Kształtowania Środowiska i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr inż. MICHAŁ KOZŁOWSKI

Katedra Gleboznawstwa i Rekultywacji,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr inż. MICHAŁ NAPIERAŁA

Katedra Melioracji, Kształtowania Środowiska i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

prof. UPP dr hab. inż. TOMASZ PIECHOTA

Katedra Agronomii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

prof. PBŚ dr hab. inż. ROMAN ROLBIECKI

Katedra Przyrodniczych Podstaw Rolnictwa i Ogrodnictwa,
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

dr hab. MARCIN SPYCHAŁA

Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr inż. ANNA SZYMCAK-GRACZYK

Katedra Budownictwa i Geoinżynierii,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr inż. ZBIGNIEW WALCZAK

Katedra Budownictwa i Geoinżynierii,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Spis treści

1. Wstęp • 9

Jerzy Bykowski

2. Zdolności retencyjne gleb i dynamika uwilgotnienia strefy korzeniowej w sezonie wegetacyjnym w skali pola • 13

Michał Kozłowski

3. Jak zatrzymać wodę na polu? Wpływ agrotechniki na gospodarkę wodną • 37

Tomasz Piechota

4. Nawadniać czy nie nawadniać, dylematy współczesnego rolnictwa • 59

Roman Rolbiecki

5. Ciśnieniowe systemy nawadniające w uprawach polowych • 71

Roman Rolbiecki

6. Wykorzystanie ścieków oczyszczonych do nawodnień w rolnictwie • 85

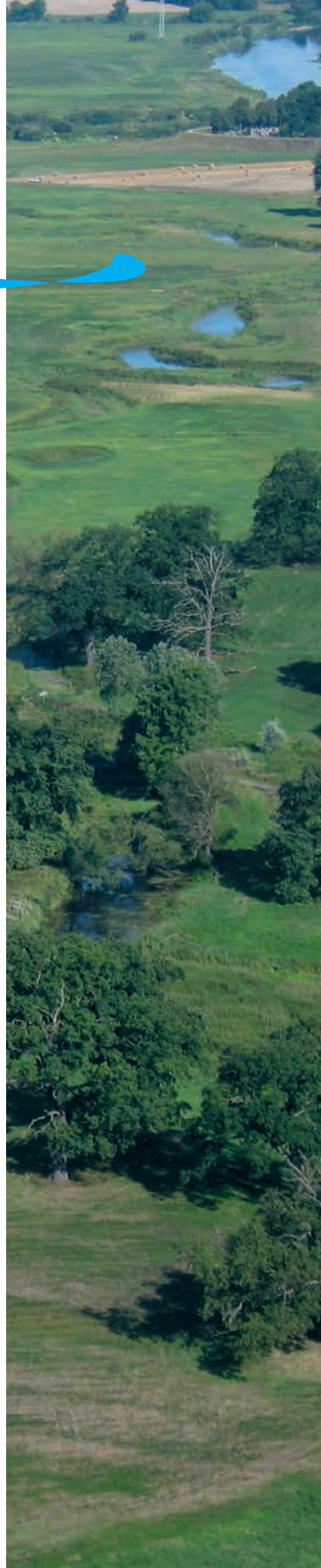
Marcin Spychała

7. Aktualny stan urządzeń melioracyjnych i możliwości poprawy ich funkcjonowania • 107

Jerzy Bykowski

8. Odpływ sterowany jako kompleksowe podejście do tradycyjnych melioracji • 133

Michał Napierata



9. Funkcje, planowanie i użytkowanie w gospodarstwie małych zbiorników wodnych ● 155

Michał Fiedler

10. Charakterystyka materiałów budowlanych stosowanych w budowie i remontach urządzeń melioracji wodnych ● 173

Anna Szymczak-Graczyk

11. Uwarunkowania prawne realizacji rolniczych obiektów budowlanych ● 201

Anna Szymczak-Graczyk

12. Wykorzystanie dronów w rolnictwie precyzyjnym oraz we wspomaganiu decyzji nawodnieniowych ● 209

Zbigniew Walczak

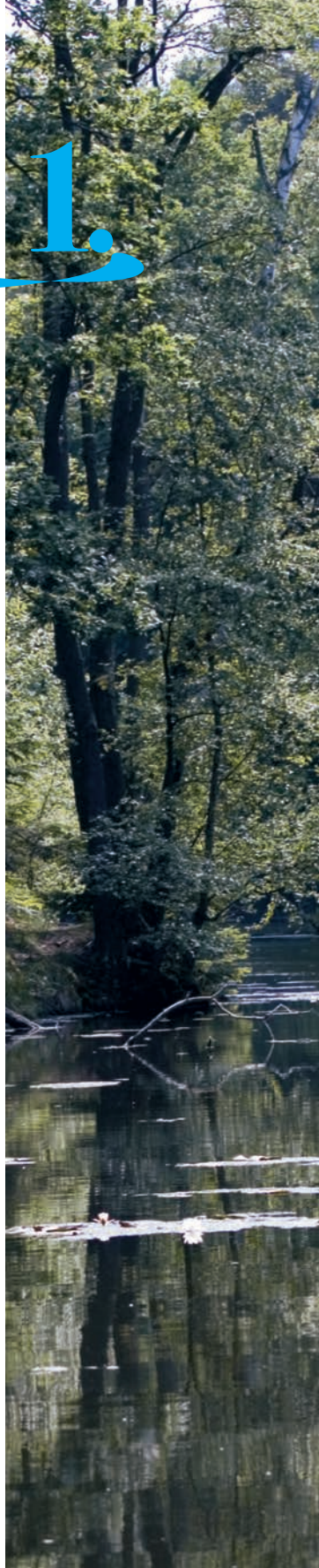
Wstęp

Jerzy Bykowski

Jednym z największych problemów, jakie dotyczą mieszkańców Ziemi, jest niedobór słodkiej wody. Obecnie już około 2/3 ludności globu (zwłaszcza w Indiach i Chinach) zmuszone jest do życia co najmniej przez jeden miesiąc w roku przy znaczącym niedoborze wody. Przez cały rok na poważny niedobór wody cierpi już ponad 500 mln osób na świecie (Mekonenn i Hoestra 2016), a w niektórych częściach Azji i Afryki do 2025 roku niedobór wody dotknie około 3 mld ludzi (Nguyen 2019). W ostatnich latach na niedobory wody cierpi także co dziesiąty mieszkaniec Europy. Ograniczenia te dotyczą ponad 1/6 terytorium naszego kontynentu. Braki, o których mowa, dotyczą latem ponad połowę ludności regionu Morza Śródziemnego (Report on the Review... 2012).

Wraz z rozwojem uprzemysłowienia, urbanizacją oraz zmianami klimatycznymi i skażeniem środowiska, niedoborami wody, zapotrzebowanie na wodę (także w Europie) będzie jeszcze prawdopodobnie w przyszłości wzrastać, w szczególności dla celów rolniczych (Report on the Review... 2012).

Szacuje się, że około 70%, a w niektórych krajach nawet ponad 90% wody (świeżej) wykorzystywane jest do celów rolniczych (WHO 2006). Dynamikę wzrostu zapotrzebowania na wodę do celów rolniczych odzwierciedla sytuacja z drugiej połowy XX wieku (1960-2000), kiedy zużycie wody na świecie wzrosło dwukrotnie, do czego przyczyniło się zapewne zwiększenie powierzchni upraw nawadnianych (Wada i in. 2011).



Rolnictwo jest jedną z głównych gałęzi gospodarki, pod względem zapotrzebowania na wodę – w Unii Europejskiej jest to prawie 25% rocznego poboru wody, a w regionach o intensywnej produkcji i gorącym klimacie dochodzi do 80% (European Environment ... 2009).

Miarodajnym wyznacznikiem uwarunkowań wodnych jest bilans wodny. Niestety, Polska pod tym względem jest jednym z najniekorzystniej prezentujących się krajów w Europie, co wynika z niskich opadów (średnio ok. 600-650 mm), wysokiej ewapotranspiracji (ok. 450 mm) i niskiego udziału dopływu (około 13%) (Treder i in. 2019). W przyszłości należy spodziewać się jeszcze pogorszenia bilansu wodnego ze względu na zwiększenie częstotliwości suszy i deszczy nawalnych przy jednoczesnym wzroście temperatury i ewapotranspiracji (Lobell i in. 2008, Kuchar i in. 2015). Już obecnie nawadnianie jest konieczne w wielu rejonach Polski, między innymi ze względu na występujące z częstotliwością 4-5 lat susze, zwiększenie liczby lat z niedoborami opadów oraz częstotliwości sekwencji lat suchych (Żarski i in. 2013, Tryngiel-Gać i Treder 2017).

W Polsce niedobory wody dotyczą w szczególności Wielkopolski, drugim pod względem województwie Polski, o powierzchni 29,8 tys. km² (9,5% obszaru kraju) i łącznej liczbie mieszkańców około 3,5 mln (średnia gęstość zaludnienia wynosi około 116 osób na 1 km²). Województwo jest położone na obszarze Pojezierzy Południowobałtyckich oraz Nizin Wielkopolskich, a na jego powierzchni dominują płaskie lub faliste wysoczyzny oraz równiny leżące na wysokości 70-100 m n.p.m.

Obszar Wielkopolski jest zróżnicowany pod względem zagospodarowania terenu. W strukturze użytkowania gruntów przeważają użytki rolne zajmujące około 65% powierzchni, a udział gruntów leśnych wynosi ponad 26%. W północnej i zachodniej części Wielkopolski przeważają lasy wraz z licznymi zbiornikami wodnymi. Z kolei część południowa i południowo-wschodnia to przede wszystkim obszary rolnicze i związane z nimi przemysł przetwórczy.

Tradycyjnie od lat jedną z najważniejszych gałęzi gospodarki Wielkopolski, jest rolnictwo. To w Wielkopolsce w 1870 roku staraniem hr. Augusta Cieszkowskiego powstała jedna z pierwszych na obszarze ówczesnych zaborów Wyższa Szkoła Rolnicza im. Haliny w Żabikowie, a do której tradycji sięga Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu. To w Wielkopolsce w 1911 roku skonstruowano i stosowano jedną z pierwszych deszczowni w Europie.

Obecnie, według danych GUS (2020), gospodarstwa rolne zajmują w Wielkopolsce 1,9 mln ha, przy czym ich grunty stanowią około 11% powierzchni gospodarstw rolnych kraju. Użytki rolne zajmują 92,9% powierzchni gospodarstw rolnych (w kraju 89,9%) i w 99,6% są to użytki w dobrej kulturze (w kraju 99,1%). Średnia powierzchnia gospodarstwa posiadającego użytki rolne wynosi około 15,4 ha, a powierzchnia użytków rolnych 14,3 ha (w kraju odpowiednio 11,6 ha i 10,4 ha). W województwie przeważają stosunkowo słabe jakościowo gleby białicowe i rdzawe, które stanowią 60% powierzchni, a także gleby płowe i brunatne

(20% powierzchni). Pozostałe to głównie gleby znajdujące się na obszarach podmokłych (opadowo-glejowe, glejobielicowe, murszowo-torfowe i mady rzeczne).

W ogólnej powierzchni zasiewów największy areał (74%) obejmują zboża, rośliny pastewne (9,8%) oraz uprawy przemysłowe (9,5% zasiewów w województwie) (GUS 2020). Plonowanie zbóż w Wielkopolsce jest średnio nieco wyższe od średniej dla Polski, przy czym w województwie plony stanowią około 15% wszystkich zbóż zebranych w Polsce (<https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/WIELKOPOLSKIE.pdf>).

Niestety, wysokiej i stabilnej produkcji rolniczej w Wielkopolsce nie sprzyja jej klimat. Należy do strefy klimatu umiarkowanego, przy wzajemnym przenikaniu się wpływów morskich i kontynentalnych, co wywołuje przejściowość, uwidaczniającą się zmiennymi warunkami atmosferycznymi, zależnymi od rodzaju napływających mas powietrza. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi około 8,2°C, ku północy spada do 7,6°C, a na krańcach południowych i zachodnich osiąga 8,5°C. Okres wegetacyjny należy do najdłuższych w Polsce i wynosi około 228 dni (na północ od linii Gniezno-Szamotuły) i powoli spada do 216 dni (na południowych krańcach województwa). Roczna suma opadów wynosi 500 – 550 mm i jest jedną z najniższych w Polsce (Woś 1994). Według Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej obszar zlewni Warty, w tym Wielkopolska, należą do rejonów Polski najbardziej dotkniętych niedoborem opadów (suszą). Znaczna część Wielkopolski jest więc uboga w wodę i od lat obserwuje się niekorzystny bilans wodny (opady i spływ jednostkowy poniżej średniej krajowej). Na znacznym obszarze Wielkopolski występuje deficyt wód gruntowych, przy niewystarczającej wysokości opadów oraz nierównomiernym ich rozłożeniu w skali roku. Postępujący drenaż zlewni, osuszanie i zanik biocenozy wilgotnych, stosunkowo niewielka retencja sztuczna, postępująca urbanizacja i suburbanizacja, zwiększanie się powierzchni zabudowanej powodują dalszy spadek retencji gruntowej na rzecz spływu powierzchniowego.

W ostatnich latach oprócz susz pojawiają się też coraz częściej ekstremalne zjawiska pogodowe polegające na krótkich, lecz niezwykle intensywnych opadach atmosferycznych, dochodzących niekiedy do kilkudziesięciu milimetrów w ciągu doby. Z suszami stanowią one wielkie zagrożenie dla utrzymania wysokich i stabilnych plonów w rolnictwie, co wymaga podjęcia szybkich działań, w tym tzw. adaptacyjnych. Powinny one polegać w pierwszym rzędzie na sposobach najmniej kosztownych, w tym z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury wodno-melioracyjnej, przy zachowaniu niezwykle ważnych wymogów ochrony środowiska przyrodniczego.

W monografii przeprowadzono analizę wybranego katalogu takich sposobów, ze wskazaniem pewnych praktycznych rozwiązań technicznych możliwych do stosowania przez rolników w przestrzeni produkcyjnej Wielkopolski. Jednocześnie autorzy zdają sobie sprawę, że publikacja nie wyczerpuje wszystkich możliwości poprawy gospodarowania wodą w rolnictwie, a jest próbą naszego spojrzenia na te zagadnienia, być może w pewnych fragmentach dyskusyjnego.

Monografia adresowana jest przede wszystkim do rolników, którzy w ostatnich latach z problemami niedoboru lub nadmiaru wody w produkcji rolniczej stykają się bezpośrednio i coraz częściej. Przeznaczona jest też dla pracowników administracji publicznej, w tym urzędów wojewódzkich, marszałkowskich, starostw powiatowych, urzędów gmin, a także ośrodków doradztwa rolniczego zajmujących się gospodarowaniem wodą w rolnictwie. Może być wykorzystywana w firmach i instytucjach zajmujących się procesem projektowania, wykonawstwa i eksploatacji urządzeń melioracyjnych. Monografię można także polecić uczniom szkół średnich i studentom uczelni wyższych interesującym się problematyką gospodarowania wodą w rolnictwie i ochroną środowiska, jako literaturę uzupełniającą.

Monografia powstała w ramach działań związanych z powoływaniem Lokalnych Partnerstw ds. Wody

Literatura

- European Environment Agency (2009): Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought. Report No 2. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe/>.
- GUS (2020): Rocznik statystyczny rolnictwa. Warszawa.
- Kuchar L., Iwański S., Diakowska E., Gąsiorek E. (2015): Symulacja warunków hydrologicznych w północnej części centralnej Polski w perspektywie lat 2050-2060 dla potrzeb produkcji roślinnej i wybranych scenariuszy klimatycznych. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 319-334.
- Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P., Naylor R.L. (2008): Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319, 607- 610.
- Mekonnen M.M., Hoekstra Y.A. (2016): Four billion people facing severe water scarcity. *Am. Assoc. Adv. Sci.*, 2, 1-7.
- Nguyen T.H. (2019): Treatment and reuse of greywater for rye-grass irrigation. *Maszyn. Rozpr. dokt. Wydz. Inż. Środ. i Gosp. Przestrz. UPP, Poznań*.
- Report on the review of the European Water Scarcity and Droughts Policy, European Commission (2012): https://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm.
- Treder W., Klamkowski K., Tryngiel-Gać A. (2019): Techniczne i technologiczne możliwości oszczędzania wody do nawadniania roślin uprawnych. Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach, Skierniewice.
- Tryngiel-Gać A., Treder W. (2017): Efficiency of irrigation of highbush blueberry in Poland. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 1099-1114.
- Wada Y., Beek L.P.H., Bierkens M.F.P. (2011): Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3785-3808.
- WHO (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Excreta and greywater use in agriculture. Geneva, Switzerland.
- Woś A. (1994): Klimat Niziny Wielkopolskiej. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Żarski J., Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., Rolbiecki R., Rolbiecki S. (2013): Prognozowanie efektów nawadniania roślin na podstawie wybranych wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej. *Roczn. Ochr. Środ.*, 15, 2185-2203.
- <https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/raporty/WIELKOPOLSKIE.pdf> (strona internetowa GIOŚ, województwo wielkopolskie)

Zdolności retencyjne gleb i dynamika uwilgotnienia strefy korzeniowej w sezonie wegetacyjnym w skali pola

Michał Kozłowski

Wielkopolska to obszar charakteryzujący się intensywnym rolnictwem i jednocześnie najmniejszymi opadami w kraju, które są o 15% mniejsze od średniej dla obszaru Polski. Prawdopodobieństwo występowania susz jest również większe w tym regionie niż w innych częściach kraju. Sprawia to, że zrównoważony rozwój gospodarki rolnej tego regionu wymaga racjonalnego gospodarowania wodą środowiska glebowego. W województwie wielkopolskim 64,5% powierzchni stanowią gleby użytkowane rolniczo, spośród których 80,1% użytkowanych jest ornice (Ochrona środowiska 2020). Pod względem bonitacyjnym przeważają gleby średniej i niskiej jakości, gdzie dla gruntów ornich udział klas od IVa do VI wynosi 74%, stąd też dominują kompleksy żytne (4, 5, 6, 7) według przydatności rolniczej. Większość gleb wytworzyła się z materiałów pochodzenia lodowcowego, a pod względem typologicznym na terenach użytków ornich dominują gleby płowe, następnie gleby rdzawe i czarne ziemie (Marcinek i Komisarek 2004). Cechą charakterystyczną tego młodoglacjalnego obszaru jest występowanie sekwencji gleb płowych i czarnych ziem w warunkach zróżnicowanego reliefu. (Marcinek i Wiślańska 1984, Marcinek i Komisarek 2000, Marcinek i in. 1998, Komisarek 2000, Kozłowski i Komisarek 2016, Kozłowski i in. 2018). Na wyniesieniach dennomorenowych przeważnie występują gleby płowe, często zaciekowe i opadowo-glejowe, natomiast wraz z obniżaniem terenu wykazują one cechy oglejenia gruntowo-glejowego i stopniowo przechodzą



w czarne ziemie. To charakterystyczne i powtarzające się zróżnicowanie typologiczne gleb wynika z ich reżimu wodnego.

Woda glebowa, a właściwie roztwór glebowy, jest jednym ze składników trójfazowego układu gleby. Jej jakościowa, a przede wszystkim ilościowa charakterystyka ma szczególne znaczenie z punktu widzenia wzrostu i rozwoju roślin uprawnych. Na przykład kukurydza na wyprodukowanie 1 kg suchej masy potrzebuje około 350 dm³ wody, burak cukrowy – 400 dm³, jęczmień – 450 dm³, pszenica – 550 dm³, rzepak – 650 dm³, natomiast lucerna ponad 700 dm³ (Kuś 2016). Obserwowany w ostatnim półwieczu wzrost plonowania podstawowych roślin uprawnych niesie ze sobą zwiększenie ich potrzeb wodnych, które zależą przede wszystkim od przebiegu warunków meteorologicznych, gatunku roślin, w tym odmiany, fazy rozwojowej i wielkości roślin. W okresie wegetacyjnym rośliny korzystają przede wszystkim z wody zmagazynowanej w glebie i opadowej, która infiltrując (wsiąkając) w glebę, jest w niej retencjonowana. Również wody podsiąkowe, szczególnie na użytkach zielonych i glebach ornych obniżen terenowych stanowią istotne źródło wody dla roślin.

Zdolności retencyjne gleb

Ilość wody retencjonowanej w glebie, z której mogą korzystać rośliny, zależy od wielu właściwości fizycznych, chemicznych czy biologicznych samej gleby. Stąd też dostępność wody dla systemu korzeniowego roślin oraz jej przemieszczanie wraz z rozpuszczonymi składnikami może być znacznie zróżnicowane zarówno w obrębie danej gleby, jak i w skali pola. Zdolności retencjonowania wody przez glebę wraz z wodoprzepuszczalnością strefy nasyconej i nienasyconej (przewodność hydrauliczna gleb) ogólnie nazywane są właściwościami hydrofizycznymi (Walczak i in. 2002a, Mandal i in. 2019).

W rolnictwie podstawową charakterystyką hydrofizyczną z punktu widzenia wzrostu i rozwoju roślin jest krzywa retencyjności wodnej gleb (KWR) (ang. *soil water retention curve*). Przedstawia ona zależność pomiędzy siłami, z jakimi woda utrzymywana jest w glebie (ψ_m – potencjał macierzysty wody glebowe, wyrażony w różnych jednostkach) a wagową (w) lub objętościową zawartością wody (θ) (ryc. 1). Na podstawie krzywej wodnej retencyjności gleby określone są stany uwilgotnienia przy charakterystycznych wartościach ψ_m , nazywane stałymi wodno-glebowymi. Do podstawowych stałych wodno-glebowych należą: wilgotność trwałego wędnięcia (θ_{wtw}), połowa pojemność wodna (θ_{ppw}) i pełna pojemność wodna (θ_c) (Novák i Hlaváčiková 2019).

Wilgotność trwałego wędnięcia (θ_{wtw}) – zawartość wody w glebie, przy której rośliny trwale wędną, tracąc turgor i po przekroczeniu tego stanu nawodnienie nie jest skuteczne. Wilgotność trwałego wędnięcia charakteryzuje się wartością

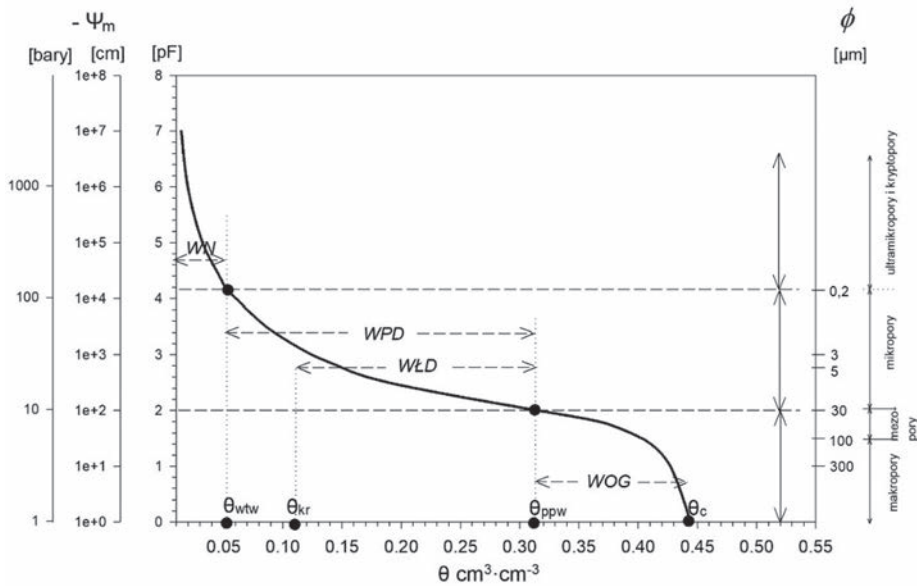
bezwzględną ψ_m wynoszącą pF 4,2 (ciśnienie równe 15 000 cm słupa wody) (ryc. 1). Jest to „najstarsza” stała wodno-glebowa (Novák i Hlaváčiková 2019), która została wyznaczona na podstawie wyników doświadczeń wazonowych. Rośliny uprawiano w idealnych warunkach; transpiracja nie była ograniczana przez wodę glebową. Na pewnym etapie ontogenezy roślin zaprzestano nawadniania. Gdy zaobserwowano objawy wędnięcia, uśredniono zawartość wody w glebie (średnią) i oznaczono jako trwały punkt wędnięcia. Wilgotność trwałego wędnięcia wyznacza dolną granicę wody dostępnej dla roślin.

Polowa pojemność wodna (θ_{ppw}) – zawartość wody w glebie po swobodnym odcieku wody grawitacyjnej z gleby uprzednio całkowicie nasyconej wodą (ilość wody jaka została w glebie po odcieku wody grawitacyjnej), przy braku oddziaływania zwierciadła wody gruntowej i przerwany parowaniu terenowym. Przy tej wilgotności woda utrzymywana jest z siłami (ψ_m) wynoszącymi około pF 2 (ciśnienie równe 100 cm wysokości słupa wody) (ryc. 1). W rzeczywistości dla wyżej zdefiniowanej polowej pojemności wodnej ψ_m wynosi od 1,9 pF w utworach gruboziarnistych do 2,1 pF w utworach drobnoziarnistych (Marcinek i in. 1997). W literaturze polowa pojemność wodna wyznaczana jest przy różnych wartościach ψ_m , gdzie zasięg ten w zależności od autora najczęściej wynosi od 1,7 do 2,5 pF (Klute 1986, Imam i in. 1999, Walczak i in. 2002b, McBratney i Minasny 2004, Brady i Weil 2008, Gnatowski i in. 2009, Kaźmierowski 2015). Różnica wartości potencjału macierzystego, przy której określana jest θ_{ppw} , wynika z jednej strony ze zróżnicowania właściwości gleb, natomiast z drugiej zarówno z niejednorodnego definiowania polowej pojemności wodnej, jak i różnych metod wyznaczania tej stałej (Marcinek i in. 1997, Berg i Driessen 2002). Polowa pojemność wodna stanowi tzw. górną granicę wody dostępnej dla roślin.

Pełna pojemność wodna (θ_c) – ilość wody w glebie, przy której wszystkie wolne przestrzenie wypełnione są wodą. Objętościowo równa jest w przybliżeniu współczynniki porowatości f_c . Jednak najczęściej stan uwilgotnienia odpowiadający pełnemu nasyceniu gleby wodą stanowi 93-97% współczynnika porowatości (Genuchten i in. 1991). Przy tej stałej wodno-glebowej ψ_m zbliżony jest do 0 pF (0 cm słupa wody) (ryc. 1).

Interpretacja KWR umożliwia między innymi wyznaczenie udziału poszczególnych form wody w danej glebie z punktu widzenia dostępności dla roślin. Częstkowa zawartość wody pomiędzy θ_{ppw} a θ_{wtw} stanowi wodę potencjalnie dostępną dla roślin (WPD), z której 2/5–2/3 stanowi wodę łatwo dostępną dla roślin (WŁD) (ryc. 1). Pozostała ilość wody (od 1/3 do 3/5) jest trudno dostępna dla roślin (WTD). Dla danej KWR punkt krytyczny pomiędzy WŁD a WTD charakteryzujący zawartość wody glebowej (θ_{kr}) lub krytyczny potencjał macierzysty wody glebowej (ψ_{mkr}), gdy dostęp wody do korzeni ogranicza produkcję biomasy, można ogólnie obliczyć następująco (Kutlík 1978, Novák i Hlaváčiková 2019):

$$\theta_{kr} = \theta_{wtw} + 0,6(\theta_{ppw} - \theta_{wtw}).$$



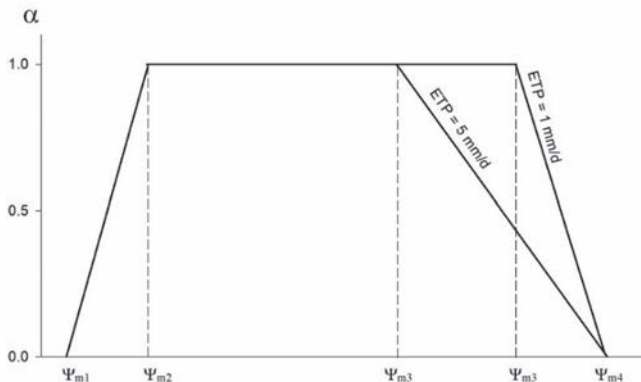
Ryc. 1. Krzywa wodnej retencyjności

Wielkość siły działającej na wodę w glebie zależy od wielkości porów, w których się ona znajduje (Kaźmierowski 2015). Stąd zarówno wartości poszczególnych stałych wodno-glebowych, jak i zakresy danych form wody glebowej ściśle zależą od rozkładu porów glebowych. Istnieje wiele różnych klasyfikacji porów glebowych pod względem średnicy (Kaźmierowski 2015). W uproszczonym podziale pory glebowe o średnicach większych od 100 μm , nazywane makroporami, występują głównie pomiędzy agregatami glebowymi (Or i Tuller 2003). Siła ssąca gleby w nich jest znacznie mniejsza niż siła ciężkości, dlatego następuje odpływ grawitacyjny wody. Mniejsze pory glebowe o średnicach w zakresie 30-100 μm nazywane są mezoporami (Or i Tuller 2003, Kutilek 2004). Tymi porami również następuje odciek grawitacyjny wody, jednak znacznie wolniejszy niż w przypadku makroporów. Drobniejsze pory w zakresie średnic 30-0,1 μm , nazywane są mikroporami, natomiast te o średnicy większej od 0,1 μm ultramikroporami i dalej kryptoporami (Brady i Weil 2008). Objętość makro- i mezoporów stanowi tzw. pojemność drenażową, ponieważ z jednej strony charakteryzuje ilość porów, którymi nadmiar wody może zostać odprowadzony poza glebę, natomiast z drugiej decyduje o dopływie powietrza do strefy korzenia się roślin. Na znajdującą się w mikroporach wodę działa również siła grawitacji, jednak jest ona mniejsza lub równa sile ssącej gleby. Dlatego też w mikroporach woda jest retencjonowana (stanowi wodę potencjalnie dostępną dla roślin), natomiast w makro- i mezoporach odpływa grawitacyjnie.

Kształt KWR, a tym samym zdolności retencyjne gleb uzależnione są od wielu właściwości gleb. Dolny odcinek KWR związany jest głównie ze strukturą, gęstością

objętościową, porowatością gleby oraz zawartością materii organicznej, środkowy – ze składem granulometrycznym i zawartością materii organicznej, natomiast górny z zawartością i składem mineralogicznym frakcji ilowej, która bezpośrednio determinuje powierzchnię właściwą (Klute 1986, Marcinek i in. 1999, Kaźmierowski 2015). Stopień zagęszczenia gleby wpływa na zdolności retencyjne ze względu na wpływ gęstości na rozkład wielkości porów glebowych (Marcinek i in. 1999). Z kolei struktura gleby wpływa na zdolności retencyjne, a także na warunki przepływu i dostępności wody, głównie przy potencjale matrycowym (ψ_m) w zakresie 0-1000 cm (Brady i Weil 2008).

Przedstawiony podział wody pod względem dostępności dla roślin ma charakter umowny. W rzeczywistości woda, która utrzymywana jest w glebie z określonymi siłami, może być dla jednej rośliny łatwo dostępna, natomiast dla drugiej trudno dostępna. Dostępność wody dla roślin jest cechą gatunkową, czy odmianową danej rośliny. Ponadto w zależności od transpiracji potencjalnej ograniczenia poboru wody przez korzenie roślin mogą pojawić się wcześniej lub później. Na rycinie 2 przedstawiono zależność współczynnika α od ψ_m . Współczynnik α wyraża dostępność wody w skali od 0 do 1. Wartość 0 oznacza brak poboru wody przez korzenie roślin, natomiast 1 optymalne warunki wilgotnościowe. Symbol ψ_{m1} wyraża siłę ssącą gleby, przy której następuje początek pobierania wody przez rośliny (tzw. granica anaerobizny dla danej rośliny). Optymalne warunki wilgotnościowe pojawiają się przy ψ_{m2} . Pomiędzy ψ_{m2} a ψ_{m3} występują optymalne warunki wilgotnościowe, natomiast wzrost bezwzględnej wartości ψ_m powyżej ψ_{m3} powoduje ograniczenie dostępności wody dla roślin (woda trudno dostępna). ψ_{m4} wyznacza stan wilgotności trwałego wędnięcia. Intensywność transpiracji danej rośliny także determinuje wartość ψ_{m3} , bowiem przy małej ewapotranspiracji potencjalnej (ETP), woda która



Ryc. 2. Zależność współczynnika α od ψ_m : ψ_{m1} – granica anaerobizny, ψ_{m2} – ψ_{m3} – zakres wartości siły ssącej gleby wyznaczające optymalne warunki wilgotnościowe, ψ_{m4} – siła ssąca wyznaczająca punkt trwałego wędnięcia (Feddes i in. 1997)

Tabela 1

Charakterystyczne bezwzględne wartości potencjału macierzystego wody glebowej (cm i pF) dla różnych roślin (Feddes i in. 1997)

Roślina	Ψ_{m1}	Ψ_{m2}	Ψ_{m3} dla ETP = 5 mm/d	Ψ_{m3} dla ETP = 1 mm/d	Ψ_{m4}
	cm (pF)				
Ziemniaki	10 (1,0)	25 (1,4)	320 (2,5)	600 (2,8)	16 000 (4,2)
Buraki cukrowe	10 (1,0)	25 (1,4)	320 (2,5)	600 (2,8)	16 000 (4,2)
Pszenica	0 (0,0)	1 (0,0)	500 (2,7)	900 (3,0)	16 000 (4,2)
Trawy łąkowe	10 (1,0)	25 (1,4)	200 (2,3)	800 (2,9)	800 (2,9)
Kukurydza	15 (1,2)	30 (1,5)	325 (2,5)	600 (2,8)	800 (2,9)

utrzymywana jest z daną siłą Ψ_{m3} stanowi jeszcze optymalne uwilgotnienie, natomiast w przypadku intensywnej transpiracji może być już wodą trudno dostępną dla roślin (tab. 1).

W obrębie danego pola gleby mogą różnić nie tylko pod względem typologicznym, ale również wieloma właściwościami, w tym zdolnościami retencyjnymi. W tabeli 2 przedstawiono stałe wodno-glebowe charakterystycznych gleb uprawnych wraz z podstawowymi parametrami do empirycznego równania van Genuchtena (1980) opisującego krzywe wodnej retencyjności:

$$\theta = \theta_r + (\theta_c - \theta_r) \cdot \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot \Psi)^n]^m}$$

gdzie: θ_r – resztkowa (residualna) zawartość wody w glebie ($m^3 \cdot m^{-3}$) definiowana jako $\partial\theta/\partial h \approx 0$,

θ_c – zawartość wody w stanie pełnego nasycenia, która najczęściej stanowi 93–97% współczynnika porowatości ogólnej ($m^3 \cdot m^{-3}$) (van Genuchten i in. 1991),

α – empiryczna stała równania w przybliżeniu równa potencjałowi odwrotności wejścia powietrza do gleby (cm^{-1}),

ψ – siła ssąca gleby (cm),

n – stała empiryczna kształtu krzywej,

$m = 1 - 1/n$.

Generalnie gleby płowe charakteryzują się wyraźnie mniejszymi zdolnościami retencjonowania wody przy θ_{ppw} , θ_{wtw} jak i WDP, szczególnie w poziomach uprawnych, w porównaniu z czarnymi ziemiami obniżen terenowych. Przeważnie spiaszczone poziomy Ap i Et gleb pławych charakteryzują się małymi zawartościami

wody zarówno przy θ_{ppw} (0,185-0,247 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), jak i θ_{wtw} (0,038-0,071 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). W iluwialnym endopedonie argik (Bt) wartości θ_{ppw} (0,0223-0,296 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), θ_{wtw} (0,081-0,131 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) i WDP (0,132-0,179 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) są wyraźnie większe niż w wyżej zalegających poziomach, co związane jest ze zwiększoną zawartością frakcji ilastej oraz trwałą strukturą foremnowielościenną angularną i/lub subangularną. Zwiększona zawartość materii organicznej oraz trwałą strukturą gruzełkowa poziomu mollik czarnych ziem (poziomy A) zadecydowały o dużych zdolnościach retencyjnych tego poziomu. Ilości wody w tym epipedonie przy θ_{ppw} wynoszą od 0,261 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ do 0,353 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, przy θ_{wtw} od 0,061 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ do 0,111 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, natomiast ilość wody potencjalnie dostępnej dla roślin waha się przeważnie w przedziale 0,185-0,273 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. W poniżej zalegających ednopedonach ilości te wahają się od 0,211 do 0,320 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ przy θ_{ppw} oraz od 0,061 do 0,126 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ przy θ_{wtw} .

Większe zdolności retencyjne czarnych ziem w porównaniu z glebami płowymi związane są przede wszystkim z większą zawartością węgla organicznego (C_{org}), który korzystnie wpływa na szereg innych właściwości gleb, w tym na ich strukturę. Z badań przeprowadzonych przez Kozłowskiego (2007) wynika, że materia organiczna dodatnio wpływa na zawartość wody w glebie przy pełnym nasyceniu, polowej pojemności wodnej oraz wilgotności trwałego więdnięcia. Gdyby zwiększyć zawartość materii organicznej w 30-centymetrowej warstwie uprawnej o 1%, to wzrost retencji wody dostępnej dla roślin w tej miąższości wyniósłby około 11 mm. Jest to wartość porównywalna z podawaną przez Kędziore i in. (2005).

Retencja wody w glebie (R)

Zdolność gleby do magazynowania w profilu (lub w danej miąższości) określonej ilości wody ogólnie nazywa się retencją wodną gleb. Wielkość retencji określana jest przez ilość wody magazynowanej w warstwie czynnej gleby (zwykle strefa korzenienia się roślin). Ilościowo retencję wody w glebie wyraża się w milimetrach słupa wody jako iloczyn wilgotności objętościowej i miąższości wyrażonej również w milimetrach:

$$R = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot Z_i [\text{mm}]$$

gdzie: θ_i – wilgotność objętościowa w i-tym poziomie ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$),

Z_i – miąższość i-tego poziomu (lub warstwy) (mm).

W praktyce do oceny zdolności retencyjnych, na przykład strefy korzenienia się roślin, stosowane są wielkości opisujące charakterystyczne stany retencji. Stan retencji wodnej to ilość wody zgromadzona w profilu glebowym (lub danej miąższości) odpowiadająca określonej wilgotności charakterystycznej, na przykład R_{ppw} – stan

Tabela 2

Zdolności retencyjne przykładowych gleb pływowych wnieśli terenowych (P1, Ga3, BOR1, PAK1)

Poziom glebowy	Głębokość (cm)	Procentowa zawartość frakcji o średnicy (mm)		
		2,00-0,05	0,05-0,002	<0,002
P1 – Gleba płowa opadowo-glejowa zaciekowa (okolice miejscowości Przybroda)				
Ap	0-28	76	18	6
E1t	28-41	74	20	6
E2tg	41-50	72	21	7
E/B	50-60	65	23	12
B1tg	60-72	60	23	17
B2t	72-99	60	21	19
B3t	99-108	62	20	18
C1k	108-130	65	20	15
P6 – Czarna ziemia typowa (okolice miejscowości Przybroda)				
Ap	0-30	55	36	9
A2	30-53	40	47	13
A3	53-68	52	38	10
2Gk	68-84	30	50	20
3G2k	84-95	12	52	36
3G3k	95-120	7	55	38
Ga3 – Gleba płowa opadowo-glejowa zaciekowa (okolice miejscowości Granowo)				
Ap	0-25	77	15	8
E1tg	25-34	76	16	8
E/B	34-46	67	20	13
B/E	46-55	64	17	19
B1t	55-88	62	15	23
B2t	88-107	60	17	23
Ga1 – Czarna ziemia wylugowana (okolice miejscowości Granowo)				
Ap	0-24	73	24	3
A2	24-36	64	33	3
A3	36-42	72	26	2
A4	42-51	82	15	3
2AC	51-60	71	18	11
2G1	60-78	67	19	14
2G2	78-120	66	20	14
BOR 1 – Gleba płowa zaciekowa (okolice miejscowości Borowo)				
Ap	0-28	82	14	4
AE	28-35	81	14	5
E/B	35-41	67	17	16
B/E	41-53	64	17	19
Bt	53-83	62	17	21
Ck	83-120	66	21	13
BOR 2 – Czarna ziemia zbrunatniała (okolice miejscowości Borowo)				
Ap	0-29	70	21	9
A2k	29-40	72	18	10
A/B	40-47	72	16	12
Bwg	47-60	67	21	12
G1k	60-90	67	22	11
G2k	90-120	68	21	11
PAK 1 – Gleba płowa zerodowana (okolice miejscowości Pakosław)				
Ap	0-32	71	21	8
E/B	32-46	62	22	16
B1t	46-65	63	21	16
B2t	65-85	43	36	21
B3t	85-105	39	38	23
Ck	105-130	51	31	18
PAK 2 – Czarna ziemia typowa (okolice miejscowości Pakosław)				
Ap	0-30	57	40	3
A2k	30-36	57	39	4
2G1k	36-55	56	31	13
2G2k	55-65	59	28	13
3G3k	65-100	39	43	18

i czarnych ziem obniżen terenowych (P6, Ga1, BOR2, PAK2) Niziny Wielkopolskiej

Grupa granulometryczna	Corg	θ_c	θ_{ppw}	θ_{wtw}	WPD $\theta_{ppw} - \theta_{wtw}$	α	n
PTG po 2008	%	$cm^3 \cdot cm^{-3}$				-	-
pg	0,80	0,361	0,218	0,046	0,172	0,04690	1,31767
gp	0,45	0,335	0,220	0,071	0,149	0,05760	1,22822
gp	0,29	0,325	0,198	0,047	0,151	0,05116	1,29827
gp	0,28	0,34	0,253	0,096	0,157	0,03980	1,19445
gl	0,30	0,336	0,263	0,094	0,169	0,02191	1,23110
gl	0,23	0,334	0,288	0,110	0,178	0,01198	1,23028
gl	0,17	0,312	0,241	0,099	0,142	0,02755	1,20699
gp	0,08	0,304	0,227	0,100	0,127	0,02936	1,22014
gl	5,50	0,441	0,319	0,111	0,207	0,03822	1,2171
gz	3,39	0,456	0,320	0,110	0,220	0,04519	1,2179
gl	1,34	0,422	0,312	0,108	0,206	0,03321	1,2195
gz	0,34	0,368	0,293	0,103	0,191	0,02123	1,2211
gpyi	0,06	0,383	0,306	0,110	0,195	0,02126	1,2163
gpyi	-	0,398	0,320	0,118	0,200	0,02128	1,2115
pg	0,86	0,368	0,207	0,046	0,161	0,04687	1,35279
pg	0,21	0,326	0,185	0,038	0,147	0,04454	1,35687
gp	0,20	0,321	0,209	0,051	0,158	0,03900	1,28919
gl	0,41	0,323	0,218	0,077	0,141	0,04816	1,23418
gpi	0,34	0,317	0,246	0,114	0,132	0,04301	1,15808
gpi	0,42	0,303	0,223	0,081	0,143	0,03802	1,20736
pg	3,54	0,449	0,34	0,099	0,241	0,02276	1,25933
pg	3,10	0,462	0,353	0,080	0,273	0,01748	1,31501
pg	4,43	0,439	0,311	0,074	0,237	0,02583	1,29845
pg	2,20	0,437	0,262	0,068	0,194	0,04652	1,31431
gp	0,24	0,329	0,211	0,059	0,152	0,04485	1,27724
gp	0,08	0,309	0,217	0,078	0,139	0,04310	1,22224
gp	0,38	0,292	0,211	0,061	0,140	0,03081	1,24804
pg	0,74	0,345	0,235	0,039	0,196	0,0226	1,3743
pg	0,42	0,320	0,215	0,041	0,175	0,0264	1,3443
gp	0,16	0,294	0,205	0,092	0,114	0,0842	1,1629
gl	0,23	0,307	0,248	0,116	0,132	0,0311	1,1581
gpi	0,24	0,325	0,280	0,131	0,150	0,0171	1,1644
gp	0,12	0,305	0,261	0,086	0,175	0,0115	1,2454
gp	1,69	0,373	0,274	0,072	0,202	0,0244	1,2783
gp	1,58	0,325	0,261	0,075	0,185	0,0163	1,2660
gp	0,56	0,302	0,233	0,074	0,159	0,023	1,2409
gp	0,29	0,330	0,235	0,085	0,150	0,0453	1,2085
gp	0,20	0,292	0,233	0,089	0,143	0,024	1,2010
gp	0,12	0,276	0,227	0,088	0,139	0,0196	1,2009
gp	1,00	0,340	0,247	0,060	0,187	0,0237	1,2957
gl	0,30	0,322	0,249	0,100	0,149	0,0324	1,1892
gl	0,31	0,315	0,265	0,113	0,152	0,0188	1,1810
gz	0,30	0,337	0,297	0,118	0,179	0,0106	1,2067
gz	0,18	0,344	0,296	0,123	0,173	0,0145	1,1908
gz	0,10	0,328	0,258	0,103	0,155	0,0284	1,1915
gdrp	2,67	0,463	0,331	0,103	0,228	0,0293	1,2409
gdrp	2,62	0,422	0,310	0,073	0,237	0,0273	1,3007
gl	0,56	0,334	0,292	0,105	0,187	0,0229	1,2153
gl	0,29	0,359	0,280	0,091	0,189	0,0262	1,2336
gz	0,05	0,332	0,277	0,126	0,151	0,0226	1,1659

retencji przy polowej pojemności wodnej, R_{wtw} – stan retencji przy wilgotności trwałego wędnięcia. Na podstawie znajomości ilości wody retencionowanej w określonej miąższości przy tych charakterystycznych stałych wodno-glebowych można obliczyć, ile dana warstwa obliczeniowa, na przykład strefa korzeniowa, retencionuje wody potencjalnie dostępnej dla roślin ($R_p = R_{ppw} - R_{wtw}$), wody łatwo dostępnej dla roślin ($R_u = 2/3R_p$) i inne wielkości. Również z praktycznego punktu widzenia, na przykład dla strefy korzeniowej, można obliczyć stan retencji przy wilgotności krytycznej, która stanowi granicę pomiędzy wodą łatwo dostępną a trudno dostępną dla roślin ($R_{kr} = R_{wtw} + 1/3(R_{ppw} - R_{wtw})$). W tabeli 3 przedstawiono stany retencji R_{ppw} , R_{wtw} , R_p i R_{kr} w 50-centymetrowej miąższości gleb pływch wnieśien dennomorenowych i czarnych ziem obniżeń terenowych. Zamieszczone dane wyraźnie wskazują na większe zdolności retencyjne czarnych ziem w porównaniu z glebami pływymi. W 50-centymetrowej miąższości analizowanych gleb pływch retencja wody

Tabela 3

Retencja przykładowych gleb pływch wnieśien terenowych (P1, Ga3, BOR1, PAK1) i czarnych ziem obniżeń terenowych (P6, Ga1, BOR2, PAK2) Niziny Wielkopolskiej w 50 centymetrowej miąższości

Profil	R_{ppw}	R_{wtw}	R_p	R_{kr}
	mm			
P1 – gleba płowa opadowo-glejowa zaciekowa (okolice miejscowości Przybroda)	107	26	81	53
P6 – czarna ziemia typowa (okolice miejscowości Przybroda)	160	55	104	90
Ga3 – gleba płowa opadowo-glejowa zaciekowa (okolice miejscowości Granowo)	102	24	78	50
Ga1 – czarna ziemia wylugowana (okolice miejscowości Granowo)	164	43	120	83
BOR1 – gleba płowa zaciekowa (okolice miejscowości Borowo)	115	30	86	58
BOR2 – czarna ziemia zbrunatniała (okolice miejscowości Borowo)	132	37	95	68
PAK1 – gleba płowa zerodowana (okolice miejscowości Pakosław)	125	38	87	67
PAK2 – czarna ziemia typowa (okolice miejscowości Pakosław)	159	50	109	86

potencjalnie dostępnej dla roślin wynosi średnio 83 mm, natomiast w czarnych ziemiach jest ona większa o około 29% i wynosi 107 mm. W tabeli 3 znajdują się również obliczone stany retencji przy wilgotności krytycznej, stanowiącej tradycyjnie wyznaczaną granicę pomiędzy wodą łatwo a trudno dostępną dla roślin. Jeżeli obliczone, na podstawie monitoringu wilgotności gleb, wartości retencji aktualnej (R_a) maleją i zbliżają się do R_{kr} , a prognoza warunków meteorologicznych nie przewiduje opadów, to można spodziewać się wystąpienia niedoborów wody łatwo dostępnej

dla roślin ($R_a < R_{kr}$), które mogą spowodować obniżkę plonów. Ponadto stany retencji wodnej gleb dla strefy korzeniowej roślin stanowią podstawę obliczenia polewowej dawki netto. Należy jednak pamiętać, aby efektywna dawka polewowa była precyzyjnie obliczona w stosunku do właściwości hydrofizycznych gleb występujących w skali pola. Bowiem doprowadzenie do strefy korzeniowej gleb większej ilości wody niż ta, która wynika z obliczeń, nie spowoduje dalszego wzrostu wilgotności (powyżej θ_{ppw}), tylko jej perkolację (przesiąkanie) poza strefę korzeniową, co nie jest uzasadnione ekonomicznie. Również wiele składników odżywczych, zwłaszcza tych łatwowymywanych, zostanie przemieszczona poza strefę korzeniową roślin. Dlatego precyzyjne sterowanie nawodnieniami w skali pola powinno być oparte na parametryzacji podstawowych hydrofizycznych właściwości gleb.

Oznaczanie krzywej wodnej retencyjności (KWR)

Krzywą wodną retencyjności uważa się za trudno mierzalną charakterystykę gleby, bowiem jej oznaczenie jest czasochłonne i wymaga użycia specjalistycznej oraz drogiej aparatury (Walczak i in. 2002a, Botula i in. 2014). Istnieje wiele bezpośrednich i pośrednich metod oznaczenia KWR (Rashid i in. 2015).

Oznaczenia bezpośrednie można przeprowadzić w laboratorium w pobranych próbkach glebowych o strukturze nienaruszonej lub in situ przy użyciu specjalistycznej aparatury (Le Bourgeois i in. 2016). Przeważnie jest ona wyznaczana przez desorpcję wody z próbki glebowej uprzednio całkowicie nawilżonej wodą, przy odpowiednim nadciśnieniu (metody nadciśnieniowe) lub podciśnieniu (metody podciśnieniowe). Najczęściej KWR uzyskuje się bezpośrednio w badaniach laboratoryjnych z użyciem płyt piaskowych, piaskowo-kaolinitowych, komór wysoko- i niskociśnieniowych Richardsa, metody ekstraktorowej i wirówkowej (Klute 1986). Pomiary z infiltrometrem dyskowym są najczęściej stosowane w terenie do oznaczenia KWR (Ramos i in. 2006, Verbis i in. 2009, Rashid i in. 2015). Również zainstalowane w terenie sondy do śledzenia dynamiki wilgotności gleby i potencjału macierzystego wody glebowej mogą być wykorzystane do uzyskania KWR (Degré i in. 2017).

Zarówno metody laboratoryjne, jak i terenowe oznaczenia KWR mają swoje zalety i ograniczenia. Pomiary terenowe mogą zminimalizować zakłócenia spowodowane poborem próbek gleby o nienaruszonej (naturalnej) strukturze, podczas gdy metody laboratoryjne mogą oznaczyć KWR w większym zakresie ciśnień (Asgarza-deh i in. 2014). Bezpośrednie metody oznaczania KWR są czasochłonne i kosztowne (Botula i in. 2014), dlatego istniejące zbiory danych KWR, które mogłyby być powszechnie stosowane, są nieliczne i rozproszone. Znajdują się one głównie w poszczególnych placówkach naukowych jako wyniki prowadzonych tam badań (Walczak i in. 2002a). Ponadto nie obejmują wszystkich gleb intensywnie użytkowanych na terenie Niżu Polskiego. Nawet w obrębie danej jednostki taksonomicznej

gleby o tej samej grupie granulometrycznej mogą znacząco różnić się zdolnościami retencyjnymi strefy korzeniowej roślin. Duży zbiór danych pomiarowych dotyczących KWR przedstawili Walczak i in. (2002a, b) na podstawie 290 profili glebach reprezentujących różne jednostki taksonomiczne gleb Polski. Na podstawie tego zbioru danych autorzy przedstawili zdolności retencyjne dla 25 „zgeneralizowanych jednostek glebowych” najczęściej występujących w uprawach ornych oraz przestrzenne ich zróżnicowanie w skali 1: 1 500 000.

Z uwagi na wyżej wymienione wady bezpośredniego oznaczania KWR od wielu lat rozwijają się metody pośrednie szacowania właściwości hydrofizycznych gleb, nazywane „funkcjami pedotransferu” (ang. *pedotransfer function* – PTF; Bouma 1989). Stanowią one zależności pomiędzy parametrami KWR a łatwo i rutynowo oznaczanymi właściwościami gleb takimi jak skład granulometryczny (w tym zawartość poszczególnych frakcji granulometrycznych), gęstość objętościowa, zawartość węgla organicznego i innymi (Wang i in. 2016). Pozwalają w szybki sposób oszacować zdolności retencyjne gleb na podstawie znajomości podstawowych właściwości gleb. Jednak wiarygodność zastosowania PTF wymaga ich walidacji dla różnych regionów (Werisch i in. 2014).

Obszerny przegląd różnych PTF do wyznaczania KWR w glebach Niżu Polskiego przedstawił Kaźmierowski (2015). Zaproponowane funkcje PTF przez autora do oszacowania KWR i tym samym zdolności retencyjnych gleb dają wysoką zgodność z danymi pomiarowymi, gdy znana jest zawartość węgla organicznego w glebie, gęstość objętościowa, zawartość frakcji piaskowej, pyłowej i ilowej. Niestety, dla poszczególnych konturów na mapach glebowo-rolniczych (1:25 000, 1:100 000) pochodzących w drugiej połowie XX wieku, czy mapach glebowych (1:300 000) nie ma danych pomiarowych zdolności retencyjnych, jak również podstawowych właściwości, które można wykorzystać w funkcjach PTF do oszacowania KWR. Stąd też, ogólna ocena zdolności retencyjnych gleb, na przykład na potrzeby systemu monitoringu suszy rolniczej czy rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 23 kwietnia 2019 r. w sprawie wartości klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin uprawnych i gleb (Dz. U. 2019 poz. 732), odbywa się na podstawie wartości podanych przez Ślusarczyka (1979), które przypisane są do poszczególnych grup granulometrycznych i następnie obliczane dla gatunków gleb będących integralną częścią treści mapy glebowo-rolniczej. W tabeli 4 przedstawiono zdolności retencyjne gleb według Ślusarczyka (1979) dla grup granulometrycznych wyróżnianych na mapach glebowo-rolniczych.

Z kolei Kozłowski i Komisarek (2017), wykorzystując PTF programu ROSETTA (Schaap i in. 2001) i uwzględniając zawartość glebowego węgla organicznego oraz gęstość objętościową, oszacowali zdolności retencyjne dla 5151 przypadków gleb o różnej zawartości frakcji piaskowej, pyłowej i ilowej. Średnie wartości zdolności retencyjnych wraz z zakresem dla grup granulometrycznych wyróżnianych od 2008 roku przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (PTG) przedstawia tabela 5.

Tabela 4

Podstawowe zdolności retencyjne gleb w zależności od grupy granulometrycznej (Ślusarczyk 1979)

Grupa granulometryczna*	θ_{ppw}	θ_{wtw}	WPD
	cm ³ ·cm ⁻³		
pl	0,110	0,018	0,092
ps	0,145	0,028	0,117
pgl	0,175	0,037	0,138
pgm	0,210	0,055	0,155
gl	0,270	0,085	0,185
gś	0,320	0,120	0,200
gć	0,400	0,160	0,240
ił	0,460	0,240	0,220
plz	0,300	0,100	0,200
phi	0,360	0,116	0,244

* Symbole podstawowych grup granulometrycznych wyróżnianych przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze do 2008 r.

Tabela 5

Podstawowe zdolności retencyjne gleb różnych grup granulometrycznych (minimum-maksimum i średnia) (Kozłowski i Komisarek 2017)

Grupa granulometryczna*	θ_{ppw}	θ_{wtw}	WPD
	cm ³ ·cm ⁻³		
pl	0,059 – 0,085 0,067	0,043 – 0,056 0,051	0,006 – 0,029 0,017
ps	0,071 – 0,141 0,096	0,039 – 0,059 0,049	0,028 – 0,081 0,046
pg	0,093 – 0,203 0,148	0,035 – 0,066 0,047	0,053 – 0,137 0,101
gP	0,177 – 0,283 0,228	0,041 – 0,095 0,062	0,130 – 0,223 0,165
gl	0,228 – 0,289 0,263	0,060 – 0,095 0,076	0,168 – 0,200 0,186
gpi	0,255 – 0,320 0,297	0,089 – 0,165 0,125	0,143 – 0,199 0,172
gz	0,262 – 0,352 0,309	0,061 – 0,110 0,084	0,199 – 0,253 0,225
gi	0,312 – 0,358 0,333	0,103 – 0,166 0,126	0,159 – 0,255 0,207
gpyi	0,351 – 0,405 0,375	0,103 – 0,135 0,120	0,217 – 0,291 0,255
pyz	0,355 – 0,425 0,401	0,059 – 0,093 0,076	0,296 – 0,341 0,325
pyg	0,245 – 0,402 0,329	0,052 – 0,084 0,063	0,192 – 0,317 0,266
pyi	0,316 – 0,423 0,377	0,070 – 0,113 0,090	0,246 – 0,329 0,286
ip	0,309 – 0,328 0,321	0,150 – 0,207 0,182	0,120 – 0,171 0,139
ipy	0,352 – 0,387 0,369	0,135 – 0,177 0,150	0,193 – 0,249 0,219
iż	0,325 – 0,369 0,341	0,137 – 0,208 0,177	0,120 – 0,213 0,164
ic	0,323 – 0,368 0,340	0,181 – 0,208 0,202	0,120 – 0,187 0,138

* Symbole podstawowych grup granulometrycznych wyróżnianych przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze od 2008 r.

Podział mineralnych utworów glebowych na grupy granulometryczne stosowany przez PTG od 2008 roku (PTG 2009) różni się od tego, który obowiązywał do czasu jego wprowadzenia. Przybliżone odpowiedniki grup granulometrycznych pomiędzy obecną klasyfikacją utworów mineralnych a tą starszą przedstawiono w „Rocznikach Gleboznawczych” (2009, 60(2), s. 5-16).

Dynamika uwilgotnienia gleb

Zrozumienie i przewidywanie dynamiki wody glebowej, w tym niedoborów wody, stanowi nie tylko punkt wyjścia szczegółowego rozpoznania procesów pedogenetycznych, gdzie geneza gleb wiąże się bezpośrednio ze zróżnicowaniem i sprzężeniem procesów glebotwórczych (Marcinek i Wiślańska 1984, Marcinek i in. 1994, 1998, Komisarek 2000, Komisarek 2008, Komisarek i in. 2008, Kozłowski i Komisarek 2011), lecz także ma istotne, praktyczne znaczenie dla optymalizacji produkcji roślinnej oraz ochrony i kształtowania zasobów wodnych i glebowych (Bouma 1989, Marcinek 1990, Rao 1998, Komisarek 2008, Kozłowski i Komisarek 2011). Zagadnienie to jest szczególnie ważne dla obszaru środkowej Wielkopolski, który z jednej strony charakteryzuje się intensywnym rolnictwem, z drugiej zaś najmniejszymi opadami w kraju, małym współczynnikiem odpływu oraz dużym prawdopodobieństwem występowania okresów posusznych w okresie wegetacyjnym (Kędziora i in. 2005, Przybyła i Tymczuk 2005, Kowalczak 2001). Sprawia to, że zrównoważony rozwój gospodarki rolnej regionu o intensywnym rolnictwie wymaga racjonalnego gospodarowania wodą glebową. Z punktu widzenia produkcji roślinnej woda glebowa odgrywa ważną rolę, jest bowiem czynnikiem limitującym wzrost i rozwój roślin. Stąd też istotne jest śledzenie zmian jej zawartości w strefie korzeniowej, zwłaszcza że znajomość uwilgotnienia gleb na tle ich zdolności rencyjnych jest cenną informacją wykorzystywaną w systemach wspierania decyzji o nawodnieniach czy odwodnieniach i jednocześnie czynnikiem pozwalającym na optymalizację gospodarowania wodą w skali pola. Wśród wielu metod pomiaru zawartości wody do najczęściej stosowanych należą: grawimetryczna, elektromagnetyczna, neutronowa i tensjometryczna.

Metoda grawimetryczna, nazywana także „suszarkowo-wagową”, polega na określeniu różnicy pomiędzy masą próbki gleby wilgotnej i wysuszonej w temperaturze 105°C. Jest to podstawowa metoda pomiaru wilgotności gleby i służy jako punkt odniesienia przy kalibracji urządzeń stosowanych w innych metodach. Pomimo dużej dokładności pomiaru wilgotności gleby metoda nie może być stosowana w automatycznych systemach akwizycji danych. Ponadto nie zapewnia stacjonarności pomiaru, bowiem próbka raz pobrana z gleby już w niej nie istnieje.

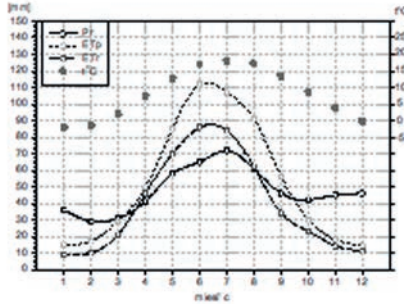
Metody elektromagnetyczne polegają na określeniu zależności pomiędzy elektrycznymi właściwościami gleby a ilością wody w glebie. Obecnie

powszechnie stosowane są metody TDR (ang. *Time Domain Reflectometry*) i FDR (ang. *Frequency Domain Reflectometry*), które bazują na pomiarze reflektometrycznym sygnału elektrycznego przeprowadzonym w domenie czasu (TDR) lub pomiarze odbicia impulsu elektromagnetycznego przeprowadzonego w domenie częstotliwości (FDR) w badanym ośrodku. Pomiarzy te zależą od stałej dielektrycznej danego ośrodka, która jest funkcją struktury molekularnej tego ośrodka. Woda ma względną stałą dielektryczną wynoszącą około 81, która jest znacznie większa od względnej stałej dielektrycznej fazy stałej gleby (około 3-8) i powietrza glebowego (około 1). Zawartość wody istotnie modyfikuje stałą dielektryczną gleby, co pozwala na pośrednie określenie wilgotności gleb. Omawiane metody są obecnie powszechnie stosowane w badaniach hydropedologicznych. Zapewniają stacjonarność pomiarów i pełną ich automatyzację, jednak pomiar sensorem TDR i/lub FDR powinien być skalibrowany dla każdego stanowiska pomiarowego.

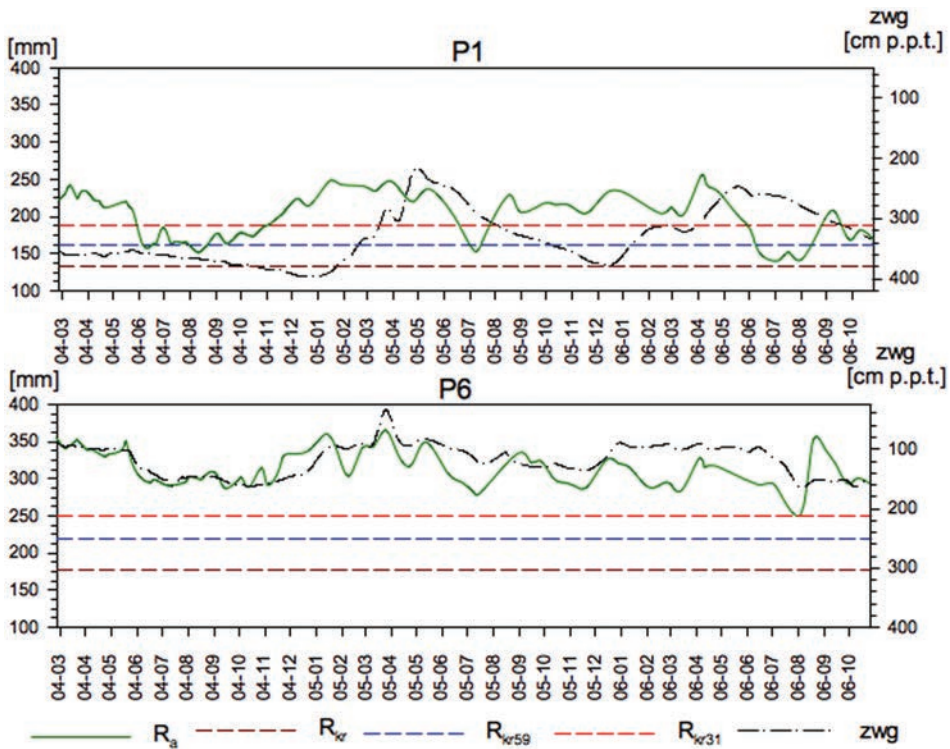
Metody neutronowe, nazywane także radiometrycznymi, opierają się na założeniu, że wodór jest jedynym pierwiastkiem zwalniającym prędkość szybkich neutronów. Wysyłane neutrony przez umieszczone w glebie radioaktywne źródło zderzają się z znajdującymi się w glebie atomami wodoru i ulegają spowolnieniu. Liczba takich zderzeń jest proporcjonalna do liczby tych atomów wodoru, a tym samym do wilgotności gleby.

Metody tensjometryczne polegają na pośrednim pomiarze uwilgotnienia gleb za pomocą tensjometrów. Tensjometry pozwalają mierzyć siłę ssącą, z reguły w zakresie 0-100 kPa. Skalowanie siły ssącej gleby na wilgotność można przeprowadzić na podstawie krzywej wodnej retencyjności. Podstawowym elementem tensjometru jest porowate naczynko przepuszczalne dla wody, a nieprzepuszczalne dla powietrza (przeważnie w zakresie 0 – 100 kPa), połączone z manometrem. Całkowicie wysycone wodą naczynko umieszcza się w glebie na określonej głębokości. W zależności od wielkości siły ssącej gleby woda częściowo przechodzi z naczynka do gleby, wytwarzając podciśnienie. Jego wartość mierzona na manometrze odpowiada określonej sile ssącej gleby (ψ_m).

Liczne badanie prowadzone od ponad 30 lat na terenie Niziny Wielkopolskiej nad dynamiką uwilgotnienia gleb uprawnych wskazują na cykliczność zmian zawartości wody glebowej obejmującą ich przesuszanie w okresie wegetacyjnym oraz jesienno-wiosenne nawilżanie (Marcinek i in. 1991, 1994, Spychalski 1998, Marcinek i Komisarek 2000, Komisarek 2000, Komisarek i Kozłowski 2005, Kozłowski 2007, Komisarek i in. 2008, Kozłowski i Komisarek 2011, 2013, 2014, Kozłowski i in. 2011). Cykliczność ta związana jest głównie z zależnością pomiędzy opadem (Ps) a ewapotranspiracją rzeczywistą (ETr) (ryc. 3). Przewaga Ps nad ETr prowadzi do nawilżania gleb, natomiast gdy $Ps < ETr$, następuje wykorzystanie wody glebowej przez rośliny i jej ewaporację, co prowadzi do przesuszania gleb i występowania niedoborów wody.



Ryc. 3. Średnie miesięczne opady skorygowane (Pr), ewapotranspiracja potencjalna (ETp), ewapotranspiracja rzeczywista (ETr) oraz średnie temperatury powietrza (t°C) dla okolic Poznania (Kędziora 1995)



Ryc. 4. Dynamika retencji aktualnej (R_a) na tle stanów retencji R_{kr} , R_{kr59} , R_{kr31} w 100-centymetrowej miąższości gleby płowej wzniesienia dennomorenowego (P1) i czarnej ziemi podnóża stoku (P6), na tle stanów zwierciadła wód gruntowych

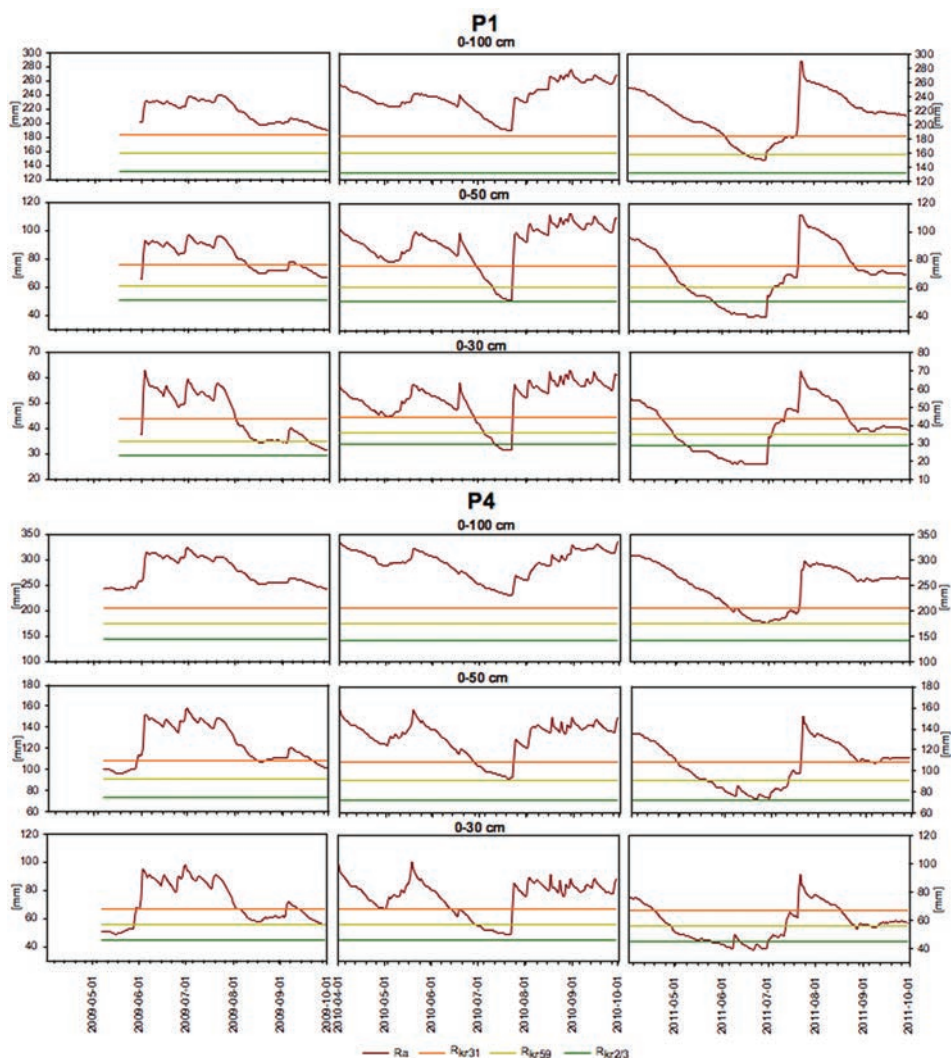
Na rycinie 4 przedstawiono czasowe zmiany stanów retencji wody glebowej w 100-centymetrowej miąższości dla gleby płowej wzniesienia dennomorenowego i czarnej ziemi obniżen terenowych w latach 2004-2006. Ponieważ dla większości

uprawianych roślin w warunkach Niziny Wielkopolskiej zahamowanie wzrostu i rozwoju występuje przy potencjale macierzystym Ψ_m wynoszącym od -600 cm (59 kPa) do -320 cm (31 kPa) (tab. 1), dynamikę retencji aktualnej (R_a) przedstawiono na tle stanów retencji przy wymienionych wcześniej potencjałach macierzystych (R_{kr59} , R_{kr31}), które stanowią granicę pomiędzy wodą łatwo a trudno dostępną dla roślin. Rycina 4 ilustruje również graniczny stan retencji pomiędzy wodą łatwo i trudno dostępną obliczany tradycyjnie ($R_{kr} = R_{wtw} + 1/3(R_{ppw} - R_{wtw})$) oraz stany wód gruntowych (zwg). Na podstawie przedstawionych danych wyraźnie zarysowała się cykliczność zmian retencji aktualnej. Po jesienno-zimowej regeneracji retencji wody w glebie następuje jej wyczerpywanie, które rozpoczyna się w zależności od warunków meteorologicznych w danym roku od trzeciej dekady marca do pierwszej dekady kwietnia. Następnie obserwowane jest systematyczne zmniejszanie R_a , które zwykle trwa do sierpnia. Okres początku odbudowy stanów retencji wody glebowej przypada przeważnie na trzecią dekadę sierpnia. W 2005 roku odbudowa retencji glebowej rozpoczęła się od trzeciej dekady lipca i do połowy drugiej dekady sierpnia obserwowano wzrost zawartości wody w glebie, co związane było z wynoszącą 102 mm sumą opadu tego okresu. Następnie rozpoczęło się ponowne wyczerpywanie retencionowanej wody do około drugiej dekady listopada, co z kolei związane było z małymi opadami we wrześniu i październiku. Suma opadów z tych miesięcy stanowiła 56% opadu z wielolecia dla tego okresu, a więc pod względem wilgotnościowym był to okres bardzo suchy. W glebie płowej położonej najwyżej w reliefie (P1) wyraźnie zaznaczyły się okresy niedoborów wody łatwo dostępnej dla roślin w okresie wegetacyjnym, gdzie retencja aktualna (R_a) była niższa od R_{kr59} i R_{kr31} . Początek ich występowania przypadał na drugą lub trzecią dekadę czerwca, natomiast koniec, średnio na pierwszą lub drugą dekadę sierpnia. W czarnej ziemi położonej najniżej w reliefie (P6) nie obserwowano stanów retencji aktualnej w 100-centymetrowej miąższości odpowiadających wodzie trudno dostępnej dla roślin, co wiązało się z większym oddziaływaniem wód gruntowych na dynamikę uwilgotnienia tej gleby i większymi zdolnościami retencyjnymi tej gleby. Jak podają Kozłowski i in. (2011), gleby zajmujące najwyższe położenia w reliefie równin morenowych charakteryzują się typowo opadowo-retencyjnym reżimem wodnym, w którym zwierciadło wód gruntowych znajduje się poza oddziaływaniem na strefę korzenia się roślin, zwłaszcza w sezonie wegetacyjnym. W czarnych ziemiach typowych położonych najniżej w reliefie płytsze zaleganie wód gruntowych istotnie wpływa na retencję aktualną 100-centymetrowej miąższości, a dopływy kapilarne niwelują niedobory wody. Pośrednimi warunkami charakteryzują się gleby położone pomiędzy wyniesieniami dennomorenowymi a podnóżami stoków, na przykład gleby płowe gruntowo-glejowe, czarne ziemie iluwialne czy zbrunatniałe (Marcinek i in. 1994, Spychalski 1998, Marcinek i Komisarek 2000, Komisarek 2000, Komisarek i Kozłowski 2005, Kozłowski 2007, Komisarek i in. 2008, Kozłowski i Komisarek 2011, 2013, 2014, Kozłowski i in. 2011).

Na rycinie 5 przedstawiono przykładowe dane dotyczące dynamiki retencji aktualnej na tle stanów retencji przy R_{kr} , R_{kr59} , R_{kr31} w 100-, 50- i 30-centymetrowej miąższości gleby płowej wyniesienia dennomorenowego (P1) i czarnej ziemi zbrunatniałej pedymentu stoku (P4) dla sezonów wegetacyjnych 2009, 2010 i 2011 roku, obejmujących okres od pierwszej dekady kwietnia do trzeciej dekady września. W 100-centymetrowej miąższości analizowanych gleb w sezonach 2009 i 2010 roku nie zaobserwowano R_a niższej niż R_{kr31} , co wskazuje, że nie wystąpiły niedobory wody łatwo dostępnej dla roślin. W 2011 roku występowały okresy, gdy stany R_a utrzymywały się poniżej R_{kr31} i R_{kr59} w glebie płowej, natomiast w czarnej ziemi zbrunatniałej R_a była poniżej R_{kr31} . W przypadku analizowania miąższości 50- i 30-centymetrowej, a więc roślin średnio i płytko korzeniujących się, praktycznie w każdym sezonie wegetacyjnym powstawały niedobory wody łatwo dostępnej dla roślin, przy czym większe i dłużej trwające były w glebie płowej w porównaniu z czarną ziemią zbrunatniałą.

Z punktu widzenia pobierania wody przez rośliny ważna jest siła, z jaką woda utrzymywana jest w glebie. Na rycinie 6 przedstawiono zróżnicowanie czasowe wartości potencjału macierzystego gleby płowej wyniesienia dennomorenowego (P1), czarnej ziemi zbrunatniałej pedymentu stoku (P4) i położonej najniżej w reliefie czarnej ziemi typowej podnóża stoku (P6) w 150-centymetrowej miąższości. Na rycinie wyraźnie zaznaczyły się okresy zwiększania bezwzględnej wartości Ψ_m w okresie wegetacyjnym (przesuszania gleb) oraz stopniowego wzrostu wartości Ψ_m w okresie jesienno-wiosennym (nawilżanie glebie). Jednocześnie na przedstawionych izoliniach wyraźnie zarysowały się przesunięcia czasowe w wyczerpywaniu wody z gleby i jej nawilżaniu. Podczas stopniowego jesienno-wiosennego spadku bezwzględnych wartości Ψ_m i regeneracji retencji wody glebowej w poziomach powierzchniowych obserwowano jeszcze obniżanie się poziomu zwierciadła wód gruntowych. O ile w glebach podnóża stoków związek ten realizuje się w krótszych przedziałach czasowych, o tyle w glebach położonych wyżej w reliefie (P1) różnica może wynosić nawet 2-3 miesiące i jest większa w okresie nawilżania gleb, natomiast mniejsza w okresie ich wysychania.

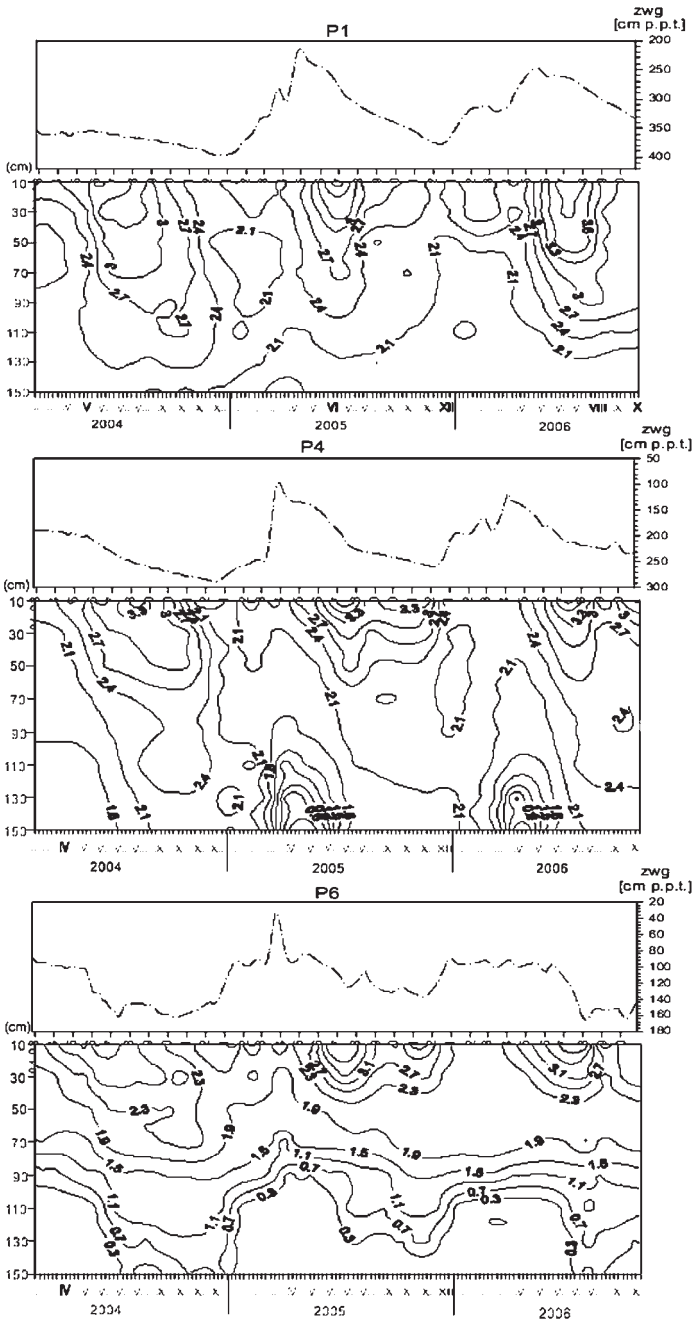
Na podstawie kilkudziesięciu lat badań prowadzonych nad reżimem wodnym gleb uprawnych równin morenowych Niziny Wielkopolskiej można stwierdzić, że w okresie wegetacyjnym najsilniej i najgłębiej przesycają gleby płowe zlokalizowane na wyniesieniach stoków, w których dynamika wody glebowej a tym samym niedobory wody glebowej w sezonie wegetacyjnym zdeterminowane są głównie wodami opadowymi. Gleby te z jednej strony charakteryzują się małymi zdolnościami retencyjnymi, szczególnie w wierzchnich partiach, natomiast z drugiej głębokim zaleganiem zwierciadła wód gruntowych w sezonie wegetacyjnym. Dlatego retencjonowana w nich woda w okresie wegetacyjnym zostaje szybko wyczerpana przez rośliny, które zmuszone są do pobierania wody zawartej głębiej zalegającym w poziomie argik. Mimo dużych zdolności retencyjnych tego poziomu w stosunku



Ryc. 5. Dynamika retencji aktualnej na tle stanów retencji R_{kr} R_{kr59} , R_{kr31} w 100-, 50- i 30-centymetrowej miąższości gleby płowej wyniesienia dennomorenowego (P1) i czarnej ziemi zbrunatniałej pedymentu stoku (P4)

do poziomów wyżej zalegających to i tak do głębokości 75 – 100 cm obserwowane są bezwzględne wartości potencjału macierzystego wody glebowej wynoszące 59 kPa, co świadczy o zahamowaniu optymalnego wzrostu i rozwoju większości uprawianych roślin w warunkach środkowej Wielkopolski.

Dla roślin z bardzo płytkim systemem korzeniowym niedobory wody glebowej pojawiają się praktycznie w każdym sezonie wegetacyjnym. Znacznie mniejsze



Ryc. 6. Czasowa zmienność potencjału macierzystego Ψ_m wyrażonego w bezwzględnych jednostkach pF w 150-centymetrowej warstwie uprawnej gleby płowej zaciekowej (P1), czarnej ziemi zbrunatniałej (P4) i czarnej ziemi typowej (P6)

przesuszenie, a tym samym występowanie niedoborów wody występuje w czarnych ziemiach zajmujących najniższe położenia w reliefie. W glebach tych do głębokości około 60 cm obserwowane są wartości potencjału macierzystego wody glebowej wynoszące 59 kPa. To płytsze przesuszenie czarnych ziem w porównaniu z glebami płowymi i mniejsze niedobory wody wiążą się z jednej strony z wodami gruntowymi, których płytkie zaleganie wyraźnie oddziałuje na dynamikę uwilgotnienia ich profilu, natomiast z drugiej, z dużymi zdolnościami retencyjnymi poziomów powierzchniowych zasobnych w materię organiczną. Gleby zajmujące pośrednie położenie w reliefie: gleby płowe gruntowo-glejowe, czarne ziemie iluwialne, czy czarne ziemie zbrunatniałe charakteryzują się pośrednimi zdolnościami retencyjnymi, jak również pośrednią dynamiką wody glebowej.

Obserwowany w ciągu kilkudziesięciu lat wzrost częstości występowania głębokiego i silnego przesuszenia gleb uprawnych w Wielkopolsce związany jest ze zmianami klimatycznymi. Chociaż roczna suma opadów w tym regionie nie ma trendu malejącego (Ziarnicka-Wojtaszek i Kopcińska 2020), to wzrost temperatury, prędkości wiatru, salda promieniowania i niedosytów wilgotności powietrza istotnie sprzyjają wzrostowi ewapotranspiracji (Kędziora 2011, Kundzewicz i Matczak 2012, Okoniewska i Szumińska 2020). Również intensyfikacja produkcji roślinnej prowadząca do wzrostu plonów (Krasowicz i in. 2009, Małyka 2014) ma wpływ na większe zapotrzebowanie i zużycie wody przez rośliny. W świetle zarówno obserwowanych, jak i prognozowanych zmian w przestrzeni produkcyjnej gleba odgrywa ważną rolę. Dlatego dbałość o gleby i ich właściwości, w tym zdolności retencyjne, powinna być jednym z nadrzędnych celów współczesnego rolnictwa.

Literatura

- Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Dexter A.R., Mahboubi A.A., Neyshabouri M.R. (2014): Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226, 8-20.
- Berg van den M., Driessen P.M. (2002): Water uptake in crop growth models for land use systems analysis: I. A review of approaches and their pedigrees. *Agricult. Ecosyst. Environ.* 92, 21-36.
- Botula Y.D., Van Ranst E., Cornelis W.M. (2014): Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: A review. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 38, 679-698.
- Bouma J. (1989): Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, 9, 177-213.
- Brady N.C., Weil R.R. (2008): *The nature and properties of soil*. Pearson Prentice Hall, Hoboken, USA.
- Degré A., van der Ploeg M.J., Caldwell T., Gooren H.P. (2017): Comparison of soil water potential sensors: a drying experiment. *Vadose Zone J.*, 16(4), 1-8.
- Feddes R.A., Koopmans R.W.R., van Dam J.C. (1997): *Agrohydrology*. Wageningen Agricultural University, Department of Water Resources, Wageningen.
- Genuchten van M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), 892-898.

- Genuchten van M.Th., Leij F.J., Yates S.R. (1991): The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA. United States Environmental Protection Agency, document EPA/600/2-91/065.
- Każmierowski C. (2015): Estymacja właściwości hydraulicznych gleb Nizy Polskiego. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Kędziora A. (1995): Podstawy agrometeorologii. PWRiL, Poznań.
- Kędziora A. (2011): Climatic conditions and water balance of the Kujawy Lakeland. *Rocz. Glebozn.*, 62(2), 189-203.
- Kędziora A., Ryszkowski L., Przybyła Cz. (2005): Ochrona i kształtowanie zasobów wodnych i ich jakości w krajobrazie rolniczym. W: *Gospodarowanie wodą w Wielkopolsce*. Red. K. Kasprzak. Wydawnictwo Abrys, Poznań: 16-25.
- Klute A. (1986): Water retention: Laboratory methods. In: *Method of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Red. A. Klute. American Society of Agronomy. Agronomy Monograph 9. Wisconsin, USA: 635-662.
- Komisarek J. (2000): Kształtowanie się właściwości gleb płowych i czarnych ziem oraz chemizmu wód gruntowych w katenie falistej Pojezierza Poznańskiego. *Rocz. AR Pozn. Rozpr. Nauk.* 307.
- Komisarek J. (2008): Zmienność czasowa zawartości wody w strefie korzenienia roślin w glebie płowej zaciekowej opadowo-glejowej. *Rocz. Glebozn.*, 59, 2, 130-138.
- Komisarek J., Kozłowski M. (2005): Zastosowanie symulacyjnego modelu SWAP do oceny bilansu wodnego gleby płowej zaciekowej falistej moreny dennej Pojezierza Poznańskiego. *Rocz. AR Pozn.*, 356, 26, 223-231.
- Komisarek J., Kozłowski M., Wiatrowska K. (2008): Deficiencies of plant available water in soil catena of undulating ground moraine. *Nauka Przyr. Technol.*, 2, 3, #23.
- Kowalczak P. (2001): Hierarchia potrzeb obszarowych małej retencji w dorzeczu Warty. IMGW, Warszawa.
- Kozłowski M. (2007): Reżim wodny gleb i chemizm wód gruntowych w układach katenalnych Pojezierza Poznańskiego. *Maszyn. Kat. Glebozn. i Rekult. UPP, Poznań*.
- Kozłowski M., Komisarek J. (2011): Dynamika uwilgotnienia w wybranych glebach płowych i czarnych ziemiach na Pojezierzu Poznańskim. *Rocz. Glebozn.*, 62, 2, 226-239.
- Kozłowski M., Komisarek J. (2013): Niedobory wody łatwo dostępnej dla roślin w czarnej ziemi z poziomem cambic. *Nauka Przyr. Technol.*, 7, 4, #54.
- Kozłowski M., Komisarek J. (2014): Deficiencies of readily plant available water in selected Albeluvisols in central Wielkopolska. *Nauka Przyr. Technol.*, 8, 1, #4.
- Kozłowski M., Komisarek J. (2016): Soil sequences along a slope of the Opalenica Plain. *J. Ecol. Eng.*, 17(1).
- Kozłowski M., Komisarek J. (2017): Analysis of the suitability of Polish soil texture classification for estimating soil water retention and hydraulic properties. *Soil Sci. Ann.*, 68, 197-204.
- Kozłowski M., Komisarek J., Wiatrowska K. (2011): Bilans wodny gleb układów katenalnych Pojezierza Poznańskiego w sezonie wegetacyjnym. *Nauka Przyr. Technol.*, 5, 5, #85.
- Kozłowski M., Komisarek J., Wiatrowska K. (2018): Temporal variability of water table depth in topohydrosequence of undulating ground moraine in central Poland. *Pol. J. Environ. Stud.*, 27(5), 2097-2106.
- Krasowicz S., Stuczyński T., Doroszewski A. (2009): Produkcja roślinna w Polsce na tle warunków przyrodniczych i ekonomiczno-organizacyjnych. *Stud. Rap. IUNG-PIB*, 14, 27-54.
- Kundzewicz Z.W., Matczak P. (2012): Climate change regional review: Poland? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 3 (4), 297-311.
- Kuś J. (2016): Gospodarowanie wodą w rolnictwie. *Stud. Rap. IUNG-PIB*, 47(1), 83-104.
- Kutilek M. (1978): *Pedology for water management*. SNTL-ALFA, Prague.
- Kutilek M. (2004): Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.*, 79, 175-184.

- Le Bourgeois O., Bouvier C., Brunet P., Ayrat P.A. (2016): Inverse modeling of soil water content to estimate the hydraulic properties of a shallow soil and the associated weathered bedrock. *J. Hydrol.*, 541, 116-126.
- Mandal N., Dwivedi B.S., Datta S.P., Meena M.C., Tomar R.K. (2019): Soil hydrophysical properties under different nutrient management practices, their relationship with soil organic carbon fractions and crop yield under pigeonpea-wheat sequence. *J. Plant Nutr.*, 42, 384-400.
- Marcinek J., Kaźmierowski C., Komisarek J. (1997): Problemy wyznaczania górnej granicy wody dostępnej dla roślin metodami polowymi. *Pr. Kom. Nauk Roln. Kom. Nauk Leś. PTPN*, 83, 81-97.
- Marcinek J., Kaźmierowski C., Komisarek J. (1998): Rozmieszczenie gleb i zróżnicowanie ich właściwości w katenie falistej moreny dennej Pojezierza Poznańskiego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 460, 53-73.
- Marcinek J., Kaźmierowski C., Komisarek J. (1999): Stan zagęszczenia poduprawnych poziomów gleb intensywnie używanych rolniczo. *Rocz. AR Pozn.*, 290, 20, 127-138.
- Marcinek J., Komisarek J. (2000): Wpływ naturalnych warunków drenażu gleb na ich reżim wodny. *Rocz. AR Pozn.*, 317, 56, 79-88.
- Marcinek J., Komisarek J. (2004): Antropogeniczne przekształcenia gleb Pojezierza Poznańskiego na skutek intensywnego użytkowania rolniczego. Wydawnictwo AR, Poznań.
- Marcinek J., Komisarek J., Spychalski M. (1990): Obieg wody w mikrozewni rolniczej. W: *Obieg wody i bariery biogeochemiczne w krajobrazie rolniczym*. Red. L. Ryszkowski, J. Marcinek, A. Kędziora. Wyd. UAM, Poznań: 69-96.
- Marcinek J., Spychalski M., Komisarek J. (1994): Dynamika wody glebowej w glebach autogenicznych i semihydrogenicznych w układzie toposekwencyjnym moreny dennej Pojezierza Poznańskiego. *Rocz. AR Pozn.*, 268, 15, cz. 1: 131-145.
- Marcinek J., Wiślańska A. (1984): Asocjacje czarnych ziem i gleb płowych falistej moreny dennej Równiny Kościańskiej. *Rocz. AR Pozn.*, 149, 5, 65-81.
- Matyka M. (2014): Plonowanie wybranych gatunków roślin w Polsce, Niemczech i 27 krajach Unii Europejskiej w latach 1961-2012. *Rocz. Nauk. Stow. Ekon. Roln. Agrobizn.*, 16(3).
- McBratney A., Minasny B. (2004): Soil inference system. In: *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Red. Y. Pachepsky, W.J. Rawls. Elsevier Ser. Dev. Soil Sci., 30, 323-348.
- Novák V., Hlaváčiková H. (2019): Soil-water retention curve. W: *Applied soil hydrology. Theory and applications of transport in porous media*. Springer, Cham.
- Ochrona środowiska, (2020): *Analizy statystyczne*. GUS, Warszawa.
- Okoniewska M., Szumińska D. (2020): Changes in potential evaporation in the years 1952-2018 in North-Western Poland in terms of the impact of climatic changes on hydrological and hydrochemical conditions. *Water*, 12(3), 877.
- Or D., Tuller M. (2003): Hydraulic conductivity of partially saturated fractured porous media: flow in a cross-section. *Adv. Water Res.*, 26, 883-898.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (2009): Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Rocz. Glebozn.*, 60(2), 5-16.
- Przybyła Cz., Tymczuk Z. (2005): Aktualny stan i program małej retencji dla Wielkopolski. W: *Gospodarowanie wodą w Wielkopolsce*. Red. K. Kasprzak. Wydawnictwo Abrys, Poznań: 7-15.
- Rao N.H. (1998): Grouping water storage properties of Indian soils for soil water balance model application. *Agric. Water Manage.*, 29: 201-213.
- Rashid N.S.A., Askari M., Tanaka T., Simunek J., van Genuchten M.T. (2015). Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, 241, 306-312.
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. (2001). ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251: 163-176.

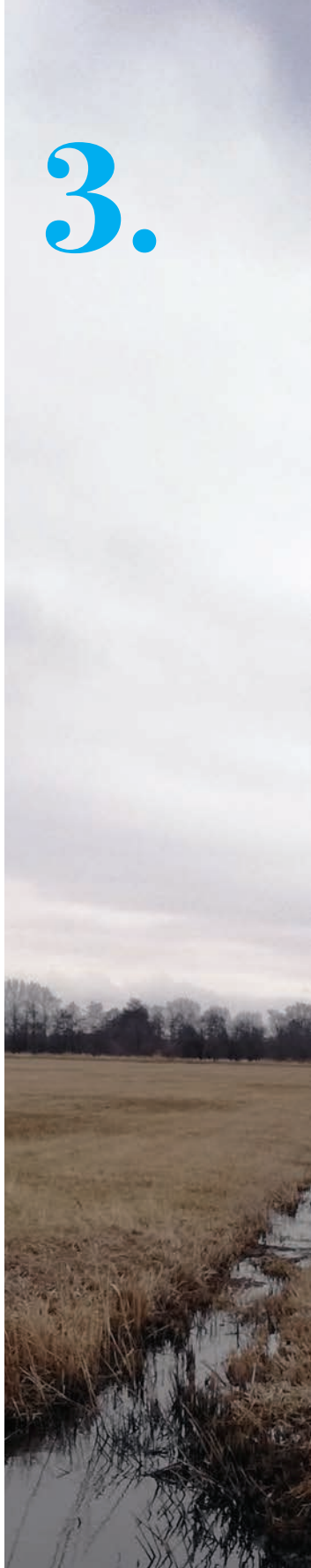
- Spychalski M. (1998): Gospodarka wodna wybranych gleb uprawnych Pojezierzy Poznańskiego i Leszczyńskiego. *Rocz. AR. Pozn. Rozpr. Nauk.* 284.
- Ślusarczyk E. (1979): Określenie retencji użytecznej gleb mineralnych dla prognozowania i projektowania nawodnień. *Melior. Rol.*, 3 (53).
- Verbis K., Cornelis W.M., Gabriels D., Alaerts K., Soto G. (2009): Using an inverse modelling approach to evaluate the water retention in a simple water harvesting technique. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(10), 1979-1992.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C. (2002a): Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agrophys. Monogr.*, 79, 140.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C. (2002b): Spatial characteristic of hydro-physical properties in arable mineral soils in Poland as illustrated by field water capacity (FWC). *Int. Agrophys.*, 16, 151-159.
- Wang T., Franz T.E., Yue W., Szilagyi J., Zlotnik V.A., You J., Chen X., Shulski M.D., Young A. (2016): Feasibility analysis of using inverse modeling for estimating natural groundwater recharge from a large-scale soil moisture monitoring network. *J. Hydrol.*, 533, 250-265.
- Werisch S., Grundmann J., Al-Dhuhli H., Algharibi E., Lennartz F. (2014): Multiobjective parameter estimation of hydraulic properties for a sandy soil in Oman. *Environ. Earth Sci.*, 72(12), 4935-4956.
- Ziernicka-Wojtaszek A., Kopcińska J. (2020): Variation in atmospheric precipitation in Poland in the years 2001-2018. *Atmosphere*, 11(8), 794.

Jak zatrzymać wodę na polu? Wpływ agrotechniki na gospodarkę wodną

Tomasz Piechota

Gleba jest podstawowym źródłem wody dla roślin uprawnych, a także środowiskiem życia rośliny, w którym rozwijają się części podziemne odżywiające pozostałe organy. Większość zabiegów agrotechnicznych wiąże się z nią bezpośrednio lub pośrednio. Agrotechnika wpływa zarówno na bieżącą gospodarkę wodną, jak i długofalowo kształtuje właściwości wodne gleby. Podstawą racjonalnej gospodarki polowej jest utrzymywanie roli w dobrej kulturze, zapewniającej efektywne gospodarowanie wodą (González-Sánchez 2017).

Gospodarka wodą w glebie opiera się na obiegu tego składnika, który w środowisku wciąż się przemieszcza. W skali lokalnej każdy użytkownik bezpośrednio wpływa poprzez swoje działania na gospodarkę wodną posiadanych gruntów. Jak w każdym bilansie na aktualny stan, w tym przypadku ilość wody w glebie, wpływają przychody i rozchody. Głównym źródłem przychodów wody na polach uprawnych są opady atmosferyczne. Większość gruntów ornych charakteryzuje gospodarka opadowa. Oznacza to, że poziom wody gruntowej jest na tyle niski, że nie ma możliwości korzystania z tego źródła wilgoci. Podstawą gospodarki wodnej jest więc woda zgromadzona w wierzchniej warstwie gleby, dostępna dla korzeni roślin, do głębokości około 1 m. Ilość wody, jaką gleba może zgromadzić w tej warstwie, to połowa pojemność wodna. Jest to podstawowy parametr pozwalający efektywnie gospodarować wodą. Opady występują nieregularnie, niekiedy z dużymi przerwami, ale dzięki gromadzeniu wody w glebie możliwe jest stałe zaopatrzenie roślin w ten życiodajny



składnik. Możliwe jest również gromadzenie wody z opadów, z okresów nieprodukcyjnych, na przykład późnej jesieni i zimy, na potrzeby przyszłej wegetacji.

Wysoki poziom wody gruntowej, przez cały rok dostępnej dla roślin uprawnych, występuje głównie w zaniżeniach terenu, dolinach rzecznych, obrzeżach jezior itp. Tereny te są najczęściej wykorzystywane jako użytki zielone. Typ gospodarki gruntowo-opadowej zależy od poziomu wody gruntowej, opady mają więc znaczenie drugorzędne i pośrednie, przez uzupełnianie zasobów wody w glebie.

Na polach uprawnych bywa, że okresowo poziom wody gruntowej jest na tyle wysoki, że jest ona dostępna dla roślin rolniczych, jednak w pozostałych okresach poziom obniża się poniżej zasięgu korzeni. Ten typ gospodarki wodą występuje na niżej położonych częściach pól, najczęściej w okresie przedwiośnia i po dużych opadach deszczu, czyli wtedy, gdy dostępność wody i tak jest duża. Mogą występować okresowe nadmiary wody, szczególnie na skutek spływów ze zboczy. Nadmiar wody w glebie i brak tlenu powoduje spływanie systemu korzeniowego i w konsekwencji słabsze pobieranie wody, zwłaszcza z głębszych warstw, w okresach suszy. Szybkie odprowadzenie nadmiaru wody w glebie i większy przyrost systemu korzeniowego paradoksalnie zwiększa dostępność wody w okresach suchych. Duże znaczenie mają tu oczywiście wszelkiego rodzaju urządzenia melioracyjne, jednak podstawą jest utrzymanie gleby w dobrej kondycji, umożliwiającej sprawny ruch wody.

W sytuacji pełnego wysycenia gleby wodą jej nadmiar powinien przemieszczać się w głąb, jako woda grawitacyjna, zasilając wody gruntowe. Odpowiednie tempo tego zjawiska zapobiega zalaniu pola i wyparciu z gleby powietrza. W praktyce stan gleby, na różnych głębokościach profilu, często spowalnia tempo przesiąkania wody. Różnego typu warstwy zagęszczone hamują jej ruch, prowadząc okresowo do pełnego wysycenia warstw wierzchnich. Przyczyną może być również podwyższony poziom wody gruntowej; w takich sytuacjach konieczne są zabiegi melioracyjne.

Osady atmosferyczne, głównie rosa, w niewielkim stopniu uzupełniają ilość wody w bilansie pola uprawnego, wpływają natomiast na mikroklimat, zwiększając wilgotność powietrza.

Spływy po zboczach do niżej położonych miejsc stanowią rozchód z wyżej położonych terenów, również w zaniżeniach, i choć dostarczają dodatkowej ilości wody, nie są zjawiskiem korzystnym. Następują często po intensywnych opadach, szczególnie na glebach słabo wchłaniających wodę. Spływ wody bywa wtedy gwałtowny, powoduje erozję i uszkodzenia roślin. Prowadzi do okresowego zalania niżej położonych części pola. Następuje też utrata części wody ze środowiska pola uprawnego na tereny nierolnicze. Spływy znacząco zwiększają nierównomierność warunków wodnych w ramach pola. Duże zróżnicowanie uwilgotnienia nie tylko bezpośrednio wpływa na nierówny rozwój roślin, ale również utrudnia wykonanie zabiegów uprawowych, pielęgnacji, nawożenia, ochrony i zbioru w odpowiednich warunkach i terminie.

Transpiracja jest najważniejszym składnikiem rozchodów wody z gleby, bezpośrednio związanym z funkcjami życiowymi, w tym z tworzeniem biomasy roślinnej.

Do wyprodukowania 1 kg suchej masy roślina zużywa, w zależności od gatunku, od 250 do ponad 1000 l wody. Transpiracja zależy również od kondycji rośliny, na którą wpływają warunki siedliska i zabiegi agrotechniczne.

Parowanie wody bezpośrednio z gruntu prowadzi do jej bezproduktywnej utraty. Tempo parowania zależy przede wszystkim od ilości wody podatnej na odparowanie, czyli znajdującej się przy powierzchni roli oraz od tempa podsiąku kapilarnego. Podsiąkanie wody z warstw wody gruntowej odbywa się dzięki obecności w glebie przestworów kapilarnych, o średnicach mniejszych od 1 mm. Im mniejsza średnica kanalików, tym większa wysokość podsiąku, ale mniejsze jego tempo. Ilość, średnica i objętość przestworów kapilarnych zależy głównie od składu granulometrycznego gleby, przede wszystkim zawartości frakcji łu. Najmniej kapilar znajduje się w glebach piaszczystych, w których przeważają cząstki o dużych średnicach. Ilość przestworów utrzymujących wodę rośnie wraz z kategorią agronomiczną aż do ciężkich glin. Zaskorupienie powierzchni mocno zwiększa parowanie wody, szczególnie na gliniastych glebach, gdzie podsiąk do powierzchni gleby może odbywać się z całej warstwy ornej.

Część wody jest związana zbyt dużymi siłami, aby mogła być pobrana przez korzenie. Ilość wody niedostępnej rośnie również wraz z zawartością frakcji ilastej. Z tego powodu ilość wody dostępnej dla roślin jest dużo mniejsza, niż jej ogólna zawartość.

Ilość wody w glebie ulega ciągłym wahaniom, w zależności od wielkości przychodów i rozchodów. Rozchody mają raczej charakter ciągły, na przykład transpiracja z roślin, natomiast przychody występują okresowo w czasie opadów. Duża pojemność wodna gleby jest niezbędna, aby zmagazynować wystarczające ilości wody na okresy suche.

Rolnik nie ma bezpośredniego wpływu na przychody wody – ilość i rozkład opadów atmosferycznych, natomiast istotnie modyfikuje możliwości ich zgromadzenia i wykorzystania oraz wielkość strat. Niestety, powszechnie obserwuje się pogarszanie gospodarki wodnej gleby na skutek działalności rolniczej. Są to skutki uboczne i nieuświadomione, towarzyszące powszechnie stosowanej agrotechnice.

W naturalnych warunkach przestwory glebowe tworzą sieć połączonych kanalików o większych i mniejszych średnicach, powstałych przez działanie dżdżownic i innych drobnych organizmów oraz pozostałych po obumarłych, rozłożonych korzeniach roślin. Mechaniczna uprawa roli niszczy ten naturalny system i wytwarza sztucznie strukturę gruzełkową. Skuteczność struktury gruzełkowej w utrzymaniu odpowiednich właściwości wodno-powietrznych roli zależy od odporności gruzełków na siły mechaniczne i działanie wody. Podstawowym spoiwem wzmacniającym gruzełki jest próchnica glebowa. Uprawa roli przez napowietrzanie jej i mechaniczne kruszenie przyspiesza mineralizację próchnicy, z której uwalniają się składniki pokarmowe, zwiększając plon roślin, ale w dłuższym okresie prowadzą do obniżenia zawartości materii organicznej w glebie.

Negatywne skutki intensywnej uprawy roli dla zawartości próchnicy i wodo-odporności struktury agregatowej wyraźnie narastają w ostatnich kilkudziesięciu latach. Dominującym sposobem uprawy gleby w Polsce jest orka. Jak podaje Europejska Federacja Rolnictwa Konserwującego ECAF (González-Sánchez i in. 2017), ponad 95% gruntów w Polsce uprawia się w tradycyjnym systemie uprawy płużnej. Mechaniczna uprawa roli jest jednym z najważniejszych czynników obniżających zawartość próchnicy w glebie. W pierwszych latach od przekształcenia w grunt orny następuje szybki ubytek około połowy pierwotnej ilości próchnicy, aż do osiągnięcia, po kilkudziesięciu latach, nowego stanu równowagi pomiędzy dopływem materii organicznej a jej mineralizacją.

Wraz z upadkiem systemu komunistycznego otworzył się dostęp do nowoczesnego parku maszynowego, początkowo zagranicznego, a następnie również krajowego. W efekcie wprowadzania większych ciągników o dużych mocach wzrosła częstotliwość głębokich orek, pogłębieniu uległa również uprawa późniwna, nastąpiło zwiększenie intensywności uprawy roli pomimo stosowania pozornie tego samego systemu płużnego. Co raz częściej stosuje się również narzędzia aktywne, bardzo intensywnie ingerujące w glebę. Wzrosła także prędkość jazdy w trakcie wykonywania zabiegów.

Coraz cięższy i większy sprzęt zwiększa obciążenie gruntu, zwłaszcza w okresach zbyt dużej wilgotności powszechnie prowadzi do zagęszczenia podglebia. W ten sposób napędza się spirala negatywnych zależności wpływających na ciągłe pogarszanie się właściwości gleby. Intensywna uprawa roli prowadzi do odpróchniczenia gleb oraz pogorszenia właściwości agronomicznych roli, co z kolei wymusza dalszy wzrost intensywności uprawy w celu nadania glebie pożądaných właściwości (Obalum i in. 2017).

Gleby w Polsce charakteryzują się niską zasobnością materii organicznej. W 2015 roku średnia zawartość próchnicy wynosiła 1,94%. Zgodnie z normami Europejskiego Biura Gleb na glebach o zawartości poniżej 2,0% C organicznego i 3,4% glebowej materii organicznej na glebach takich powinny być podjęte działania sprzyjające wzrostowi materii organicznej, ze względu na ich zagrożenie pustynnieniem (Kuś 2015). Wobec zaostrzających się warunków klimatycznych, szczególnie coraz częstszych i dłuższych okresów suszy, ryzyko to staje się coraz bardziej realne.

Równoległe ze wzrostem intensywności uprawy nastąpiły poważne zmiany w pogłowie zwierząt, wpływając na ilość produkowanego obornika i strukturę zasiewów. Doprowadziło to do zmniejszenia dopływu materii organicznej do gleby z nawozami naturalnymi i wzrostu udziału roślin o ujemnym wpływie na zawartość próchnicy w glebie, takich jak kukurydza i warzywa. Nastąpiło również zwiększenie liczby gospodarstw specjalizujących się wyłącznie w produkcji roślinnej, w której dominują zboża i rzepak, gatunki o małej wartości próchnicotwórczej (Kuś i Kopyński 2012).

Ubytek próchnicy w glebie prowadzi do jej postępującej degradacji. Widocznym skutkiem pogorszenia właściwości biologicznych, chemicznych i fizycznych roli jest utrata struktury agregatowej gruntu, w zamian za to rośnie jego rozpylenie i następujące po opadach deszczu zaskorupienie. Brak agregatów glebowych powoduje niedobór przestworów glebowych, szczególnie tych o dużych średnicach, którymi woda szybko wsiąka w glebę. W efekcie poważna część opadów spływa po powierzchni gleby w zagłębienia terenu oraz pozostaje blisko powierzchni, skąd szybko paruje.

Niedobór próchnicy zwiększa również skłonność gleby do nadmiernego osiadania, co zwiększa też wrażliwość na zagęszczanie pod wpływem zabiegów uprawowych. Liczne przejazdy ciągnikami, związane z orką i jej uprawą, są odpowiedzialne za większą część ugniatania pola, jednak powstałe koleiny są niewidoczne pod warstwą doprawionej gleby. Rośnie również zagęszczenie podglebia, które utrudnia lub wręcz uniemożliwia ruch wody oraz rozwój korzeni roślin uprawnych poniżej warstwy ornej. Nadmierne zagęszczanie gleb jest w warunkach europejskich jednym z najważniejszych procesów erozyjnych i jednym z najpoważniejszych skutków i objawów degradacji gleby (Lal i in. 2007).

Nowoczesny sprzęt rolniczy pozwala na wjazd na pole i zabiegi uprawowe w warunkach, w których nie powinny być wykonywane, w zbyt suchej lub zbyt mokrej glebie. Skłania ku temu duża czasochłonność wykonywanych zabiegów, która utrudnia zachowanie wymaganych terminów agrotechnicznych, zwłaszcza na dużych powierzchniach oraz w okresach niesprzyjającej pracom polowym pogody. Zmiany w klimacie prowadzące do coraz częstszych susz przeplatanych nawałnymi deszczami nakładają się na rosnącą wrażliwość gruntów rolnych, związaną z ubytkiem próchnicy.

Negatywne zmiany w glebie zachodzą powoli, w sposób pełzający, przez co są słabo zauważalne w krótkim czasie. Niestety, kumulują się w kolejnych latach, powodując w dłuższym okresie poważne zmiany w środowisku glebowym, a w skrajnym przypadku prowadząc do jego całkowitej dewastacji. Odpowiedzią na nieświadomie powodowane, negatywne zmiany w glebie powinny być świadomie podejmowane działania dla jej regeneracji. Powrót do sprawności roli również przebiega powoli i pełna regeneracja gleby wymaga wielu lat stosowania odpowiedniej agrotechniki. Jednak pierwsze, pozytywne skutki są widoczne natychmiast, w pierwszych latach po ich zastosowaniu.

Najważniejsze sposoby poprawy, a właściwie naprawy, gospodarki wodnej gleby to:

- doprowadzenie gleby do prawidłowego odczynu
- ograniczenie uprawy roli
- zwiększenie dopływu materii organicznej (mulczowanie)
- zwiększenie bioróżnorodności pola uprawnego.

Odczyn gleby

Podstawowym i niezbędnym warunkiem prowadzenia racjonalnej gospodarki polowej jest utrzymanie prawidłowego odczynu gleby. Nadmierne zakwaszenie uniemożliwia tworzenie trwałej struktury roli, prawidłową gospodarkę wodną gleby i roślin oraz rozkład resztek roślinnych i ich humifikację (Grzebisz i in. 2013).

Niestety, pomimo powszechnej wiedzy o negatywnych skutkach zakwaszenia gleb, poziom realizacji zabiegów wapnowania jest wciąż kilkakrotnie mniejszy od potrzeb wynikających ze stopnia zakwaszenia pól. W roku gospodarczym 2018/19 zastosowano średnio 56 kg CaO/ha, czyli 821 tys. ton (GUS 2020), wobec szacowanych potrzeb na minimalnym poziomie 2,1 mln ton a optymalnie 4,6 mln ton w skali kraju (Jadczyszyn i Ochal 2013).

Proces odkwaszania gleby jest długotrwały i powolny, podobnie jak inne zabiegi regenerujące glebę, dla pełnego efektu wymaga długofalowego, systematycznego stosowania, jednak jest podstawą dla wszystkich innych działań, które mają poprawić właściwości wodne gleby.

Uprawa roli

Mechaniczna uprawa roli ma znaczący wpływ na długofalowe kształtowanie właściwości wodnych gleby przez obniżanie zawartości próchnicy i degradację struktury. Ma też bezpośredni wpływ na aktualną zawartość wody w glebie. W obu aspektach zatrzymywania wody w glebie, krótko- i długofalowym, obowiązuje ta sama zasada: „uprawę roli wykonywać tak mało, jak tylko jest to możliwe!” Jednocześnie, ze względu na potrzeby produkcyjne roślin, należy wykonywać tyle uprawek, ile jest konieczne.

Zasada „tak mało, jak to jest możliwe, tak dużo, jak to jest konieczne”, leży w sprzeczności z szeroko rozpowszechnionym, choć nieprawdziwym, przekonaniem, że im więcej uprawy roli, tym lepiej. Bezpośrednie, wizualne efekty intensywnej uprawy są efektowne, ale gospodarka wodna takiej gleby nieefektywna. Niestety, skutków nie widać od razu i nie są przypisywane rzeczywistej przyczynie.

Poza trwałym obniżaniem pojemności wodnej gleby zabiegi uprawy roli prowadzą do utraty dużych ilości wody aktualnie znajdującej się w glebie. Każde wymieszanie gleby wydobywa na powierzchnię wilgotny materiał, który wysycha. Gleba wydobyta na powierzchnię przez kolejne zabiegi uprawowe potrzebuje zaledwie kilku dni, a w letnie upały nawet tylko kilku godzin, by całkowicie wyschnąć. Jeśli zabiegi są powtarzane wielokrotnie, to wielokrotnie następuje utrata kolejnych porcji wody. W skrajnych przypadkach prowadzi to do braku wschodów roślin uprawnych.

Ograniczenie intensywności przesuszania roli można osiągnąć kilkoma metodami. Powszechnie dostępnym i stosowanym rozwiązaniem jest agregatowanie

narzędzi uprawowych. Glebę wtedy poddaje się kilku zabiegom jednocześnie i nie przesycha pomiędzy nimi. Świeżo wruszona przez pierwsze narzędzia w agregacie i nieprzesuszone łatwiej poddaje się kolejnym elementom roboczym maszyny. Dodatkową korzyścią jest lepszy efekt pracy i możliwość zmniejszenia liczby zabiegów. Mniejsza liczba przejazdów oznacza również mniej kolein i mniej nadmiernego ugniatania głębszych warstw.

Intensywność uprawy można ograniczyć również przez spłykanie wykonywanych zabiegów. Jednym z najgłębiej i najintensywniej działających uprawek jest orka. Pług wrusza, kruszy i napowietrza całą objętość oranej roli. W ostatnich latach znacznie wzrosła intensywność wykonywanych orok. Nowe rozwiązania techniczne, głównie dostępność ciągników dużej mocy, ułatwiają wykonywanie orok głębokich. W wielu gospodarstwach orka na głębokość 30 cm, a nawet głębsza stała się standardem. Tymczasem nie ma konieczności wykonywania głębokiej uprawy roli pod większość roślin. Orka siewna, zwłaszcza pod zboża, może być wykonana na 20 cm, a po dobrych przedplonach nawet nieco płycej. Głęboka orka, jeśli jest potrzebna, to tylko raz na kilka lat, głównie pod rośliny okopowe.

Dzięki wzrostowi mocy ciągników rozpowszechnił się w praktyce zabieg głęboszowania. Niektórzy rolnicy stosują go regularnie, co kilka lat, jako standardowy zabieg uprawowy. Jest to głęboko działający zabieg, który dodatkowo zwiększa intensywność uprawy oraz wymaga dużej siły uciągu, co skutkuje znacznym ugniataniem gleby przez koła ciągnika, dlatego nie powinien być stosowany bez wyraźnej potrzeby. W glebie o dobrej kondycji głęboszowanie jest zazwyczaj zbędne lub potrzebne sporadycznie, jednorazowo lub raz na kilkanaście lat. Konieczność regularnego głęboszowania wynika zazwyczaj z wadliwych praktyk agrotechnicznych, które szeroko omówiono wcześniej, przede wszystkim intensywnej uprawy roli oraz prac na zbyt wilgotnej glebie.

W przypadku głęboszowania niezmiernie ważne są również warunki, w jakich zostanie zastosowane. Głębosz nie powinien być stosowany przy zbyt dużej wilgotności gleby. Jeśli gleba jest mokra, to będzie ugniatana od dołu, a szczelina po przejściu zęba zostanie zamazana i zageszczona. W tej sytuacji wyrządza się szkody, najczęściej bez żadnych pozytywnych efektów. Ponieważ jest to najgłębiej działające narzędzie uprawowe, nie ma praktycznie żadnej możliwości, aby poprawić stan gleby po takim zabiegu.

Głębosz jest skuteczny, gdy gleba jest w miarę sucha. Wtedy pęka pod jego działaniem i rozkrusza się. Takie warunki muszą panować na całej głębokości pracy, czyli znacznie poniżej warstwy ornej. Z tego powodu praktycznie nigdy nie należy głęboszować wczesną wiosną, kiedy podglebie jest wilgotne po zimie, ani późną jesienią, gdy gleba już nabrała wilgoci. Odpowiednie warunki panują najczęściej latem, po żniwach, jednak nawet w tym czasie może być zbyt wilgotno. Najlepszą opcją wtedy jest rezygnacja z zabiegu i odłożenie go na kolejny rok. Do najlepszego rozpoznania, czy warunki sprzyjają głęboszowaniu, najlepiej wykonać wykopy na

planowaną głębokość uprawy i sprawdzić stan gleby. Odkrywka jest też najlepszym sposobem na ocenę zasadności głębszowania. Jeśli korzenie roślin swobodnie przerastają do głębszych warstw gleby i nie widać problemów z przemieszczaniem się wody, to głębszowanie jest zbędne, nawet jeśli wyczuwamy nieco zagęszczoną glebę poniżej warstwy ornej.

Dużą rolę w gospodarce wodnej pola odgrywa uprawa późniwna. Po zbiorze gleba jest zagęszczona i woda podsiąka do samej powierzchni gruntu. Uprawa późniwna w pierwszej kolejności ma przerwać podsiąk i straty z powierzchni roli, dlatego należy ją wykonać natychmiast po zbiorze. Zerwanie drobnych kapilar glebowych hamuje podsiąk i parowanie, jednak przesusza uprawioną warstwę, dlatego uprawa powinna być wykonana płytko, nie więcej niż na 5 cm. Uprawa ścierniska pobudza do kiełkowania osypane nasiona, szczególnie obficie w stanowiskach po zbożach i rzepaku. Masowo pojawiające się siewki pobierają ogromne ilości wody, przede wszystkim z wierzchniej warstwy, ale jeśli się rozrosną i zakorzeniają, to z całej warstwy ornej. Dlatego uprawę późniwną należy powtarzać, nawet kilkakrotnie, po każdej fali wschodów samosiewów i chwastów, kiedy rośliny są jeszcze bardzo młode. Zboża są łatwe do zwalczania, kiedy mają do dwóch liści, a rzepak kiedy jest w fazie liścieni. Jeśli na polu pozostaje słoma, to jej głębsze wymieszanie przeprowadza się dopiero z ostatnim zabiegiem późniwnym, który wtedy wykonuje się na większą głębokość umożliwiającą jej pełne wymieszanie z glebą. Ponieważ słoma po kilkakrotnym przemieszaniu i dłuższym kontakcie z glebą jest bardziej krucha i rozdrobniona, jej równomierne rozprowadzenie w glebie jest łatwiejsze niż bezpośrednio po żniwach.

Niestety, w praktyce uprawę późniwną najczęściej ogranicza się do jednego przejazdu, ale za to na dużą głębokość, do 10-12 cm. Gleba jest niepotrzebnie głęboko przesuszana, a słoma niedokładnie wymieszana z glebą. Samosiewy rozwijają się intensywnie, jednak rośliny są najczęściej przegęszczone i silna wewnętrzna konkurencja hamuje ich wzrost. Uzyskana w ten sposób biomasa jest niewielka, stanowi za to rozsadnik chorób i szkodników, kosztem zużycia ogromnych ilości wody. Często pobierana jest cała dostępna dla roślin woda, co widać po regularnym wędnięciu, szczególnie samosiewów rzepaku.

Porośnięte samosiewami pole sprawia trudności w wykonaniu orki siewnej, zwłaszcza pod wcześnie siane rośliny – rzepak i jęczmień ozimy. Problem stanowi nie tyle przykrycie powstałej biomasy, ile przede wszystkim brak wilgoci w glebie. W skrajnych przypadkach orka jest niemożliwa aż do większych opadów deszczu. Nawet jeśli orkę można wykonać w terminie, to wymaga ona więcej i intensywniej przeprowadzonych zabiegów doprawiających, czyli kolejnego zwiększania intensywności uprawy i przesuszania roli. Wyrośnięte samosiewy utrudniają kolejne zabiegi uprawowe oraz zużywają ogromne ilości wody (ryc. 7)

Kilkakrotnie powtarzane, ale płytkie i w terminie wykonane uprawki późniwne wymagają mniej czasu i paliwa, niż wynosi różnica w kosztach orki siewnej i jej



Ryc. 7. Przykład wyrosniętych samosiewów (fot. T. Piechota)

doprawienia w porównaniu do pola zarośniętego samosiewami. Najważniejsza jest jednak zatrzymana woda, która bywa bezcenna w początkach wegetacji rośliny następczej.

Za kombajnem zbożowym pozostaje na polu znacznie więcej ścierni i plew niż po snopowiązałce czy kosie. Dlatego pług podorywkowy słabo sobie radzi na polu po zbiorze kombajnem, nawet jeśli zebrano słomę. Duża ilość pozostałej biomasy wymaga zmiany narzędzi stosowanych do uprawy późniwej. Rynek oferuje wiele różnych narzędzi zastępujących pług podorywkowy, które umożliwiają wydajną uprawę na bardzo różną głębokość. Powszechnie znane są brony talerzowe lub ciężkie kultywatory o sztywnych zębach, jednak nie wszystkie konstrukcje umożliwiają odpowiednio płytką pracę; niektóre modele kultywatorów wymagają minimalnej głębokości rzędu 10 cm. Do najpłycej pracujących narzędzi należą brony łopatkowe i brony sprężyste. Te ostatnie niekiedy pracują na głębokości 0,5 cm, na granicy uprawy roli i pielęgnacji ścierni. Dzięki dużej szerokości roboczej i prędkości pracy oraz stosunkowo małemu zapotrzebowaniu mocy są bardzo dobrym narzędziem do pielęgnacji podorywki i wielokrotnych zabiegów na samosiewy. Wymagają jednak bardzo terminowego przeprowadzenia uprawek, praktycznie na wschodzące samosiewy i chwasty.

Orka siewna pod oziminy może w dużej mierze zaważyć na ilości wody w glebie. Jak wcześniej wspomniano, orka wpływa na obniżenie zawartości materii

organicznej i długofalowo pogarsza właściwości wodne gleby. Ma też silny, bezpośredni wpływ na aktualny zapas wody w glebie. Poważne straty wody następują, gdy gleba pozostaje po orce niewyrównana, szczególnie jeśli jest zbrylona. Wielokrotnie zwiększona powierzchnia kontaktu z powietrzem i bezpośrednim działaniem słońca doprowadza w końcu do głębokiego wysychania dużych mas gleby. Utracona zostaje nie tylko woda dostępna dla roślin, lecz także część wody niedostępnej. Natychmiastowe wyrównywanie pola po każdym intensywnym zabiegu, szczególnie po orce, staje się więc koniecznością. Wzorem jest tu agregatowanie narzędzi wyrównujących z pługiem. Nawet kilka godzin w letnim słońcu może bowiem przesunąć „wyskibioną” rolę. Wyschnięta gleba nie tylko straciła część wody, ale również będzie trudniejsza do uprawy, co wymaga intensywniejszych uprawek i oczywiście zwiększy kolejne straty wody.

Do wstępnego wyrównania roli powszechnie stosowana jest włóka. Pierwotnie była lekką, drewnianą belką używaną, zwłaszcza wczesną wiosną, do delikatnego wyrównywania powierzchni pola. Rozwój mechanizacji umożliwił przekształcenie tego narzędzia w ciężki sprzęt przegarniający ogromne masy gleby, co oczywiście dokładniej równa pole, lecz kosztem intensywnego niszczenia struktury roli i kolejnej utraty wody. Włóka powinna pozostać lekkim narzędziem, najlepiej będącym jednym z pierwszych elementów agregatów doprawiających rolę.

Bardzo destrukcyjne dla struktury roli mogą być narzędzia aktywne, napędzane od wałka przekaznika mocy. To kusząca opcja dla rolników, ponieważ są zazwyczaj krótkie i łatwe do agregatowania z siewnikami oraz przygotowują rolę do siewu, nawet pracując w surowej orce, bez jakiegokolwiek wcześniejszego wyrównania. Potrafią też rozkruszać glebę zbyt suchą dla innych narzędzi. Prowadzi to jednak do rozpylenia gleby i jej znacznego napowietrzenia, powodując znaczne przyspieszenie procesu ubytku próchnicy. Mocno rozpylona gleba sprzyja też zaskorupieniu, nawet po niezbyt silnych deszczach, co pogarsza wsiąkanie wody z opadów. Dlatego narzędzia aktywne powinny być stosowane bardzo ostrożnie, na możliwie najmniejszą głębokość, przy możliwie najmniejszej prędkości obrotowej oraz jak najrzadziej.

W zespole uprawek przedsięwziętych powinno wystarczyć doprawienie roli na głębokość siewu nasion. Wymaga to jednak bardzo starannego wykonania wcześniejszych zabiegów i korzystnych warunków, szczególnie odpowiedniej wilgotności roli w czasie zabiegów. Duże znaczenie mają tu, niekiedy wydawałoby się nieistotne, szczegóły. Wystarczy zastosowanie dobrych spulchniaczy śladów za ciągnikiem, by nie trzeba było pogłębiać pracy całego agregatu. Pogłębienie uprawy przedsięwziętej często wynika z konieczności wyrównania głębokich kolein po wcześniejszych przejazdach ciągnika. Na głębokość ugniatania przez koła ma wpływ typ ogumienia, ciśnienie w kołach, zastosowanie kół bliźniaczych czy innych sposobów zmniejszenia ugniatania przez ciągnik. Niektóre koleiny można całkowicie wyeliminować, na przykład rozsiewając nawozy fosforowe i potasowe przed wykonaniem orki.

Dodatkowy efekt wykonywania płytszej uprawy to możliwość zastosowania szerszego narzędzia, co daje również kolejne zmniejszenie ilości kolein na polu. Warto tu przypomnieć, że koleiny to nie tylko problem nierównej powierzchni pola, ale przede wszystkim nadmierne ugniatanie roli pogarszające gospodarkę wodą.

Ponad 15% gleb uprawnych jest wysoce podatna na zagęszczenie, a 22% średnio. Spośród wszystkich województw w naszym kraju największą podatnością na zagęszczenie odznaczają się: dolnośląskie, małopolskie, opolskie i podkarpackie. Szczególnie zagrożone są gleby w dolinach rzecznych, mady (Krasowicz i in. 2011). Podatność gleby na ugniatanie w dużej mierze zależy od jej składu granulometrycznego i zawartości materii organicznej. Szczególnie narażone są gliny ciężkie, ility i gliny lekkie oraz wszystkie gleby o niskiej zawartości próchnicy. Skład granulometryczny jest wartością stałą, jednak zawartość próchnicy w dużej mierze zależy od stosowanych praktyk agrotechnicznych. Dbłość o glebową materię organiczną stanowi ważny element ograniczania nadmiernego zagęszczenia gruntu.

Jedynym w pełni skutecznym sposobem ograniczenia negatywnych skutków przejazdów jest zmniejszenie ich liczby. Niestety, w konwencjonalnej uprawie roli mamy do czynienia z uprawką późniwną, orką, doprawianiem, siewem i zbiorem. Najgroźniejszy jest jednak pierwszy wjazd ciągnikiem, szczególnie na luźną glebę, który odpowiada za 85% ugniecenia (Raper 2005).

Rozwiązaniem pozwalającym ograniczyć ugniatanie gleby przez koła jest korzystanie ze ścieżek przejazdowych. W systemie stałych ścieżek technologicznych (ang. *controlled traffic farming*) wszystkie przejazdy odbywają się po wyznaczonych ścieżkach, które utrzymywane są stale, czyli przez wiele lat, w tych samych miejscach. W ten sposób reszta pola jest całkowicie wolna od kolein. Technologia stałych ścieżek wymaga dopasowania wszystkich maszyn i zabiegów agrotechnicznych do wyznaczonych ścieżek. Nie tylko szerokości robocze, lecz także rozstawy kół muszą być dopasowane do siebie. Pełne wprowadzenie takiego systemu jest dość uciążliwe na początku, a później wymaga pewnej dyscypliny i uważności w stosowaniu; bardzo pomocne są tutaj systemy precyzyjnego prowadzenia maszyn. Można korzystać częściowo z założeń systemu: zakładać ścieżki technologiczne w tych samych miejscach, wszelkie przejazdy po polu w miarę możliwości prowadzić po ścieżkach, również po zbiorze roślin, na przykład transport ziarna i słomy, rozsiew nawozów mineralnych, rozrzucanie obornika i rozlew gnojowicy.

Największe możliwości zmniejszenia intensywności uprawy roli dają różne sposoby uprawy bezorkowej oraz skrajne ograniczenie uprawy do zera, połączone z siewem bezpośrednim.

Siew bezpośredni, czyli całkowite zaniechanie mechanicznej uprawy roli, jest powszechnie rekomendowanym sposobem na ochronę gleby przez erozją. Z tego powodu najszybciej i najpowszechniej przyjął się w praktyce w Ameryce Północnej i Ameryce Południowej (Holland 2004, Lal i in. 2007). Trwałe stosowanie siewu bezpośredniego sprzyja również odbudowie zasobów materii organicznej

i struktury gleby zniszczonych przez intensywną uprawę roli. Całkowita rezygnacja z uprawy roli prowadzi jednak często do obniżenia poziomu plonowania roślin.

Pittelkow i in. (2015) w bardzo szerokiej metaanalizie przeprowadzonej na wynikach prawie 700 doświadczeń wykazują, że średnio obniżenie plonów wynosiło 5,1%, jednak w niektórych kategoriach, na przykład roślinach korzeniowych, przekraczało 20%. Wśród analizowanych czynników decydujących o powodzeniu siewu bezpośredniego za najważniejsze uznano dobór gatunków do uprawy, warunki wilgotnościowe i sposób postępowania z resztkami roślinnymi. Najbardziej jednoznacznie wykazano, że w warunkach suchych, bez dodatkowego nawadniania, plony po siewie bezpośrednim dorównują, a często nawet przekraczają uzyskane po uprawie tradycyjnej. Dla większości analizowanych grup roślin plony po siewie bezpośrednim w pierwszych latach od rezygnacji z uprawy roli były niższe niż w uprawie tradycyjnej, natomiast po około 5 latach wyrównywały się, a później często nawet przewyższały uzyskane po pełnej uprawie roli.

Siew bezpośredni w całości polega na glebie i jej kondycji. Pola uprawne w Polsce są od setek lat poddawane uprawie roli i ich właściwości są bardzo dalekie od naturalnych. Dlatego przejście na siew bezpośredni jest posunięciem dość ryzykownym produkcyjnie, choć bardzo korzystnym dla gleby.

Mamy obecnie możliwość czerpania z wielu różnych technologii bezorkowych pozwalających uniknąć problemów występujących w siewie bezpośrednim. Przydatność poszczególnych z nich do konkretnego gospodarstwa zależy od specyficznych uwarunkowań siedliskowych, agrotechnicznych i technicznych.

Technologie bezorkowej uprawy roli, zwane również uproszczonymi, są również łatwiejsze do zastosowania niż siew bezpośredni. Polegają najczęściej na płytkiej uprawie całej powierzchni roli za pomocą ciężkich kultywatorów lub bron talerzowych i jej doprowadzeniu. Popularność tych sposobów uprawy wynika z dostępności odpowiedniego sprzętu rolniczego. Poza wspomnianymi przy omawianiu uprawy późniejszej kultywatorami i bronami talerzowymi popularne stają się również siewniki wyposażone w redlice talerzowe pracujące sprawniej na polu, na którym nie wykonano orki, niż tradycyjne siewniki o redlicach stopkowych. Określenie „uprawa uproszczona” stało się synonimem takiego właśnie sposobu uprawy roli i większość rolników nie zdaje sobie sprawy, że istnieje wiele innych technologii uprawy bezorkowej. Wyniki wykazują wyższość „uprawy uproszczonej” nad siewem bezpośrednim, jednak nie zawsze dorównuje ona efektom uzyskanym w uprawie płuznej. Główną przyczyną to brak spulchniania głębszych warstw roli. Większość gleb, ze względu na znaczne odpróchniczenie, na skutek wieloletniej, intensywnej uprawy roli ma znaczną skłonność do osiadania. Dlatego takie technologie najlepiej sprawdzają się na glebach o w miarę dobrej kulturze, zmianowaniu i przy intensywnym nawożeniu organicznym.

Poza płytką uprawą uproszczoną dostępne są również i coraz częściej stosowane w praktyce technologie bezorkowe z głębokim spulchnianiem roli, które rozwiązują

większość problemów spotykanych przy uprawie płytkiej. Przede wszystkim ułatwiają głęboki rozwój korzeni roślin. Z jednej strony pozwala to na korzystanie ze zgromadzonych zapasów wody, z drugiej – korzenie roślin są ważnym elementem odbudowy naturalnej sieci przestworów glebowych.

Rośliny wymagają do wzrostu zbalansowanej ilości wody i powietrza, które wypełniają przestwory między fazą stałą. Wraz z zagęszczaniem gleby maleje udział porów glebowych, w pierwszej kolejności tych o dużych średnicach, w których krąży powietrze. Zrezygnowanie z uprawy roli w dłuższym czasie przywraca glebie jej naturalną porowatość. W systemach uprawy uproszczonej wracają naturalne mechanizmy, które zmniejszają jej gęstość. Podstawowe znaczenie ma zawartość próchnicy, która rośnie po zaniechaniu uprawy orkowej; równocześnie tworzy się również sieć przestworów o dużej średnicy, co oznacza szybki przepływ wody i swobodny ruch powietrza. Kanaliki pochodzenia biologicznego, głównie po obumarłych korzeniach i po aktywności dżdżownic, mają dużą długość i ciągłość połączeń, tworząc sieć ułatwiającą pionowy i poziomy ruch wody. Są również wykorzystywane przez korzenie uprawianych następczo roślin.

Poprawa struktury roli i wykształcenie systemu bioprzestworów ułatwia wsiąkanie wody w głębsze warstwy gleby, z dala od jej powierzchni. Zmniejsza również ilość wody traconej przez spływ w zagłębienia terenu. Nie występuje też skorupa glebowa, poprawia się więc wykorzystanie opadów, zwłaszcza intensywnych, które wraz ze zmianami klimatu są coraz częstsze.

Jedną z ważniejszych korzyści związanych z uproszczeniem uprawy roli jest oszczędność czasu potrzebnego na te zabiegi. Pozwala wykonać zabiegi bardziej terminowo oraz w korzystniejszych warunkach; można ominąć okresy niesprzyjającej pogody. Jest to również większa szansa na terminowy siew w korzystniejszych warunkach wilgotnościowych oraz szansa na wykorzystanie nawet niewielkich i sporadycznych opadów.

Kolejną zaletą uprawy bezorkowej (uproszczonej) jest możliwość stosowania zasad uprawy konserwującej. Uprawa konserwująca, poza ograniczeniem intensywności uprawy roli, opiera się na pokryciu powierzchni pola przez mulcz, czyli ściółkę. Za graniczną, najmniejszą wartość pokrycia gleby przyjmuje się 30% powierzchni, po wykonaniu wszystkich zabiegów uprawowych i siewu. Taką klasyfikację przyjęto między innymi w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO), statystyce Unii Europejskiej oraz Europejskiej Organizacji Rolnictwa Konserwującego (ECAAF), ponieważ stanowi nieodłączny element „rolnictwa konserwującego” (Reycosky 2015, Zimny i in. 2015).

Ochronny efekt uprawy konserwującej rośnie wraz ze zwiększaniem ilości ściółki pozostającej na powierzchni i zmniejszaniem ilości wzruszanej gleby. Jako podstawowy materiał mulczujący służą resztki pozbiorowe i plony uboczne, szczególnie słoma zbożowa, a dodatkowym źródłem i uzupełnieniem ilości mulczu są

międzyplony. Ściółka bezpośrednio ogranicza straty wody z gleby przez oddzielenie powierzchni gruntu od powietrza, wiatru i słońca, czyli głównych czynników wysuszających. Parowanie jest dodatkowo ograniczone dzięki obniżeniu temperatury gleby, szczególnie w ciepłych okresach roku.

Ściółka chroni też glebę przed działaniem deszczu, co znacznie zmniejsza zaskorupianie powierzchni oraz zatrzymuje spływy powierzchniowe. Zwiększa się w ten sposób ilość wody, która wsiąka w glebę, a zmniejszają straty. Najwyraźniej jest to widoczne w trakcie intensywnych opadów.

Poza bezpośrednią ochroną wody glebowej przez mulcz podstawowe znaczenie ma korzystny wpływ na przyrost zawartości próchnicy i poprawę trwałości struktury roli. W glebie pokrytej mulczem panują bardziej stabilne warunki sprzyjające procesom mikrobiologicznym, które są odpowiedzialne za przetwarzanie materii organicznej. W uprawie konserwującej ściółka chroni glebę przed utratą wody oraz tworzeniem skorupy glebowej, co jest szczególnie ważne w roślinach wrażliwych na zaskorupienie, takich jak burak cukrowy (ryc. 8).

Obfite, a szczególnie nawalne opady wiążą się z okresowym nadmiarem wody. Podwyższona wilgotność może być niekorzystna, jeśli ograniczone jest jej odprowadzenie i utrzymuje się zbyt długo. W technologiach bezorkowych okresy nadmiaru wody są dużo krótsze niż na terenach oranych dzięki efektywniejszej gospodarce



Ryc. 8. Przykład ściółki konserwującej (fot. T. Piechota)

wodnej. Woda praktycznie na bieżąco odpływa do warstw podglebia i zostaje zmagazynowana na okresy jej niedoboru, a przy rzeczywistym nadmiarze odprowadzona do wód gruntowych. Z tej przyczyny nie występuje nadmiar wody w wierzchnich warstwach gleby i brak jest konieczności mechanicznego podsuszania roli, co stosuje się powszechnie w technologiach orkowych, na przykład powtarzając uprawki przedsiewne po opadach deszczu.

Okres zatrzymania wody w podglebiu jest praktycznie nieograniczony. Rośliny mogą z tego zapasu korzystać pod warunkiem, że ich korzenie swobodnie wrastają do głębszych warstw. Ponieważ w uprawach bezorkowych nie tworzy się podeszwa płużna ani nie zostaje zagęszczane podglebie, za to odtwarza się sieć naturalnych przestworów, korzenie swobodnie się rozrastają i korzystają z wody z podglebia. Jednak gleba która przez wieloletnią uprawę orkową została pozbawiona naturalnej struktury, ma skłonność do nadmiernego osiadania pod wpływem deszczu i własnego ciężaru. Pozostają również warstwy nadmiernie ugniecione w okresie stosowania uprawy orkowej, począwszy od kolein, przez podeszwę płużną aż do zagęszczonego podglebia. W pierwszych latach, zanim w systemie uprawy bezorkowej nastąpi odbudowa struktury gleby, może to stanowić poważną barierę w rozwoju korzeni roślinnych, a w skrajnych sytuacjach trwale ograniczyć głębokość korzenia roślin. Dlatego najpewniejsze w pierwszym okresie po rezygnacji z pługa są technologie bezorkowe oparte na głębokim, choć niekoniecznie intensywnym spulchnianiu roli. W wielu przypadkach korzystne jest jednorazowe przeprowadzenie głęboszowania. Jednak, jak wspomniano wcześniej, powinno to być poprzedzone rozpoznaniem sytuacji, aby określić, czy jest to zabieg konieczny, a jeśli tak, to na jaką głębokość. Przed ociepleniem klimatu funkcję głębosza spełniało skutecznie przemarznięcie gleby zimą. W ostatnich latach dzieje się to jednak sporadycznie i na coraz mniejszą głębokość.

W doborze zabiegów uprawowych, ich ilości i głębokości w technologiach bezorkowych, podobnie jak w tradycyjnej uprawie płużnej, obowiązuje założenie, że stosuje się tak dużo uprawy, jak to jest konieczne, ale tak mało, jak to jest możliwe. Przykładem może być pasowa uprawa roli (ang. *strip till*). Specjalistyczny agregat uprawia tylko pas gleby pod przyszły rząd roślin, a międzyrzędzia pozostawia zupełnie niewzruszone. Głębokość uprawy pasowej może być bardzo różna: jeśli zajdzie potrzeba to 35 cm, a jeśli nie ma takiej konieczności, to czasem wystarcza 10 cm. Pole zostaje uprawione w bardzo małej części, najczęściej wystarcza jeden przejazd agregatem uprawowo-siewnym. Pomiędzy rzędami roślin gleba jest nienaruszona, na powierzchni pozostaje cała ściółka, a jednocześnie zostały zapewnione dogodne warunki do siewu roślin, gleba w rzędzie jest spulchniona i szybko się nagrzewa (tab. 6), co sprzyja wschodom, szczególnie buraków i kukurydzy, a później ich ukorzenieniu. Technologia uprawy pasowej łączy więc zalety intensywnej uprawy roli i siewu bezpośredniego, a jednocześnie pozwala znacznie ograniczyć ich wady (Piechota i in. 2013).

Tabela 6

Wpływ sposobu uprawy roli na fizyczne właściwości gleby w rzędzie i międzyrzędziu w warstwie 15-20 cm oraz na temperaturę gleby na głębokości siewu kukurydzy (Piechota i in. 2013)

Miejsce oznaczeń	Sposób uprawy roli			Średnio
	orka	pasowa głęboka	pasowa płytka	
Gęstość objętościowa ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)				
Rząd	1,55 a	1,34 b	1,56 a	1,48 B
Międzyrzędzie	1,55 a	1,51 a	1,54 a	1,53 A
Średnio	1,55 A	1,43 A	1,55 A	
Porowatość ogólna (% v/v)				
Rząd	40,6 b	48,5 a	40,3 b	43,2 A
Międzyrzędzie	41,0 b	42,4 b	41,3 b	41,6 B
Średnio	40,8 B	45,5 A	40,8 B	
Kapilarna pojemność wodna (% v/v)				
Rząd	31,7 b	35,3 a	31,2 b	32,7 A
Międzyrzędzie	32,4 b	32,8 b	32,0 b	32,2 A
Średnio	32,0 B	34,1 A	31,3 B	
Temperatura gleby ($^{\circ}\text{C}$)				
Rząd	17,7 a	17,6 a	17,5 a	17,6 B
Międzyrzędzie	17,7 a	16,6 b	16,5 b	16,9 B
Średnio	17,7 A	17,1 B	17,0 B	

Uprawa uproszczona pozwala ograniczyć liczbę przejazdów po polu, przez co zmniejsza się ugniatanie roli. Jednak równocześnie wykonuje się mniej zabiegów spulchniających, przez co ewentualne ugniecenie roli staje się bardziej niebezpieczne. Wykorzystanie wszelkich możliwości technicznych i organizacyjnych ograniczenia ugniatania jest tu więc równie ważne, a w zasadzie ważniejsze niż w systemach orkowych.

Materia organiczna

Dostarczenie do gleby dużej ilości materii organicznej bezpośrednio zwiększa ilość surowca do produkcji próchnicy glebowej. Wraz ze wzrostem ilości próchnicy nie tylko zwiększa się odporność gleby na zagęszczenie i możliwości korzeni do pobierania wody z głębszych poziomów, lecz także bezpośrednio wzrasta pojemność wodna gleby. Próchnica zatrzymuje wielokrotnie więcej wody niż sama waży, a do tego, przez poprawę struktury roli, optymalizuje jej porowatość i gospodarkę wodną. Pozyskanie dużych ilości materiałów organicznych spoza gospodarstwa jest cennym, ale rzadko i lokalnie dostępnym źródłem materii organicznej. Transport takich materiałów na większe odległości najczęściej bywa nieekonomiczny. Dlatego podstawą gospodarki próchnicą są zasoby gospodarstwa.

Procesy humifikacji i mineralizacji zachodzą w glebie równolegle, aktualna zawartość materii organicznej zależy od bilansu przychodów i rozchodów próchnicy. Najważniejszy element rozchodów próchnicy to mechaniczna uprawa roli, która została omówiona wcześniej. Intensywność mineralizacji próchnicy zależy bezpośrednio od jej intensywności.

Po stronie przychodów materii organicznej najważniejsze miejsce stanowią uprawiane rośliny, a dopiero w drugiej kolejności nawożenie organiczne. Do upraw o silnym, ujemnym wpływie na bilans próchnicy należą warzywa, okopowe i kukurydza, do grupy o niewielkim ujemnym wpływie zboża i oleiste. Pozytywny wpływ na ilość próchnicy w glebie wywierają rośliny strączkowe, a znaczny przyrost próchnicy następuje pod uprawą traw, bobowatych wieloletnich i mieszanek traw z bobowatymi (Kodeks dobrej praktyki rolniczej 2004). Bliższe przyjrzenie się tym grupom roślin wskazuje, że najgorsze z nich to te, w których wykonuje się dużo uprawy mechanicznej, jednocześnie uprawiane są w małej obsadzie i pozostawiają niewiele resztek poźniwnych. Na drugim końcu są rośliny wieloletnie, w których uprawy mechanicznej się nie wykonuje przez kilka lat, za to uprawiane są w zwartym poroście, cały czas zacieniają glebę i pozostawiają dużą ilość resztek poźniwnych, głównie potężną masę korzeni. Niestety, w uprawie dominują zboża, rzepak i kukurydza – rośliny o ujemnym wpływie na bilans próchnicy. Skutkiem wieloletniej uprawy roślin okopowych po sobie jest obniżenie zawartości materii organicznej o prawie połowę, gleba ulega rozpyleniu i zamuleniu, w efekcie woda nie wsiąka i w dużej części bezproduktywnie odparowuje (ryc. 9).



Ryc. 9. Przykład skutków wieloletniej uprawy roślin okopowych po sobie (fot. T. Piechota)

Drugim, najważniejszym pod względem ilości, źródłem materii organicznej są plony uboczne, głównie słoma zbożowa, rzepakowa i kukurydziana. Są to dość trudne do zagospodarowania na polu materiały, a rolnicy od niedawna mają z nimi do czynienia. Wcześniej praktycznie całą słomę zbożową zbierano z pola, a uprawa kukurydzy na ziarno i rzepaku nie była zbyt rozpowszechniona. Problemy z rozkładem słomy w glebie zniechęcają część rolników do jej stosowania i skłaniają do sprzedaży, często po bardzo niskich cenach.

Nierozłożona materia organiczna bywa dużym problem w rozwoju korzeni w głąb. Słoma, w dużych ilościach wprowadzona do gleby, tworzy czasem „matę” odcinającą głębsze warstwy. Największe problemy występują, gdy pozostawiono na polu słomę po zbiorze i wykonano orkę razówkę bez wcześniejszych zabiegów uprawowych. Również orka siewna po podorywce wykonanej pługiem daje podobne efekty.

Aby problemy ze słomą nie występowały, należy wprowadzić kompleksowo zasady gospodarki słomą, co pozwoli zwiększyć stopień wymieszania z glebą i przyspieszy jej rozkład. Pierwszym warunkiem uzyskania sukcesu jest dokładne pocięcie i równomierne rozrzucenie słomy po powierzchni pola, niezależnie, czy stosuje się typową uprawę płużną, czy technologie bezorkowe. Następnie należy dokładnie wymieszać z glebą, stosując narzędzia i sposoby opisane wcześniej w części dotyczącej uprawy poźniwej. Kolejny warunek to uzupełnienie ilości azotu, którego w słomie jest bardzo mało w stosunku do ilości węgla.

Niedocenianym czynnikiem wpływającym na rozkład materii organicznej oraz wykorzystanie wody w glebie jest odpowiedni odczyn. Zbyt niskie pH hamuje rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za przemiany zachodzące w glebie, w tym rozkład słomy i tworzenie próchnicy.

Bioróżnorodność

Powyżej wielokrotnie wspomniano o właściwościach fizycznych i chemicznych a szczególnie o znaczeniu próchnicy glebowej dla efektywnej gospodarki wodnej gleby. Wzrost zawartości próchnicy jest zarówno przyczyną, jak i diagnostycznym wskaźnikiem poprawy kondycji gleby (Obalum i in. 2017). Fizyczne i chemiczne właściwości gleby są ściśle powiązane z zachodzącymi w niej procesami biologicznymi. Wszelkie przemiany chemiczne, a w dużej części również fizyczne są skutkiem działalności żywych organizmów glebowych. Dbałość o nie jest podstawą uzyskania sprawnej gleby, ze wszystkimi pozytywnymi następstwami. Podstawowym zadaniem w tym zakresie jest utrzymanie bioróżnorodności pola uprawnego i otaczających terenów.

Poważnym problemem, którego jednak nie widać, bo jest ukryty pod ziemią, a do tego mikroskopowej wielkości, jest brak odpowiedniej mikroflory glebowej.

Naturalnym stanem zdrowej gleby jest występowanie tysięcy różnych mikroorganizmów rozwijających się głównie na powierzchni korzeni roślinnych. Każdy gatunek rośliny ma swój własny zestaw mikrobów. Każdy rodzaj korzeni wywiera też inny wpływ na glebę. Zboża, które dominują w zmianowaniu, posiadają płytki, wiązkowy system korzeniowy, którego wpływ na porowatość gleby jest niewielki, ograniczony praktycznie do warstwy ornej. Brakuje roślin o silnym, palowym systemie korzeniowym przerastającym głęboko do podglebia.

Podstawą bioróżnorodności wszelkich mikro- i makroorganizmów pola uprawnego są porastające je rośliny, dlatego niezbędne jest stosowanie, choć w minimalnym zakresie, prawidłowego płodozmiannu. Rośliny polecane jako uzupełnienie i wzbogacenie zmianowania, na przykład rośliny strączkowe, są postrzegane jako mało opłacalne i dlatego rzadko uprawiane. Jednak należy rozpatrywać zmianowanie jako całość, uwzględniając poprawę zdrowotności i plonowania pozostałych roślin oraz korzystny, długofalowy wpływ na glebę.

Cennymi a jednocześnie łatwymi do wprowadzenia w zmianowaniu elementami, które zwiększają bioróżnorodność, dostarczają dodatkowej biomasy, chronią przed erozją i sprzyjają tworzeniu struktury są międzyplony, szczególnie ścierniskowe. Są relatywnie tanie w uprawie i nie ingerują w uprawy produkcyjne.

Wielogatunkowe międzyplony zwiększają bioróżnorodność, a jednocześnie realizują wiele innych, ważnych zadań (ryc. 10).



Ryc. 10. Przykład wielogatunkowych upraw jako międzyplonów (fot. T. Piechota)

Szczególnie dużą różnorodność gatunków do uprawy można zastosować w międzyplonach przeznaczonych na zielony nawóz. Standardem w takiej sytuacji powinny być mieszanki wielogatunkowe, składające się co najmniej z 4-5 gatunków. Górna granica praktycznie nie istnieje, a w praktyce spotyka się mieszanki zawierające po kilkanaście różnych roślin. Wprowadzenie takiej mieszanki do zmianowania, w którym występuje zaledwie kilka, w praktyce często 2-3 gatunki, jest zwielokrotnieniem bioróżnorodności roślin, za którą postępuje bioróżnorodność mikroorganizmów glebowych. Niektóre gatunki z bardzo głębokimi systemami korzeniowymi „meliorują” głębsze warstwy gleby. Zalicza się do nich przede wszystkim rzodkiew oleista i korzeniowa oraz łubiny.

Rolnictwo konserwujące

Najlepsze efekty przynosi kompleksowe stosowanie wszystkich możliwych sposobów poprawy sytuacji. Rolnictwo konserwujące polega na łącznym stosowaniu trzech zasad:

- stałe utrzymanie pokrycia powierzchni roli przez mulcz (martwy lub żywy)
- całkowita rezygnacja z intensywnych zabiegów uprawy roli
- zachowanie bioróżnorodności pola uprawnego (Reicosky 2015).

Na tych trzech filarach opiera się budowa zdrowej gleby, a zdrowa gleba to podstawa efektywnej gospodarki wodnej. Niestety, Europa jest jednym z rejonów, w których rozpowszechnienie uprawy konserwującej jest niewielkie, a w pełni stosowanego rolnictwa konserwującego jeszcze bardziej ograniczone. Jedynie 5% gruntów ornych spełnia zasady rolnictwa konserwującego wobec średniej światowej wynoszącej 12,5% (Kassam i in. 2019).

Założenia i zasady rolnictwa konserwującego są uniwersalne dla całego światowego rolnictwa, ale sposoby ich stosowania zróżnicowane lokalnie (Reycosky 2015). Światowi eksperci FAO zapewniają, że jak do tej pory nie napotkali takiej rośliny rolniczej i takich warunków siedliskowych, w których nie można by stosować technologii rolnictwa konserwującego (Reycosky 2015).

Największym ograniczeniem w stosowaniu zasad rolnictwa konserwującego pozostaje brak przekonania wśród rolników. Odpowiednia wiedza i rozwiązania techniczne w coraz mniejszym stopniu stanowią problem we wprowadzaniu powyższych zasad do polskiego i europejskiego rolnictwa.

Literatura

- González-Sánchez E.J, Moreno-García M., Kassam A., Holgado-Cabrera A., Triviño-Tarradas P., Carbonell-Bojollo R., Pisante M., Veroz-González O., Basch G. (2017): Conservation agriculture: making climate change mitigation and adaptation real in Europe. European Conservation Agriculture Federation, Brussels, Belgium.
- Grzebisz W., Diatta J., Szczepaniak W. (2013): Środowiskowe skutki zakwaszenia gleb uprawnych. Stud. Rap. IUNG PIB, 34, 8, 19-26.
- GUS (2020): Środki produkcji w rolnictwie, w roku gospodarczym 2018/2019.
- Holland J. (2004): The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 103, 1-25.
- Jadczyzyn T., Ochal P. (2013): Zakwaszenie gleb i potrzeby wapnowania. Stud. Rap. IUNG-PIB, 34, 8, 9-18.
- Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. (2019): Global spread of conservation agriculture. *Int. J. Environ. Stud.*, 76, 1, 29-51.
- Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej. (2004): Red. I. Duer, M. Fotyma, A. Madej. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Ministerstwo Środowiska. Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa, Warszawa.
- Krasowicz S., Oleszek W., Horabik J., Dębicki R., Jankowiak J., Stuczyński T., Jadczyzyn J. (2011): Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Pol. J. Agron.*, 7, 43-58.
- Kuś J. (2015): Glebowa materia organiczna – znaczenie, zawartość i bilansowanie. Stud. Rap. IUNG-PIB, 45(19), 27-53.
- Kuś J., Kopiński J. (2012): Gospodarowanie glebową materią organiczną we współczesnym rolnictwie. *Zagad. Doradz. Roln.*, 2, 5-28.
- Lal R., Reicosky D., Hanson J. (2007): Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.*, 93, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Obalum S., Chibuike G., Peth S., Ouyang Y. (2017): Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environ. Monit. Assess.*, 189 (176), 1-19.
- Piechota T., Zbytek Z., Kowalski M., Dach J. (2013): Wpływ pasowej uprawy roli i mechanicznego zwalczania chwastów na fizyczne właściwości gleby w uprawie kukurydzy w plonie wtórnym. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 58(4): 104-108.
- Pittelkow C., Linqvist B., Lundy M., Liang X., Groenigen K., Lee J., van Gestel N., Six J., Venterea R., Kessel C. (2015): When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Res.*, 183, 156-168.
- Raper R.L. (2005): Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramech.*, 42(3-4), 259-280.
- Reicosky D. (2015): Conservation tillage is not conservation agriculture. *J. Soil Water Conserv.*, 70, 5, 103-108.
- Zimny L., Zych A., Waclawowicz R. (2015): Systemy uprawy buraka cukrowego w Polsce w badaniach ankietowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 581, 135-145.

Nawadniać czy nie nawadniać, dylematy współczesnego rolnictwa

Roman Rolbiecki

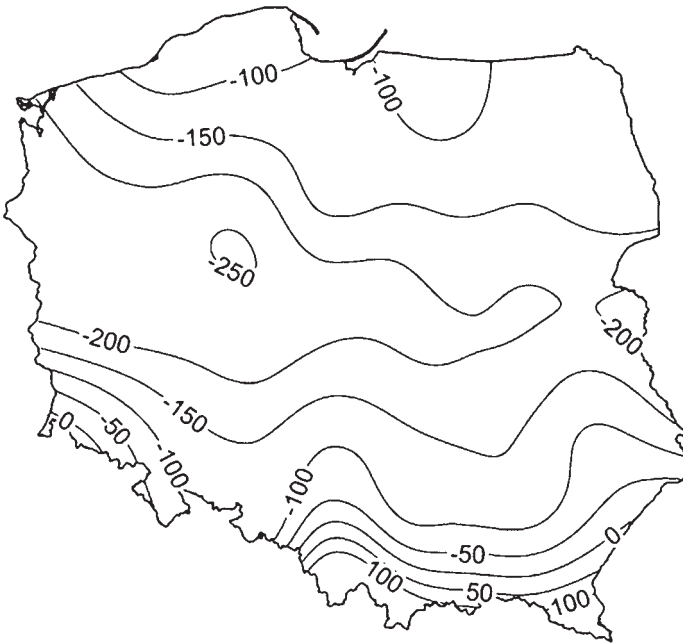
Według danych ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) obecnie na świecie nawadnia się wszystkimi systemami ponad 270 mln ha gruntów, co stanowi 18% powierzchni przeznaczonej pod uprawy. Z tej powierzchni uzyskuje się około 40% światowej produkcji żywności. Przeważająca część nawadnianej powierzchni jest położona w strefach klimatycznych stale lub okresowo suchych bądź półsuchych, w których uprawa roślin bez nawadniania byłaby w ogóle niemożliwa. Na obszarach tych główną przesłankę zastosowania nawodnień stanowi kryterium klimatyczne, a ściślej mówiąc stały lub powtarzający się co roku w tej samej porze sezonowy brak opadów atmosferycznych (Rzekanowski i in. 2011, Rolbiecki 2013)

Polska leży w strefie klimatycznej charakteryzującej się opadami atmosferycznymi zasadniczo wystarczającymi do produkcji roślinnej. Jednak o ile sumaryczne wielkości opadu w sezonie wegetacyjnym są wystarczające, to ich rozkład jest nieregularny zarówno pod względem natężenia, jak i ilości w ujęciu miesięcznym i dekadowym. Dlatego w konkretnych sezonach wegetacji lub ich częściach obserwujemy coraz częściej występujące braki opadów, tzw. okresy posuszne (susze atmosferyczne), spowodowane w dużej mierze zmianami klimatycznymi. W ujęciu średnim wieloletnim niedobory te wynikają ze zbyt małej ilości opadów w porównaniu z zapotrzebowaniem roślin, wyrażanym za pomocą wskaźników ewapotranspiracji lub opadów optymalnych (Rzekanowski i in. 2011). Stąd głównym celem nawadniania jest



uzupełnianie okresowych niedoborów opadów atmosferycznych w stosunku do wymagań wodnych roślin uprawnych. Dlatego nawodnienia w Polsce są stosowane zaledwie na około 2-2,5% powierzchni użytków rolnych. Wynika to z jednej strony z charakteru nawadniania (uzupełnienie niedoborów opadów) i z drugiej strony ze struktury zasiewów (ok. 75% powierzchni to rośliny zbożowe).

W warunkach klimatycznych Polski największe deficyty opadów atmosferycznych, wybitnie niekorzystne bilanse wodne oraz zwiększone częstotliwości występowania długotrwałych okresów bezopadowych występują w środkowej części kraju, tzw. Krainie Wielkich Dolin (Rolbiecki 2013, Łabędzki i in. 2011). Wartości liczbowe klimatycznego bilansu (KBW) w sezonie wegetacyjnym przedstawia rycina 11.



Ryc. 11. Średni klimatyczny bilans wodny (mm) w sezonie wegetacyjnym w Polsce (Łabędzki i in. 2011)

Potrzeby nawadniania roślin w Polsce

Potrzeby nawadniania roślin w Polsce wynikają głównie z występowania niedoborów opadów atmosferycznych, które w okresie wegetacyjnym stanowią główne źródło wody dla roślin. Niedobory opadów opisuje się jako różnicę między wskaźnikami potrzeb wodnych roślin a rzeczywistymi opadami, jakie wystąpiły w całym

okresie wegetacji lub niektórych fazach wzrostu i rozwoju roślin. Oblicza się je najczęściej w odniesieniu do całego wielolecia, co pozwala na ocenę zmienności przestrzennej, lub dla kolejnych sezonów wegetacji roślin, a to umożliwia zarazem ocenę ich zmienności czasowej. W warunkach przejściowego klimatu Polski ważniejsza wydaje się analiza zmienności czasowej niedoborów opadów, a zatem potrzeb nawadniania, gdyż warunki zaopatrzenia roślin w wodę w poszczególnych latach różnią się w poszczególnych rejonach i miejscowościach. Mimo wielu przeprowadzonych badań liczbowe ujęcie potrzeb nawadniania roślin napotyka na duże trudności. Wynika to między innymi z niezwykle złożonej zależności wskaźników potrzeb wodnych roślin od kompleksu czynników glebowych i meteorologicznych, a także od różnic gatunkowych i odmianowych uprawianych roślin. Te ostatnie zależą od długości okresów wegetacji, zmienności faz rozwojowych roślin i różnej wrażliwości roślin na niedobory wody (tzw. okresy wzmożonego zapotrzebowania na wodę) oraz od stopnia odporności na warunki posuszne (Rzekanowski i in. 2011).

Potrzeby wodne określa się wskaźnikowo, najczęściej za pomocą opadów optymalnych, potrzeb opadowych lub wyznaczając ewapotranspirację łanu roślin w warunkach optymalnego uwilgotnienia gleby. Wskaźniki opadowe są szczególnie przydatne do klimatycznej oceny potrzeb nawadniania, natomiast wskaźniki ewapotranspiracji mają większe znaczenie w operacyjnym monitorowaniu zużycia wody glebowej, niezbędnym do umiejętnego dozowania dawek nawodnieniowych, czyli sterowania nawadnianiem.

W kontekście przewidywanych i zachodzących w Polsce zmian klimatycznych obserwuje się wzrost zapotrzebowania na wodę do nawadniania ze względu na coraz większe jej niedobory w glebie w okresie letnim. Spowodowane jest to wzrostem temperatur w okresie wegetacji, który wzmacnia ewapotranspirację. Nawadnianie jest w tej sytuacji podstawowym czynnikiem kształtującym stosunki wodne w glebie w czasie występowania długotrwałych okresów bezopadowych, które będą się jeszcze nasilać (Pierzgalski i Jeznach 2006, Kundzewicz 2007, Łabędzki 2009). W warunkach Polski wyróżnia się trzy podstawowe kryteria lokalizacji systemów nawadniających: klimatyczne, glebowe oraz ekonomiczne. Kryterium klimatyczne mówi nam o tym, że systemy nawodnieniowe powinny być instalowane na obszarach charakteryzujących się największymi deficytami opadów atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym, co w warunkach Polski odpowiada tzw. Krainie Wielkich Dolin, czyli obejmuje centralny pas naszego kraju. Strefy celowości lokalizacji urządzeń nawadniających ilustruje rycina 12.

Kryterium glebowe odnosi się do możliwości retencyjnych gleby. Kryterium to mówi, że urządzenia nawadniające powinniśmy stosować na glebach o najmniejszych możliwościach retencyjnych, tzn. glebach najsłabszych, których możliwości magazynowania wody są mocno ograniczone. Chodzi głównie o kompleksy glebowe od żyniego dobrego po bardzo słaby. Na tego typu glebach występuje największe



Ryc. 12. Strefy celowości lokalizacji nawadnień ciśnieniowych według Drupeki na podstawie kryterium klimatycznego (ET_0/P) (Wikipedia)

ryzyko wystąpienia tzw. susz glebowych w okresach bezopadowych. Areal gleb lekkich i bardzo lekkich stanowi w Polsce około 47% gruntów przeznaczonych pod uprawę (Pierzgalski i Jeznach 2006). Do ich głównych wad, jak podają Dzieżyc i Trybała (1989), należy zaliczyć niekorzystne właściwości wodne, takie jak: zbyt duża przepuszczalność, słaby podsiąk, mała retencja wodna, krótkotrwałe zapasy wody łatwo dostępnej dla roślin, szybkie wysychanie gleby, częste, dłuższe i groźniejsze dla roślin okresy posuszne w porównaniu do gleb średnich i ciężkich. Ograniczenia te są tym silniejsze, im luźniejszy jest skład granulometryczny gleby, niższy poziom wody gruntowej (z reguły poza zasięgiem systemu korzeniowego) oraz niskie i źle rozłożone opady atmosferyczne w sezonie wegetacyjnym. Głównie te czynniki obniżają ich produktywność oraz ograniczają wprowadzenie do uprawy roślin intensywnych (Dzieżyc i Trybała 1989, Rolbiecki 2013). Ostatnim kryterium – niezwykle ważnym i w gruncie rzeczy decydującym o podjęciu decyzji czy zainwestować w system nawadniający – jest kryterium ekonomiczne. Czyli nawadniany gatunki roślin, które pod wpływem zabiegu nawadniania pozwolą uzyskać taki przyrost plonu, który zrekompensuje koszty zabiegu oraz pozwoli na osiągnięcie zadowalających efektów finansowych. W warunkach polskiego rolnictwa najlepsze efekty ekonomiczne uzyskuje się, nawadniając rośliny ogrodnicze, a z roślin polowych są to głównie ziemniaki, buraki cukrowe oraz kukurydza na ziarno.

Efekty produkcyjne nawadniania roślin

Podstawowym wskaźnikiem efektów produkcyjnych nawadniania roślin są przeciętne (średnie wieloletnie) przyrosty plonów osiągane pod wpływem zastosowania tego zabiegu. Duże znaczenie gospodarcze mają także zmiany jakości plonu. W przypadku roślin pastewnych ważne jest określenie zmian wartości paszowej, a w przypadku roślin towarowych poznanie wpływu nawadniania na kompleks cech jakościowych, składających się na przydatność plonu do bezpośredniej konsumpcji lub technologii przetwórstwa surowców. Mniejsze znaczenie dla bezpośredniej wyceny efektów produkcyjnych nawadniania roślin ma oszacowanie zmian plonów ubocznych oraz masy resztek pozbiorowych. Warto jednak pamiętać, że ewentualne przyrosty plonów ubocznych zwiększają korzyści związane z zastosowaniem nawodnień, przyczyniając się do zwiększenia produkcji obornika i zapobiegając ubytkom materii organicznej w glebach. Bezpośredni efekt produkcyjny nawadniania w postaci wzrostu plonu i zmian jego jakości jest pochodną powodowanych przez ten zabieg modyfikacji wzrostu i rozwoju roślin. W szczególności nawadnianie wpływa na zmiany aktywności procesów fizjologicznych, budowę morfologiczną i anatomiczną, a w konsekwencji na elementy struktury plonu.

Z kompleksowych badań prowadzonych na przykładzie roślin zbożowych (Karczmarczyk 1999) wynika, że nawadnianie połączone z nawożeniem optymalnymi dawkami NPK powodowało istotne zwiększenie intensywności procesów fizjologicznych zachodzących w liściach roślin, a więc wyższą asymilację CO₂, transpirację oraz przewodność aparatów szparkowych. Intensyfikacja procesów fizjologicznych oraz przedłużenie okresu fizjologicznej sprawności roślin nawadnianych prowadziły do ich intensywniejszego wzrostu, wytworzenia wyższych i grubszych źdźbeł, większych kłosów, a także zwiększenia liczby i masy ziaren w kłosie. Na temat efektów produkcyjnych nawadniania w różnych warunkach glebowych i klimatycznych przeprowadzono w Polsce bardzo dużo badań naukowych. Rezultaty pojedynczych doświadczeń były następnie przedmiotem licznych syntez. Do najbardziej znanych i najczęściej cytowanych prac syntetycznych z tego zakresu zaliczyć można przede wszystkim obszerną monografię Dzieżyca (1988), pracę Dzieżyca i Nowak (1993) oraz Grabarczyka (1987). Analiza zwyczaj plonów uzyskiwanych pod wpływem nawadniania zarówno w poszczególnych doświadczeniach, jak i prezentowanych w wymienionych syntezach prowadzi do wniosku, że wielkość efektów produkcyjnych nawadniania roślin uzależniona jest przede wszystkim od rodzaju gleb, a szczególnie ich właściwości wodnych, określanych najczęściej za pomocą stopnia związłości. Znaczenie ma nie tylko związłość poziomu orno-próchniczego, ale również rodzaj podłoża.

Zgodnie z wynikami wielu doświadczeń wielkość bezwzględnych i względnych zwyczaj plonu pod wpływem nawadniania oraz efekty jednostkowe wyrażone przyrostem plonu na 1 mm wody nawodnieniowej są tym większe, im gleba jest

lżejsza. Największe efekty występują na glebach piaszczystych o niskim poziomie wód gruntowych, charakteryzujących się małą pojemnością wodną, a zatem małą zdolnością do ciągłego zaopatrywania roślin w wodę. Wraz ze wzrostem stopnia zwięzłości i retencji wodnej gleb efekty nawadniania systematycznie maleją. W nielicznych doświadczeniach prowadzonych na glebach ciężkich lub bardzo ciężkich (mada żuławska, gleba lessowa) nie uzyskano istotnych różnic w plonowaniu roślin nienawadnianych i nawadnianych. W niektórych latach zaznaczyło się nawet ujemne oddziaływanie nawadniania, na przykład wskutek zwiększenia stopnia wylegania roślin (Żarski 2006). W przypadku rozpatrywania wpływu czynnika glebowego na osiągnięte zwyczki plonów poszczególnych gatunków i odmian ważne jest nie tylko określenie ich bezwzględnych, względnych i jednostkowych wielkości, lecz także ocena możliwości plonotwórczych roślin, uprawianych na różnych glebach w warunkach nawadniania. Należy zwrócić uwagę, że plonowanie roślin nawadnianych na glebach niższych kategorii zaledwie dorównuje plonowaniu uzyskiwanemu na lepszych glebach bez nawadniania. W związku z tym nawadnianie roślin na glebach słabszych (kompleks żytni bardzo słaby, słaby i dobry) jest zabiegiem zaledwie wyrównującym ich szanse produkcyjne w stosunku do gleb lepszych (kompleks żytni bardzo dobry i kompleksy pszenne). Jednak, co trzeba podkreślić, zabieg nawadniania na glebach kompleksów słabych pozwala na wprowadzenie do uprawy roślin intensywnych (głównie warzyw), które bez nawadniania na tego typu glebie nie mogłyby być uprawiane.

Badania naukowe prowadzone w rejonie Bydgoszczy od ponad 40 lat wykazały dużą celowość zastosowania nawadniania jako podstawowego czynnika plonotwórczego na glebach o małej zdolności retencyjnej. Osiągany pod wpływem tego zabiegu wzrost plonów był znacznie wyższy niż na glebach o większej zawartości części spławialnych. Przykłady efektów produkcyjnych osiągniętych pod wpływem nawadniania różnymi metodami na glebach kompleksów słabych przedstawiają tabele 7 i 8, a ryciny 13-15 obrazują przykłady nawadniania kropłowego pędów i zbioru szparagów.

W praktyce stosowanie nawodnień zależy nie tyle od potrzeb i efektów określanych zwyczają plonu i poprawą jego jakości, ile od opłacalności przedsięwzięcia. Opłacalność nawadniania można obliczyć, znając koszty nawodnień jak również zwiększone koszty rolnicze (koszty zbioru zwiększonego plonu) oraz wartość osiągniętych przyrostów produkcji (przyrostów plonów uzyskanych dzięki nawadnianiu).

Opłacalność nawadniania mierzy się zwykle w wartościach względnych odzwierciedlających stosunek między nakładami a wartością produkcji. Najczęściej efektywność nawadniania przedstawia się w postaci tzw. wskaźnika opłacalności. W tabeli 9 przedstawiono ekonomiczne efekty stosowania nawodnień w postaci wskaźnika opłacalności nawadniania wybranych gatunków roślin – tzn. efektywność ekonomiczna nawadniania jest tym większa, im wyższa wartość wskaźnika opłacalności.

Tabela 7

Efekty produkcyjne nawadniania kropłowego wybranych upraw ogrodniczych w rejonie Bydgoszczy

Gatunek	Średni wieloletni przyrost plonu (w nawiasie zakres przyrostów plonów w wieloleciu)	
	t · ha ⁻¹	kg · mm ⁻¹
Burak ćwikłowy	17,4 (3,6–24,8)	108 (89–113)
Marchew jadalna	22,6 (6,8–37,2)	140 (44–162)
Rzodkiewka	6,5 (5,7–7,1)	100 (88–110)
Cukinia	26,2 (15,1–32,8)	104 (75–119)
Dynia olbrzymia	39,4 (33,5–45,2)	323 (266–447)
Dynia zwyczajna	32,9 (27,6–41,4)	143 (113–180)
Szparag	2,9 (2,0–4,1)	22 (16–32)
Aronia	6,2 (0,1–9,2)	35 (0,3–44)
Porzeczka	8,4 (1,6–11,8)	46 (9–63)
Truskawka	7,2 (0,5–10,6)	48 (2–84)

Tabela 8

Efekty produkcyjne deszczowania wybranych upraw rolniczych na glebie bardzo lekkiej w rejonie Bydgoszczy

Gatunek	Średni wieloletni przyrost plonu (w nawiasie zakres przyrostów plonów w wieloleciu)	
	t · ha ⁻¹	kg · mm ⁻¹
Pszemica jara	2,27 (1,95–2,65)	19,2 (16,1–21,7)
Jęczmień jary	2,37 (1,14–3,73)	19,5 (15,2–20,0)
Owies	2,09 (1,28–3,32)	16,3 (12,8–21,1)
Burak cukrowy	19,8 (4,3–37,7)	115 (60–141)
Ziemniak wczesny	13,1 (6,7–22,6)	135 (62–231)
Ziemniak późny	19,8 (15,4–23,6)	138 (110–175)
Łubin żółty	1,04 (0,77–1,48)	9,5 (5,4–17,0)
Bobik	3,07 (1,38–4,20)	35,0 (22,3–46,7)
Kukurydza na ziarno	4,12 (1,80–6,42)	28,0 (31,1–38,9)

Tabela 9

Ekonomiczne efekty nawadniania (Jankowiak i Rzekanowski 2006)

Gatunek	Wskaźnik opłacalności
Pszemica ozima	35-81
Ziemniak	121-217
Burak cukrowy	153-170
Kapusta głowiasta	241
Cebula	364-394
Marchew jadalna	419-529
Truskawka	447



Ryc. 13. Nawadnianie kroplowe pędów asymilacyjnych szparaga (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 14. Plantacja szparagów w trakcie zbiorów (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 15. Wypustki szparagów podczas zbioru (fot. R. Rolbiecki)

Perspektywy nawadniania roślin w Polsce

Rolnictwo w dobrze funkcjonującej gospodarce kraju musi być nowoczesne i konkurencyjne. Nowoczesne, aby było zdolne do wprowadzania technologii dostosowanych precyzyjnie do wymagań nowych odmian roślin, w tym technologii ekologicznych, a ponadto nowego sprzętu i nowych środków ochrony. Wymogi jakościowe stawiane żywności wymagają stosowania na szeroką skalę precyzyjnych technik nawodnieniowych umożliwiających fertygację i zaawansowaną automatyzację. Techniki nawodnieniowe przechodzą w większości krajów zmiany jakościowe, w wyniku czego grawitacyjne systemy powierzchniowe są zastępowane systemami ciśnieniowymi, które zapewniają oszczędne gospodarowanie wodą. Szczególnie ważny jest ostatni argument, bowiem obserwowane ostatnio zmiany klimatyczne przyczyniają się do wzrostu częstotliwości i intensywności susz w rolnictwie. Możliwe do pozyskania w celach nawodnieniowych zasoby wody powinny być w Polsce wykorzystywane w sposób szczególnie racjonalny. Większość naukowców jest zgodna, że największe możliwości stwarzają tu mikronawodnienia, dające szansę na wzrost powierzchni nawadnianej przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia wody (Łabędzki 2009, Rolbiecki 2013). Dopiero w dalszej kolejności przewidywany jest

rozwój deszczowania i na końcu nawodnień podsiąkowych, głównie opartych na retencji własnej zlewni. Problem skoku jakościowego, w którym na pierwszym miejscu stawiana jest efektywność wykorzystania wody, z dużym sukcesem rozwiązywano już w innych krajach, na przykład w Izraelu. Dlatego wydaje się być przesądzone, iż nawodnienia znajdą zastosowanie w następujących obszarach związanych z rolnictwem takich jak:

- polowe towarowe warzywnictwo i sadownictwo
- szklarnie i uprawy pod osłonami
- deszczowanie upraw polowych
- szkółkarstwo i produkcja leśnego materiału nasadzeniowego
- tereny poddawane rekultywacji
- przydomowe trawniki
- ogrody i tereny rekreacyjne
- nawodnienia podsiąkowe użytków zielonych.

Według Rzekanowskiego i in. (2011) w analizach perspektyw rozwoju nawodnień trzeba również uwzględnić źródła wody i możliwości jej pozyskiwania. Według różnych analiz nawodnienia ciśnieniowe w Polsce do 2025 roku powinny objąć około miliona hektarów. Największe możliwości będą miały gospodarstwa z bezpośrednim dostępem do wody lub łatwością jej pozyskania, a więc położone w pobliżu rzek, jezior i różnych zbiorników wodnych bądź mające możliwość eksploatacji odnawialnych i płytko zalegających zasobów wód podziemnych; są to na przykład obszary niecki mazowieckiej i łódzkiej. Z analiz przeprowadzonych w ośrodku bydgoskim wynika, że w Krainie Wielkich Dolin takie warunki spełniają gospodarstwa producenckie na około 750 tys. ha gleb. Są to potencjalne tereny, na których w pierwszej kolejności powinno się propagować i wspierać rozwój nawodnień tak deszczownianych, jak i kropłowych. Według przeprowadzonej analizy w ośrodku bydgoskim źródeł wody do nawodnienia 750 tys. ha jest wystarczająco dużo. Przyjmując, że średnio w sezonie wegetacyjnym należałoby dostarczyć 1500 m³ wody na 1 ha, potrzeba byłoby łącznie 1125 mln m³. Potencjalne zasoby wód w Krainie Wielkich Dolin wynoszą według szacunków kilkakrotnie więcej, nawet biorąc pod uwagę, że jest to obszar o najniższym odpływie jednostkowym w Polsce (średnio 3 l · s⁻¹ · km⁻²). Według Rzekanowskiego i in. (2011) składałoby się na to: zatrzymanie 10% odpływu powierzchniowego, co w dużej części jest możliwe nawet w ramach małej retencji wodnej – daje to 2250 mln m³ wody wystarczającej do nawodnienia ponad 1,5 mln ha; eksploatacja łatwo odnawialnych zasobów wód podziemnych – 1800 mln m³ wody do nawodnienia 1,2 mln ha. Przedstawione potencjalne zasoby liczą zatem 5025 mln m³ wody, co wystarczyłoby do nawodnienia 3,35 mln ha gruntów. Wydaje się więc, że wspomniane 750 tys. ha można byłoby właściwie nawodnić bez większych inwestycji w zakresie gospodarki wodnej.

Jednak w dalszej perspektywie, kiedy pojawi się w Polsce konieczność realizacji nawodnień na większych powierzchniach gleb uprawnych, konieczne będą nowe inwestycje do zgromadzenia niezbędnych zasobów wody, co może być realizowane jako jedno ze składowych przedsięwzięć w regulowaniu całej gospodarki wodnej kraju.

Potrzeby i efekty nawadniania roślin w Polsce zależą od wysokości i rozkładu opadów atmosferycznych w okresach wzmożonych potrzeb wodnych oraz od rodzaju gleby. Są tym wyższe, im niższe i gorzej rozłożone są opady oraz im gleba ma mniejszą zdolność retencjonowania wody. W praktyce rozwój nawodnień zależy nie tyle od potrzeb i efektów określanych zwykłą plonem i poprawą jego jakości, ile od ekonomicznej efektywności przedsięwzięcia. Dlatego najważniejszym obszarem rozwoju nawodnień jest produkcja ogrodnicza. Rozwój nawadniania roślin w najbliższym czasie jest przesądzony, głównie ze względu na potrzebę wzrostu nowoczesności i konkurencyjności gospodarstw rolniczych.

Literatura

- Dziężyc J. (1988): Rolnictwo w warunkach nawadniania. PWRiL, Warszawa.
- Dziężyc J., Nowak L. (1993): Deszczowanie. W: Czynniki plonotwórcze-plonowanie roślin. Red. J. Dziężyc. PWN, Warszawa: 329-352.
- Dziężyc J., Trybała M. (1989): Rola wody w intensyfikacji produkcji roślinnej na glebach lekkich. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 377, 179-192.
- Grabarczyk S. (1987): Efekty, potrzeby i możliwości nawodnień deszczownianych w różnych regionach kraju. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 314, 49-64.
- Jankowiak J., Rzekanowski C. (2006): Ekonomiczne efekty nawadniania. W: Nawadnianie roślin. Red. S. Karczmarczyk i L. Nowak. PWRiL, Poznań: 461-479.
- Karczmarczyk S. (1999): Zbiór referatów dotyczących problematyki nawadniania zbóż. Fol. Univ. Agric. Stetin., 193, Agricultura (73), 1-220.
- Kundzewicz Z. (2007): Projekcje zmian klimatu – ekstrema hydrometeorologiczne. I Polska. Wydawnictwo Adagio, Poznań.
- Łabędzki L. (2009): Przewidywane zmiany klimatyczne a rozwój nawodnień w Polsce. Infrastr. Ekol. Teren. Wiej., 3, 7-18.
- Łabędzki L., Kanecka-Geszke E., Bąk B., Słowińska S. (2011): Estimation of reference evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith method for climatic conditions of Poland. W: Evapotranspiration. Red. L. Łabędzki. InTech, Rijeka.
- Pierzgalski E., Jeznach J. (2006): Measures of soil water control in Poland. J. Water Land Dev. 10, 79-89.
- Rolbiecki R. (2013): Ocena potrzeb i efektów mikronawodnień szparaga (*Asparagus officinalis* L.) na obszarze szczególnie deficytowym w wodę. Rozprawy UTP, Bydgoszcz.
- Rzekanowski C., Żarski J., Rolbiecki S. (2011): Potrzeby, efekty i perspektywy nawadniania roślin na obszarach szczególnie deficytowych w wodę. Post. Nauk Roln., 1, 51-63.
- Żarski J. (2006): Potrzeby i efekty nawadniania zbóż. W: Nawadnianie roślin. Red. S. Karczmarczyk i L. Nowak. PWRiL, Poznań: 383-403.

Ciśnieniowe systemy nawadniające w uprawach polowych

Roman Rolbiecki

W warunkach klimatycznych Polski nawadnianie jest zabiegiem wykorzystywanym głównie do uzupełniania niedoborów wodnych roślin spowodowanych niedostateczną ilością opadów oraz złym ich rozłożeniem w sezonie wegetacyjnym. Z uwarunkowań ekonomicznych wynika, iż nawodnienia ciśnieniowe (mechaniczne) powinny być stosowane z jednej strony głównie na tych gruntach, gdzie wykluczony jest podsiąk kapilarny, tzn. tam, gdzie poziom wody gruntowej zalega bardzo głęboko. Z drugiej zaś strony – w uprawach, których nawadnianie jest uzasadnione ekonomicznie, nawet na glebach dobrej jakości. Do nawodnień ciśnieniowych, które są głównie wykorzystywane w polskim rolnictwie polowym, zaliczamy:

- nawadnianie deszczowniane, głównie deszczownie szpulowe (bębnowe) bądź samojezdne (mostowe)
- nawadnianie kropłowe.

Nawadnianie deszczowniane

W systemach deszczownianych woda jest doprowadzana rurociągami tłocznymi pod ciśnieniem do zraszaczy, z których w postaci strugi wypływa i rozdzielając się na krople, spada na powierzchnię uprawną. Wśród urządzeń do nawodnień ciśnieniowych w Polsce dominują deszczownie. Jednostkowe zapotrzebowanie na wodę kształtuje się w tym systemie od 0,8 do 1,1 l s · ha⁻¹ powierzchni efektywnie nawadnianej.

5.



Stosowanie systemów deszczownianych wiąże się użyciem dużej ilości energii do wytworzenia ciśnienia roboczego zraszaczy rzędu 0,3-0,6 MPa, co podnosi koszty produkcji, a przez to może być czynnikiem ograniczającym wprowadzanie deszczowania do szerokiej praktyki rolniczej (Nyc 1996, Pływaczyk 2006, Rolbiecki 2013).

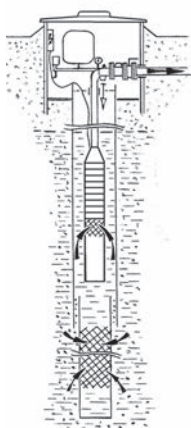
Budowa systemu deszczującego (Łuszczak 2000, Drupka 2006)

- ujęcie wody i agregat pompowy stanowiący źródło ciśnienia roboczego
- linie przesyłowe w postaci rurociągów ciśnieniowych, transportujące wodę od agregatu pompowego do nawadnianych pól
- urządzenia deszczujące wodę po powierzchni.

Ujęcie wody

Ujęcie wody stanowi najistotniejszy i najtrudniejszy do rozwiązania problem, a niekiedy najkosztowniejszy element całego systemu nawadniającego. Bowiem od wydajności źródła wody i pozwolenia na jej czerpanie będzie zależała wielkość plantacji możliwa do nawodnienia. Możemy wyróżnić następujące ujęcia wody (ryc. 16):

- powierzchniowe (jezioro, rzeka, kanał itp.)
- podpowierzchniowe (pompa głębinowa).



Ryc. 16. Przykłady podpowierzchniowego (studnia głębinowa) i powierzchniowego (staw) ujęcia wody (fot. Łukomet)

Agregaty pompowe

Wyróżniamy następujące agregaty pompowe:

- agregaty elektryczne – najtańsze w eksploatacji
- agregaty spalinowe
- agregaty ciągnikowe.

Jak podaje Łuszczczyk (2009), w Polsce najtańsze w eksploatacji są pompownie (agregaty) elektryczne (ryc. 17 i 18). Konkurencyjne są również w kosztach inwestycyjnych, pod warunkiem, że nie musimy budować linii energetycznych i stacji transformatorowej, a pompownia jest prowizoryczna i nie wymaga budynku. Pompy głębinowe są najtańsze, a ich olbrzymia gama umożliwia wybór optymalnych parametrów, tak aby system mógł pracować z największą sprawnością energetyczną. Tam gdzie nie ma możliwości stosowania pomp elektrycznych, należy stosować pompy spalinowe, lub ciągnikowe (ryc. 19 i 20). Pompownia ciągnikowa kosztuje 2–3 razy taniej niż elektryczna, natomiast pompownia spalinowa będzie od niej 2–3 razy droższa. Koszty eksploatacji tych pompowni są wyższe z powodu różnicy cen nośników energii: 1 kWh energii elektrycznej jest 2 razy tańszy od 1 kWh energii z oleju napędowego.



Ryc. 17. Pompownia elektryczna (fot. Łukomet)



Ryc. 18. Elektryczny agregat pompowy (fot. Łukomet)



Ryc. 19. Spalinowy agregat pompowy (fot. Łukomet)

Ryc. 20. Ciągnikowy agregat pompowy
(fot. Łukomet)



Linie przesyłowe

Linie przesyłowe mogą być:

- podziemne (stałe) – z rur żeliwnych lub PE, zakończone hydrantami
- naziemne (przenośne) – węże z PE.

Lokalizacja nawadnianego pola w pobliżu źródła wody zdarza się niezmiernie rzadko, dlatego zwykle zachodzi potrzeba transportowania wody na pole. Wiąże się to zawsze ze stratami ciśnienia, które pociągają za sobą wymóg wyższego ciśnienia wyjściowego na pompie, a to z kolei wymaga większego zużycia energii. Aby zminimalizować straty ciśnienia ponoszone na transport wody oraz różnice wysokości, należy optymalnie zaprojektować średnicę rurociągów przesyłowych. Zdaniem Łuszczyka (2009) przy projektowaniu deszczowni należy kierować się zasadą, by jak największa część rurociągu podziemnego była corocznie eksploatowana mimo płodozmianu niewymagającego nawadniania. Rurociąg podziemny możemy układać już na głębokości 40-70 cm i na zimę odwadniać, jeśli są to rury PCV, lub pozostawić nawet z wodą, kiedy stosujemy węże PE. Na przesyłowe rurociągi naziemne stosowane są węże PE (ryc. 21) o średnicy do 110 mm w odcinkach nawet 1000 m,



Ryc. 21. Deszczowniane węże przesyłowe PE (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 22. Deszczowniane rury aluminiowe (fot. Łukomet)

deszczowniane rury aluminiowe (ryc. 22) lub stalowe ocynkowane długości 6 m i średnicy do 200 mm z szybkozłączami dźwigniowymi oraz węże płaskie o dużej wytrzymałości i trwałości, średnicach nawet do 300 mm i długości do 200 m w jednym odcinku.

Urządzenia deszczujące

Najbardziej popularne urządzenia zraszające w Polsce:

- deszczownie szpulowe (bębnowe) – wąż nawinięty na bęben zakończony działkiem wodnym (zraszacz o dużej średnicy) bądź konsolą
- deszczownie samojezdne (mostowe), (centryczne, frontalne).

W polskich warunkach umiarkowanego klimatu i rozdrobnionych gospodarstw najczęściej stosowana jest deszczownia bębnowa przewoźna, zwana szpulową (ryc. 23, 24). Na dwukołowym podwoziu i obrotowej wieży mocuje się szpulę o poziomej osi obrotu. Na szpulę nawinięty jest wąż polietylenowy zakończony zraszaczem na wózku (ryc. 25) bądź konsolą (ryc. 26). Wąż rozwija się ciągnikiem, a zwijanie następuje samoczynnie pod działaniem przepływającej przez turbinkę wody (dostarczonej pod ciśnieniem z hydrantu lub bezpośrednio z pompowni). Wytryskująca z sektorowego działka (jadącego na wózku w kierunku szpuli) woda, pod ciśnieniem kilku atmosfer, nawadnia pas pola o szerokości kilkudziesięciu metrów i długości nieco większej niż długość węża (zazwyczaj kilkaset metrów) (ryc. 27). Wielkość aplikowanej jednorazowo dawki polewowej można zmieniać bezstopniowo, dobierając odpowiednią prędkość zwijania węża (Łuszczuk 2009).



Ryc. 23. Deszczownia szpulowa (bębnowa) zakończona zraszaczem (fot. Łukomet)



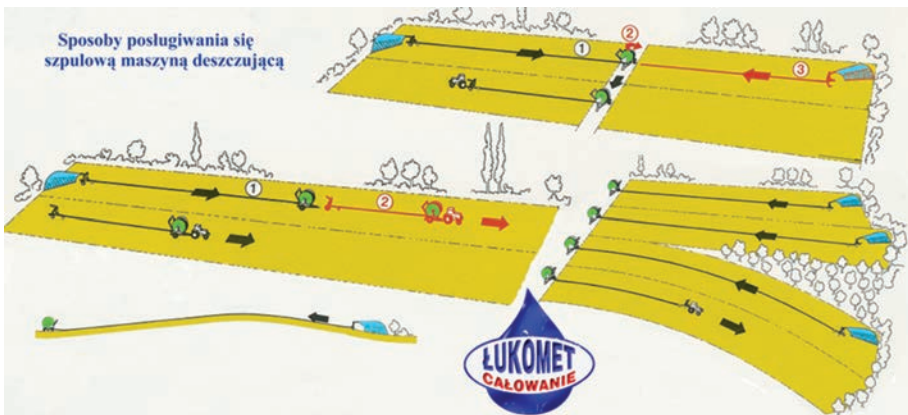
Ryc. 24. Deszczownia szpulowa (bębnowa) (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 25. Deszczownia szpulowa (bębnowa) zakończona zraszaczem w czasie pracy (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 26. Deszczownia szpulowa (bębnowa) zakończona konsolą w czasie pracy (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 27. Schemat pracy deszczowni szpulowej (bębnowej) zakończonej zraszaczem (Łukomet)

Ciekawymi i mającymi perspektywy rozwoju urządzeniami do nawodnień deszczownianych, wpisującymi się w tzw. rolnictwo precyzyjne, są deszczownie mostowe (przęsłowe) zarówno liniowe, jak i centryczne (ryc. 28). Deszczownie mostowe (przęsłowe) są używane na plantacjach wielkoobszarowych. By koszty inwestycyjne



Ryc. 28. Deszczownie samojezdne w czasie pracy (fot. R. Rolbiecki)

były jak najmniejsze w przeliczeniu na jeden hektar, najlepiej stosować kilkusetmetrowe maszyny pozwalające obsłużyć powierzchnię 50-150 ha. W Polsce nie są jeszcze bardzo popularne, można jednak spotkać już deszczownie mostowe IRTEC oraz Valley firmy Valmont. Urządzenie to wpisuje się w myśl i zakres rolnictwa precyzyjnego, gdyż przy niskim ciśnieniu (4 atm) można wykorzystywać w ramach jednego przejazdu maszyny różne dawki polewowe dostosowane do aktualnych warunków wilgotnościowych gleby bądź uprawianych gatunków roślin.

Nawadnianie kroplowe

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się wzrost zainteresowania producentów, głównie roślin ogrodniczych, systemem nawadniania kroplowego. System ten z reguły znajduje zastosowanie w uprawach rzędowych. Coraz częściej również można go spotkać w uprawie ziemniaków. W wielu krajach (USA, Ameryce Południowej, Japonii, a w Europie Zachodniej m.in. w Grecji, Hiszpanii, Niemczech, Holandii) jest to jeden z najpopularniejszych sposobów uzupełniania niedoborów wody w glebie. Nawodnienie kroplowe polega na zwilżaniu gleby wodą podawaną w określonym miejscu w postaci pojedynczych kroplel bądź strużek. Woda podawana jest punktowo poszczególnym roślinom z elastycznych przewodów za pośrednictwem tzw. emiterów kroplel (kroplowników).

Budowa systemu kroplowego (Kaniszewski 2005):

- ujęcie wody (studziennej lub napowierzchniowej)
- urządzenia pompujące, tłoczące wodę do sieci nawadniającej
- urządzenia kontrolne i sterujące (wodomierze, manometry, zawory)
- dozownik nawozów mineralnych
- filtry lub zespoły uzdatniające wodę
- rurociągi doprowadzające i rozdzielcze
- emitery (linie, kroplowniki).

Budowa systemu nawadniania kroplowego w wielu punktach jest zbieżna z budową systemu deszczującego, różni się głównie obecnością w systemie urządzeń filtrujących, dozujących nawozy (ryc. 29) i specyficznych elementów dostarczających wodę do rośliny (emiterów) (ryc. 30 i 31). Popularność tego systemu wynika z wielu jego zalet (Kaniszewski 2005), między innymi:

- możliwości utrzymania optymalnej wilgotności gleby w strefie systemu korzeniowego
- oszczędności wody wskutek ograniczenia parowania z powierzchni gleby, spływu powierzchniowego oraz infiltracji
- oszczędności energetycznych (oszczędne zużycie wody oraz praca przy niskich ciśnieniach zmniejsza zapotrzebowanie na energię, które wynosi 20-25% potrzeb niezbędnych do nawodnień deszczowniczych)
- nawadniania w sposób ciągły przy minimalnym nakładzie pracy
- mniejszego ryzyka porażenia roślin przez patogeny chorobotwórcze wywołujące choroby grzybowe i bakteryjne, ponieważ podczas nawadniania nie zwilża się bezpośrednio roślin
- współczynnika wykorzystania wody, który w tym systemie wynosi 90-95% (przy deszczowaniu 70-80%).



Ryc. 29. Precyzyjny mieszalnik nawozów (fot. S. Sositko)



Ryc. 30. Zastosowanie powierzchniowego kropłowego emitera liniowego w uprawie cebuli (fot. R. Rolbiecki)



Ryc. 31. Zastosowanie powierzchniowego emitera liniowego w uprawie dyni zwyczajnej (fot. R. Rolbiecki)

System nawadniania kropłowego zaliczany jest do systemów wodo- i energooszczędnych. Zużycie wody w stosunku do deszczowania bywa mniejsze o 20-30%. Wymagane ciśnienie robocze w rurociągach wynosi od 0,01 do 0,02 MPa. Duża równomierność rozprowadzania wody i (ewentualnie) składników pokarmowych, a także wysoka efektywność jej poboru przez system korzeniowy roślin sprzyjają zwiększeniu plonu przy zachowaniu zasady zrównoważonego rozwoju środowiska. Systemy te spełniają wymogi tzw. rolnictwa precyzyjnego. Przez bardzo dużą energo- i zasobooszczędność (niskie zużycie wody pod niskim ciśnieniem) oraz miejscowe zaopatrywanie roślin w wodę pozwalają na tworzenie precyzyjnych układów przyrodniczo-techniczno-ekonomicznych, harmonijnie wkomponowanych w środowisko rolnicze (Nyc 1996). System ten jednak z racji wydatkowania wody przez kroplozniki z mikroszczelinami jest bardzo wrażliwy na jakość wody używanej do nawadniania. Woda musi być dobrze oczyszczona, głównie z zanieczyszczeń stałych, które zapychają emiterów kropel. W dobie coraz doskonalszych rozwiązań technicznych (lepsze urządzenia filtrujące) problem zatykania się emiterów kropel staje się mniej kłopotliwy.

Z obserwacji tendencji w rozwoju technik nawadniania roślin polowych wynika, że w niedalekiej przyszłości podstawowymi sposobami uzupełniania niedoborów opadów w uprawie roślin będzie stosowanie ciśnieniowych systemów nawadniających. Systemy ten wychodzą naprzeciw zrównoważonemu rozwojowi współczesnego rolnictwa oraz wpisują się w tzw. rolnictwo precyzyjne (deszczownia mostowa, nawadnianie kropłowe). System kropłowy dzięki bardzo dużej energo- i zasobooszczędności (niskie zużycie wody pod niskim ciśnieniem) oraz miejscowemu zaopatrywaniu roślin w wodę pozwala na tworzenie precyzyjnych układów przyrodniczo-techniczno-ekonomicznych, harmonijnie wkomponowanych w środowisko rolnicze.

Literatura

- Drupka S. (2006): Budowa i eksploatacja deszczowni. W: Nawadnianie roślin. Red. S. Karczmarczyk i L. Nowak. PWRiL, Poznań: 199-233.
- Kaniszewski S. (2005): Nawadnianie warzyw polowych. PlantPress, Kraków.
- Łuszczak K. (2000): Instrukcja projektowania i cennik urządzeń nawadniających. Łukomet – Całowanie, druk instruktażowy.
- Łuszczak K. (2009): Nakłady na nawadnianie plantacji roślin towarowych. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 6, 303-315.
- Nyc K. (1996): Ekonomiczne systemy nawadniające. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 438, 125-132.
- Pływaczek A. (2006): Systemy i technologie nawadniania. W: Nawadnianie roślin. Red. S. Karczmarczyk i L. Nowak. PWRiL, Poznań: 199-233.
- Rolbiecki R. (2013): Ocena potrzeb i efektów mikronawodnień szparaga (*Asparagus officinalis* L.) na obszarze szczególnie deficytowym w wodę. *Rozprawy UTP, Bydgoszcz*.

Wykorzystanie ścieków oczyszczonych do nawodnień w rolnictwie

Marcin Spychała

Jednym ze sposobów zarządzania zasobami wodnymi przez ich powtórne wykorzystanie jest ponowne zastosowanie odpowiednio oczyszczonych ścieków. W dokumentach unijnych (np. w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady... 2020) stwierdza się, że ten sposób w porównaniu z innymi źródłami zaopatrzenia w wodę (np. przetrzuty, odsalanie) ma mniejszy (mniej niekorzystny) wpływ na środowisko.

Mimo że wykorzystanie wody odzyskanej do nawadniania powszechnie stosuje się na świecie, to do tej pory na obszarze UE praktykowane jest w dość ograniczonym zakresie (zwłaszcza dotyczy to oczyszczonych ścieków). Jako nieliczne przykłady ponownego użycia ścieków oczyszczonych w Europie można wymienić francuski projekt Clermont-Ferrand (użycie 10 000 m³/d ścieków po trzecim stopniu oczyszczania do nawadniania 700 ha uprawy kukurydzy) oraz zastosowania we Włoszech (4000 ha różnych upraw) i kilka projektów w Hiszpanii. Oczyszczone ścieki komunalne mogą dostarczać około 225 kg/(ha · rok) azotu i około 45 kg/(ha · rok) fosforu.

Gospodarowanie wodą, w tym kwestie bardziej lub mniej związane z jej powtórным wykorzystaniem, są ujęte w kilku krajowych dokumentach strategicznych, takich jak: Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do roku 2030 (Strategiczny plan adaptacji... 2020), Polityka ekologiczna państwa 2030 – strategia rozwoju w obszarze środowiska i gospodarki wodnej (Uchwała Nr 67 Rady Ministrów... 2019), Strategia zrównoważonego rozwoju wsi, rolnictwa i rybactwa

6.



2030 (Uchwała Nr 123 Rady Ministrów... 2019). Są to dokumenty uwzględniające również problemy niedoborów wody w rolnictwie, jednak na dość wysokim poziomie uogólnienia (zazwyczaj bez konkretnych celów, mierników sposobów osiągnięcia celów i źródeł finansowania).

W miejscu tym należy przytoczyć definicję odzyskiwanej wody zamieszczoną w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/741 z dnia 25 maja 2020 roku w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody. Są to ścieki komunalne, które zostały oczyszczone w zakładzie utylizacji. W rozumieniu takiego zdefiniowania warto podkreślić, że dokument obejmuje ścieki komunalne, czyli bytowe i o składzie zbliżonym do bytowych (umożliwiającym ich wspólne oczyszczanie). Mowa jest także o oczyszczaniu ścieków w zakładzie utylizacji, co podaje w wątpliwość ewentualne zastosowanie zapisów danego dokumentu pod kątem wykorzystania ścieków oczyszczonych w indywidualnych systemach oczyszczania ścieków (tzw. „przydomowych oczyszczalniach ścieków”).

Podstawy prawne i zalecenia

Podstawowe, krajowe ramy prawne dotyczące omawianej kwestii zostały zawarte w ustawie Prawo Wodne (2017). Warto zauważyć, że podobnie jak w wielu krajach Unii Europejskiej istnieje prawne pojęcie tzw. zwykłego korzystania z wód. Szeroko rozumiane – dotyczy również ścieków jako wód zanieczyszczonych. Artykuł 33 cytowanej ustawy stanowi, że właścicielowi gruntu przysługuje prawo do zwykłego korzystania z wód, które są jego własnością. To prawo dotyczy również wód podziemnych znajdujących się w jego gruncie, którego jest właścicielem. Korzystanie z wody, służące zaspokojeniu potrzeb własnego gospodarstwa domowego oraz rolnego, traktuje się jako zwykłe korzystanie z wód. Jeśli łączna ilość wody lub ścieków rolniczo wykorzystywanych lub oczyszczonych ścieków wprowadzanych do wód lub do ziemi jest większa niż 5 m³ na dobę, to nie mamy do czynienia ze zwykłym korzystaniem z wód.

O możliwości oczyszczania przez rolnicze wykorzystanie ścieków bytowych oraz komunalnych lub przemysłowych o składzie zbliżonym do ścieków bytowych stanowi artykuł 84 ustawy. Prawo Wodne (2017) określa też sposoby rolniczego wykorzystania ścieków (art. 84), wymieniając kolejno: nawadnianie użytków rolnych, nawożenie użytków rolnych (dodawanie materiałów do gleby, rozprowadzenie na powierzchnię, wstrzykiwanie do gruntu, umieszczenie pod powierzchnią gruntu, mieszanie z warstwami powierzchniowymi gruntu) oraz nawadnianie (także nawożenie) stawów wykorzystywanych do chowu lub hodowli ryb.

Z kolei artykuł 84 (pkt 3) cytowanego aktu prawnego określa ograniczenia dotyczące wykorzystania ścieków w rolnictwie: „roczne i sezonowe dawki ścieków wykorzystywanych rolniczo, określone w pozwoleniach wodnoprawnych albo pozwo-

leniach zintegrowanych nie mogą przekroczyć zapotrzebowania roślin na azot, potas i wodę oraz utrudniać przebiegu procesów samooczyszczania się gleby”.

Niezależnie od wymogów prawno-administracyjnych rolnicze wykorzystanie ścieków powinno uwzględniać zasady dotyczące dawkowania, zwłaszcza uwzględnienie zasobności gleby w składniki pokarmowe (fosfor, potas) oraz zapotrzebowanie roślin na te składniki, ilości składników pokarmowych wprowadzanych do gleby wraz z nawozami zarówno naturalnymi, jak i organicznymi, a także sposób zagospodarowania gruntów, płodozmian i zabiegi agrotechniczne (Nowak i in. 2020).

Rolnicze wykorzystanie ścieków ma pewne ograniczenia, zakazuje się go w następujących sytuacjach (Prawo Wodne 2017): jeśli grunt jest zamarznięty, zalany lub nasycony wodą, pokryty śniegiem (nie dotyczy to dna stawów ziemnych wykorzystywanych do chowu i hodowli ryb), na gruntach, na których uprawia się rośliny przeznaczone do spożycia w stanie surowym oraz takich, gdzie zwierciadło wód podziemnych znajduje się w odległości mniejszej niż 1,5 m od powierzchni ziemi lub od dna rowu rozprowadzającego ścieki, na obszarach o spadku terenu większym niż 10% dla gruntów ornych i większym niż 20% dla łąk, pastwisk oraz plantacji drzew leśnych, na obszarach, które są w sposób szczególny zagrożone powodzią w okresie prognozowanego wezbrania wód (art. 84 pkt 4).

Aby uzyskać pozwolenie na rolnicze wykorzystanie ścieków, należy przygotować i złożyć wniosek o wydanie pozwolenia wodnoprawnego (wydawane w drodze decyzji na czas określony). Wniosek powinien zawierać opis spełniający wymagania określone w art. 409 ustawy Prawo Wodne (2017) oraz między innymi operat wodnoprawny.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej... (2019) określa z kolei między innymi warunki, jakie należy spełnić w celu rolniczego wykorzystania ścieków. Zgodnie z tym rozporządzeniem ścieki mogą być przeznaczone do rolniczego wykorzystania (§16, pkt 1) przy zachowaniu stosunkowo łagodnych kryteriów dotyczących właściwości fizykochemicznych (BZT₅ ścieków powinno być obniżone o co najmniej o 20%, a zawartość zawiesiny ogólnej – co najmniej o 50%), jednak przy zachowaniu dość rygorystycznych wymogów sanitarnych (§16, pkt 1.2), zawartych w załączniku nr 9 do rozporządzenia. Załącznik ten (tab. 10) określa, że bakterie chorobotwórcze z rodzaju *Salmonella* powinny być niewykrywalne w 1 dm³, a żywe jaja pasożytów (*Ascaris* sp., *Trichuris*, *Toxocara* sp.) powinny być nieobecne w 1 dm³.

Ścieki nie mogą stanowić zagrożenia dla jakości wód podziemnych i powierzchniowych, zwłaszcza nie powinny powodować ich zanieczyszczenia substancjami szczególnie szkodliwymi dla środowiska wodnego (§16, pkt 1.3). Nie mogą też zawierać substancji zanieczyszczających powyżej najwyższych dopuszczalnych wartości: rtęci i kadmu (lp. 1 i 2, tab. I, załącznik nr 4) oraz przekraczać pH i wskaźników

Tabela 10

Warunki sanitarne dla ścieków przeznaczonych do wykorzystania rolniczego

Wskaźnik	Wielkość dopuszczalna
Bakterie chorobotwórcze z rodzaju <i>Salmonella</i>	niewykrywalne w 1 dm ³
Obecność żywych jaj pasożytów (<i>Ascaris</i> sp., <i>Trichuris</i> , <i>Toxocara</i> sp.)	nieobecne w 1 dm ³

Źródło: Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej... 2019.

21-58 (tab. II, załącznik nr 4) (§16, pkt 1.4). Z kolei w załączniku nr 10 do rozporządzenia podane są dopuszczalne zawartości metali ciężkich w warstwie 0-25 cm gleb, na których ścieki wykorzystuje się rolniczo. Należy pamiętać, że ścieki przeznaczone do rolniczego wykorzystania co najmniej raz na dwa miesiące należy badać pod kątem stanu i składu mikrobiologicznego i parazytologicznego. Z kolei co 5 lat, zgodnie z tym rozporządzeniem, na obszarach na których może być stosowane rolnicze wykorzystanie ścieków, należy wykonywać badania zawartości metali ciężkich w glebie (§16, pkt 4). W glebach, na których rolniczo wykorzystuje się ścieki zawartości metali ciężkich nie mogą przekraczać dopuszczalnych ilości (tab. 11).

Tabela 11

Dopuszczalna zawartość metali ciężkich w glebach w warstwie 0-25 cm

Rodzaj metalu	Maksymalna zawartość metali ciężkich (mg/kg suchej masy gleby) na gruntach:			
	bardzo lekkich	lekkich	średnich	ciężkich
Ołów (Pb)	20	40	60	80
Kadm (Cd)	0,5	1	2	3
Rtęć (Hg)	0,7	0,8	1,2	1,5
Nikiel (Ni)	10	20	35	50
Chrom (Cr)	30	50	75	100
Miedź (Cu)	20	25	50	75
Cynk (Zn)	60	80	120	180

Źródło: Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej... 2019.

Ścieki można wykorzystywać rolniczo z wyłączeniem obszarów o płytkim występowaniu skał szczelinowych nieodizolowanych od powierzchni warstwą nieprzepuszczalną (§16, pkt 5).

W ujęciu formalnym (ustawa z 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu) ścieki nie są nawozem naturalnym. Są nim: obornik, gnojówka, gnojowica, odchody pochodzące od zwierząt gospodarskich (z wyjątkiem odchodów pszczoł) bez dodatków innych substancji oraz guano przeznaczone do rolniczego wykorzystania.

Do rolniczego wykorzystania ścieków konieczne jest uzyskanie pozwolenia wodnoprawnego, które powinien uzyskać zarządzający instalacją dostarczającą ścieki (Nowak i in. 2020). Rolnik wykorzystujący te ścieki musi mieć jednak świadomość, czy stan formalnoprawny jest uregulowany: czy jednostka, od której

pochodzą ścieki, posiada pozwolenie wodnoprawne oraz aktualne wyniki badań ich składu (Nowak i in. 2020).

Wykorzystując rolniczo ścieki, rolnik musi posiadać: plan nawożenia (określający termin zastosowania ścieków i ich przeznaczenie, powierzchnię nawożenia, wysokość dawki i ładunki składników wniesionych do gleby wraz ze ściekami), pozwolenie wodnoprawne i wyniki analizy gleby (podstawowe oraz dotyczące zawartości metali ciężkich). Pomiędzy wykorzystującym ścieki rolnikiem a ich wytwórcą (dostawcą) powinna być zawarta umowa cywilnoprawna określająca zasady zbywania ścieków, wykonywania ich badań oraz badań gleby, a także podstawowe elementy planu nawożenia (Nowak i in. 2020).

Przy stosowaniu ścieków do nawodnień należy uwzględnić warunki położenia gruntów określone w załączniku nr 11 Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej... (2019), które zostały zestawione w tabeli 12.

Tabela 12

Warunki położenia gruntów przewidzianych do rolniczego wykorzystania ścieków oraz urządzeń i instalacji przeznaczonych do magazynowania i przygotowania ścieków do rolniczego wykorzystania

Położenie gruntów, na których stosuje się rolnicze wykorzystanie ścieków		Minimalna odległość (m)
Od obiektów przeznaczonych na pobyt ludzi, przy rozprowadzaniu ścieków:	grawitacyjnym	100
	za pomocą deszczowni	200
Od dróg publicznych i linii kolejowych przy rozprowadzaniu ścieków:	grawitacyjnym	20
	za pomocą deszczowni	70
Od linii brzegu wód płynących, przy spadku terenu:	do 2%	30
	od 2 do 10%	50
	ponad 10%	70
Od zbiorników wodnych, stawów rybnych nie przeznaczonych do zasilania ściekami, od linii brzegu jezior, przy spadku terenu:	do 2%	50
	od 2 do 10%	80
	ponad 10%	100
Od ujęcia wód powierzchniowych i podziemnych stanowiących źródło zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia		250

Źródło: Nowak i in. 2020 za Rozporządzeniem Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej... 2019.

25 maja 2020 roku Parlament Europejski wydał rozporządzenie w sprawie ponownego wykorzystania wody, aby zapobiegać niedoborom wody w UE. Rozporządzenie weszło w życie dwudziestego dnia po jego opublikowaniu i zacznie obowiązywać od 26 czerwca 2023 roku. Zasadniczym celem tego rozporządzenia jest ograniczenie niedoborów wody we wszystkich krajach Unii jako reakcja na zmiany klimatu. Jednym z priorytetów jest odzyskanie wody do nawodnień rolniczych pod warunkiem opłacalności oraz zapewnienia ochrony środowiska i zdrowia publicznego. Warto zauważyć, że „odzyskana woda” w omawianym rozporządzeniu

rozumiana jest jako ścieki komunalne, które oczyszczono zgodnie z wymogami dyrektywy 91/271/EWG i które poddano obróbce w zakładzie oczyszczania.

Rozporządzenie szczególnie nacisk kładzie na obowiązki podmiotów dostarczających wodę odzyskaną (ścieki oczyszczone) oraz podmiotów zajmujących się ponownym wykorzystaniem wody, głównie przez określenie zharmonizowanych wymogów odnośnie do jakości odzyskanej wody (np. czynników chorobotwórczych), zasad monitorowania oraz zadań w zakresie zarządzania ryzykiem. Umiejętne podejście do kwestii ponownego wykorzystania ścieków oczyszczonych do nawadniania w rolnictwie powinno również sprzyjać ochronie środowiska i zdrowia publicznego, a przy okazji zwiększać zaufanie do ponownego wykorzystania wody lub ścieków.

Oszacowano, że planowane działania w zakresie odzysku wody (ścieków oczyszczonych) spowodują podniesienie wykorzystania odzyskanej wody do nawodnień w rolnictwie z 1,7 mld m³ (w przypadku braku unijnych ram prawnych w tej dziedzinie) do 6,6 mld m³ rocznie. Zakłada się również, że ponowne wykorzystanie około 50% ilości ścieków pochodzących z oczyszczalni w Europie pozwoli na zmniejszenie poboru wód powierzchniowych i podziemnych (a tym samym zmniejszenie jej deficytu) o około 5%.

Rozporządzenie to jest spójne z kilkoma dokumentami i strategiami UE, między innymi uzupełnienia planowanej modernizacji wspólnej polityki rolnej i wpisuje się w realizację przez UE celów zrównoważonego rozwoju (zwłaszcza w kontekście celu dotyczącego czystej wody i infrastruktury sanitarnej).

W dokumencie zwraca się również uwagę na umacnianie zaufania społeczeństwa w kwestii ponownego użycia ścieków oczyszczonych do nawodnień oraz na to, że świadczenie tego typu usług powinno być dopuszczane tylko na podstawie specjalnych zezwoleń udzielanych przez właściwe organy.

Dokument wyraźnie wskazuje, że to operatorzy zakładów oczyszczania powinni w pierwszej kolejności ponosić odpowiedzialność za jakość oczyszczonych ścieków używanych do nawodnień. Powinni oni (oraz inne właściwe organy) również brać pod uwagę zapisy zawarte w innych dokumentach i aktach, między innymi w Dyrektywie Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 roku dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych (Dz.Urz. WE L 135 z 30.05.1991) i Dyrektywie 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 roku ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz.U. UE L z dnia 22 grudnia 2000 r. z późn. zm.).

Spośród powyższych dokumentów na uwagę zasługuje Rozporządzenie (WE) 852/2004, które ustanawia ogólne przepisy dla przedsiębiorstw sektora spożywczego i obejmuje między innymi produkcję rolną. Rozporządzenie to wskazuje na przedsiębiorstwo sektora spożywczego jako ponoszące w pierwszym rzędzie odpowiedzialność za bezpieczeństwo żywności. Określa się również reguły dotyczące zwalczania, przez zachowanie zasad higieny, zagrożeń mikrobiologicznych w świeżych owocach i warzywach na etapie ich produkcji.

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego z 2020 roku określa również kilka ważnych kwestii, takich jak: podawanie do wiadomości publicznej informacji w celu zwiększenia zaufania do ponownego wykorzystania wody i ścieków, dostęp społeczeństwa do sprawiedliwości w sprawach dotyczących środowiska oraz jego udział w podejmowaniu decyzji, zarządzanie ryzykiem, zasady funkcjonowania zezwoleń (sprawdzanie zgodności jakości i innych regulacji dla oczyszczonych ścieków z warunkami określonymi w zezwoleniu przez właściwe organy, w przypadku niezgodności – podjęcie niezbędnych środków w celu zapewnienia zgodności, a w przypadku wystąpienia znacznego ryzyka dla środowiska lub zdrowia ludzkiego – bezzwłoczne zawieszenie wszelkich dostaw). Określono również zalecenia wykonawcze: przeprowadzenie oceny stosowania rozporządzenia przez Komisję (z uwzględnieniem takich kryteriów jak: efektywności, skuteczności, adekwatności, spójności i wartości dodanej), co powinno wskazywać na ewentualne podjęcie dalszych środków. Rozporządzenie określa także kompetencje w omawianym zakresie dla państw członkowskich, zwracając uwagę zwłaszcza na potrzebę określenia kar za naruszenie jego przepisów oraz zapewnienie ich egzekwowania przy spełnieniu warunków: skuteczności, proporcjonalności i oddziaływania odstrasżającego. Wskazuje się również na potrzebę zapewnienia państwom członkowskim wystarczająco długiego czasu na ustanowienie niezbędnej infrastruktury administracyjnej, a także dla podmiotów gospodarczych – na przygotowanie się do nowych przepisów.

Akt ten jest zgodny z wcześniejszymi, w których co prawda zasygnalizowano potrzebę powtórnego wykorzystania wody, jednak nie sprecyzowano jego warunków, są to: ramowa dyrektywa wodna (2000/60/WE, załącznik VI, część B) oraz dyrektywa dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych (91/271/EWG, art. 12).

Akt dzieli rodzaje upraw przeznaczone do nawadniania na trzy grupy:

- rośliny przeznaczone do spożycia przez ludzi w stanie surowym lub bez ich uprzedniego przetworzenia
- rośliny do spożywania po przetworzeniu (po obróbce, np. przetworzone przemysłowo, gotowane itp.)
- uprawy roślin do celów niespożywczych (np. rośliny ozdobne, pastewne, rośliny uprawiane dla włókien, rośliny energetyczne, nasiona, torf itp.).

Ustanowiono cztery minimalne klasy jakości odzyskanej wody oraz dopuszczalne zastosowania (kategorie upraw) i metody nawadniania dla każdej klasy (tab. 13). Do klasy A przyporządkowano kategorię upraw roślin spożywczych, w tym okopowych spożywanych na surowo oraz roślin spożywczych, których części jadalne mają bezpośredni kontakt z oczyszczonymi ściekami (odzyskaną wodą). Rośliny należące do tej klasy można nawadniać wszystkimi metodami. W klasie B ujęto rośliny spożywane na surowo, których części jadalne są wytwarzane powyżej poziomu

gruntu (nie mają bezpośredniego kontaktu z oczyszczonymi ściekami) oraz rośliny niespożywcze (włącznie z roślinami stosowanymi jako pasza dla zwierząt, które służą produkcji mięsa lub mleka). Rośliny tej klasy można nawadniać również wszystkimi metodami. Do klasy C należy ta sama kategoria roślin co do klasy B, jednak dla tej klasy przewiduje się tylko nawadnianie kropelkowe. Klasę D stanowią rośliny przemysłowe, nasienne i energetyczne, które można nawadniać wszystkimi metodami.

Tabela 13

Klasy jakości odzyskanej wody oraz dopuszczalne zastosowania w rolnictwie i metody nawadniania

Minimalna klasa jakości odzyskanej wody	Kategoria upraw	Metoda nawadniania
A	wszystkie rośliny spożywcze, w tym uprawy okopowe spożywane na surowo i rośliny spożywcze, których część jadalna ma bezpośredni kontakt z odzyskaną wodą	wszystkie metody nawadniania
B	rośliny spożywcze spożywane na surowo, których część jadalna jest produkowana powyżej	wszystkie metody nawadniania
C	poziomu gruntu i nie ma bezpośredniego kontaktu z odzyskaną wodą, rośliny spożywcze spożywane po przetworzeniu i uprawy niespożywcze (w tym uprawy stosowane jako pasza dla zwierząt wykorzystywanych do produkcji mleka lub mięsa)	tylko nawadnianie kropelkowe
D	uprawy przemysłowe, energetyczne i nasienne	wszystkie metody nawadniania

Źródło: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego... (2020)

Dla poszczególnych klas jakości odzyskanej wody (oczyszczonych ścieków) został określony orientacyjny cel technologii oraz wymogi jakościowe (tab. 14). Dla klasy A orientacyjnym celem technologii jest oczyszczanie wtórne, filtracja i dezynfekcja, a dla pozostałych klas – oczyszczanie wtórne i dezynfekcja. Dla *E. coli* dopuszcza się w klasie A nie więcej niż 10 JTK/100 cm³ lub poniżej granicy wykrywalności (JTK – jednostka tworząca kolonię), dla klasy B – graniczna wartość dla tych bakterii wskaźnikowych to nie więcej niż 100 JTK/100 ml, a dla klasy C i D – odpowiednio nie więcej niż 1000 i 10 000 JTK/100 ml. Wartości BZT₅ (biochemiczne zapotrzebowanie na tlen) i zawiesin ogólnych określone dla klasy A nie mogą przekraczać 10 mg/dm³, a dla klas od B do D wymogi jakościowe są zawarte w dyrektywie 91/271/EWG (załącznik I, tab. 1 rozporządzenia). Dopuszczalna wartość mętności wynosi nie więcej niż 5 NTU (NTU – jednostka mętności, ang. *nephelometric turbidity unit*) wymagana jest tylko dla klasy A. Wartość dla *Legionella*

spp. nie może przekroczyć 1000 JTK/dm³ w przypadku stosowania na terenie szpitali. Dopuszczalna wartość dla nicieni jelitowych (jaj helmintów) to 1 jajo na 1 litr w przypadku nawadniania pastwisk lub upraw pastewnych.

Tabela 14

Wymogi dotyczące jakości odzyskanej wody wykorzystywanej do nawadniania w rolnictwie

Klasa jakości odzyskanej wody	Orientacyjny cel technologii	Wymogi jakościowe				Inne
		<i>E. coli</i> (JTK/100 cm ³)	BZT ₅ (mg/dm ³)	zawiesina ogólna (mg/dm ³)	mętność (NTU)	
A	oczyszczanie wtórne, filtracja i dezynfekcja	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	<i>Legionella</i> spp.: < 1 000 cfu/l, jeżeli istnieje ryzyko rozpylania w szklarniach nicienie jelit (jaja helmintów): ≤ 1 jajo na litr dla nawadniania pastwisk lub upraw pastewnych
B	oczyszczanie wtórne i dezynfekcja	≤ 100	zgodnie z dyrektywą Rady 91/271/EWG (Załącznik I tabela 1)		–	
C	oczyszczanie wtórne i dezynfekcja	≤ 1 000			–	
D	oczyszczanie wtórne i dezynfekcja	≤ 10 000			–	

Źródło: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego... (2020).

Dokument określa również minimalne częstotliwości rutynowego monitorowania ścieków oczyszczonych (odzyskanej wody) używanych do nawadniania w rolnictwie (tab. 15). *E. coli* należy badać w klasach A-B raz w tygodniu, a w klasach C-D – dwa razy w miesiącu, natomiast BZT₅ i zawiesiny ogólne należy monitorować i oznaczać dla klasy A raz w tygodniu, a dla klas B-D – zgodnie z dyrektywą 91/271/EWG (załącznik I, sekcja D). Badanie mętności wymagane jest tylko dla klasy A. Dla wszystkich klas (w stosownych przypadkach) dwa razy w miesiącu należy wykonywać oznaczenia *Legionella* spp. Podobnie – dla wszystkich klas – dwa razy w miesiącu lub z częstotliwością określoną przez operatora zakładu oczyszczania (w zależności od liczby jaj w ściekach dostarczanych do zakładu oczyszczania) wymagane jest oznaczanie nicieni jelitowych.

Tabela 15

Minimalne częstotliwości rutynowego monitorowania odzyskanej wody wykorzystywanej do nawadniania w rolnictwie

Klasa jakości odzyskanej wody	Minimalna częstotliwość monitorowania					
	<i>E. coli</i>	BZT ₅	zawiesina ogólna	mętność	<i>Legionella</i> spp. (w stosownych przypadkach)	Niczenie jelit (w stosownych przypadkach)
A	raz na tydzień	raz na tydzień	raz na tydzień	w sposób ciągły	dwa razy w miesiącu	dwa razy w miesiącu lub częstotliwość określona przez operatora zakładu oczyszczania w zależności od liczby jaj w ściekach dostarczanych do zakładu oczyszczania
B	raz na tydzień	zgodnie z dyrektywą 91/271/EWG (załącznik i, sekcja D)		–		
C	dwa razy w miesiącu			–		
D	dwa razy w miesiącu			–		

Źródło: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego... (2020).

Wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) i Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA)

Warto również wspomnieć o zaleceniach WHO dotyczących użycia ścieków w rolnictwie. Ostatnią, zaktualizowaną wersję wytycznych opublikowano w 2006 roku (WHO 2006).

Dokument WHO prezentuje zagadnienia związane z szeroko rozumianym użyciem ścieków w rolnictwie. Znacząca jego część jest poświęcona wskaźnikom sanitarnym (mikrobiologicznym) oraz jakościowym ścieków w kontekście technologii ich oczyszczania i ewentualnego zagrożenia, jakie stanowią dla zdrowia człowieka i zwierząt hodowlanych. Między innymi zaproponowano kryteria oceny i monitorowania oczyszczania ścieków w zależności od typu nawadniania dla wymaganego stopnia usuwania patogenów, poziomu weryfikacji i rodzaju/techniki upraw (tab. 4.5 wytycznych). Zaproponowano również sposoby oznaczania (pomiarów) ścieków dla określonych kategorii nawadniania (irygacji). Na przykład

dla nawadniania zalewowego wskazano ochronę zdrowia pracowników, dostawców i konsumentów, a z kolei dla nawadniania punktowego (metoda najkorzystniejsza ze względu na ochronę zdrowia) – wybór emiterów niepodatnych na kolmatację oraz filtrację ścieków w celu przeciwdziałania kolmatacji emiterów.

W wytycznych WHO zestawiono także, podobnie jak w dokumencie opracowanym przez EPA (EPA/600/R-12/618 Guidelines ... 2012), efektywności usuwania określonych grup patogenów przez powszechnie stosowane technologie i procesy oczyszczania ścieków (tab. 5.2 wytycznych), jednak zestawienie to oparte jest na nieco starszych danych źródłowych niż w przypadku wytycznych EPA i z tego względu wydaje się nieco mniej przydatne.

W USA istnieją przewodniki dotyczące powtórnego wykorzystania wody, na przykład wytyczne opracowywane przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA/600/R-12/618 Guidelines ... 2012). Należy się spodziewać, że wraz z wdrażaniem Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego... 2020) dla krajów unijnych, w tym Polski, podobne dokumenty też będą powstawały.

Przydatnym zbiorem danych zawartym w tych wytycznych jest zestawienie tabelaryczne czynników patogennych, chorób przez nie wywoływanych oraz typowych stężeń patogenów w ściekach surowych (nieoczyszczonych) (tab. 6-2 wytycznych). Z zestawienia wynika, że w każdej z systematycznych grup (bakterie, pierwotniaki, helminty i wirusy) znajdują się patogeny występujące w ściekach nieoczyszczonych, w stosunkowo wysokich stężeniach (od 10^2 do nawet 10^9 JTK/dm³). Do bardziej licznych należą między innymi: bakterie: *Shigella*, *Salmonella*, *Vibrio cholerae*, *Campylobacter*, pierwotniaki: *Giardia* i *Cryptosporidium*, helminty: *Ascaris*, *Ancylostoma*, *Trichuris*, wirusy: *Enterovirus*, *Rotavirus*, *Adenovirus* i *Calicivirus*.

Z zapisów Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady...(2020) wynika, że za dotrzymanie wymagań jakościowych ścieków oczyszczonych, przeznaczonych do nawadniania, odpowiedzialny będzie wytwarzający (dostarczający) je podmiot (zakład zarządzający oczyszczalnią ścieków). Wydaje się jednak, że rolnik lub inny odbiorca-użytkownik takich ścieków powinien mieć przynajmniej podstawową wiedzę o czynnikach wpływających na ich jakość. Przydatne są tutaj informacje zawarte w wytycznych Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA/600/R-12/618 Guidelines ... 2012, tabela 6-3 wytycznych) dotyczące zalecanych poziomów usuwania mikroorganizmów wskaźnikowych i patogennych na różnych stopniach (etapach) procesu oczyszczania ścieków. Z zestawienia wynika, że oczyszczanie drugiego stopnia daje przeciętne efekty usuwania mikroorganizmów wskaźnikowych i patogennych – 0,5-3,0 log (skuteczność określona w skali logarytmicznej); lepsze, ale bardziej zróżnicowane efekty daje filtracja przez podwójne media (0-4,0 log). Kolejne metody i procesy, takie jak filtracja membranowa (ultra- i nanofiltracja oraz odwrócona osmoza), retencja zbiornikowa, ozonowanie,

naświetlanie UV, zaawansowane utlenianie i chlorowanie są znacznie skuteczniejsze (nawet powyżej 6 log), przy czym skuteczności te są dość zróżnicowane, a dolna granica w niektórych przypadkach wynosi „0”. W tym zestawieniu najbardziej efektywne i najbardziej stabilne wydaje się być zaawansowane utlenianie, a nieco mniej skuteczne – naświetlanie UV.

Warto zauważyć, że potencjalnie w ściekach oczyszczonych może znajdować się wiele chemicznych substancji (naturalnych lub syntetycznych) należących do różnorodnych grup (źródła pochodzenia) (EPA/600/R-12/618 Guidelines ... 2012, tab. 6-4). Warto tutaj wspomnieć chociażby o składnikach grupowanych według kryterium „końcowego użycia” takich jak między innymi: chemikalia przemysłowe (np. eter butylowy, tetra chloroetan), środki ochrony roślin (atrazyna, lindan, diuron, fipronil), farmaceutyki i ich metabolity (leki przeciwbakteryjne, np. sulfametoksazol, przeciwbólowe, np. ibuprofen, przeciwpadaczkowe, np. karbamazepina, antybiotyki medyczne i weterynaryjne, np. azytromycyna, doustne środki antykoncepcyjne, np. etynyloestradiol), środki pielęgnacji osobistej (triklosan, aromaty, barwniki), chemia gospodarcza i dodatki do żywności (bisfenol A (BPA), ftalan dibutyłu, polietoksylany, alkilofenol), produkty procesów przetwórczych i produkcyjnych (nitrozodimetyloamina, trihalometany).

Warto mieć świadomość, że różne grupy zanieczyszczeń w różnym stopniu są usuwane ze ścieków przy użyciu określonych technologii (tab. 6-5 wytycznych). Niektóre technologie, jak na przykład odwrócona osmoza, są znane z wysokiej skuteczności (zazwyczaj powyżej 90%), jednak technologia ta należy do stosunkowo kosztownych zarówno w zakupie, jak i eksploatacji. Warte uwagi są inne – relatywnie tańsze technologie, które jednak mają swoje ograniczenia, a ich skuteczność jest bardziej zróżnicowana lub brak jednoznacznych danych na ten temat.

Możliwe, że w celach sanitarnych wymagane będzie dezynfekowanie ścieków oczyszczonych przed ich użyciem do nawodnień. O szczegółach zadecydują krajowe regulacje prawne. Dezynfekcję już od dziesięcioleci stosuje się zarówno w celu uzdatnia wody, jak i ścieków oczyszczonych, dlatego przynajmniej niektóre procedury są już „wystandaryzowane”, jak na przykład w USA (Wytyczne EPA 2012, tab. 6-7). Sparаметryzowane i uznane w niektórych stanach (np. w Kalifornii czy na Florydzie) metody dezynfekcji (sterylizacji) to: chlorowanie, naświetlanie UV, ozonowanie i pasteryzacja. Dla tych metod określono warunki ich prowadzenia, takie jak dawki, stężenia i czas reakcji, na przykład dla pasteryzacji 10 s w temperaturze 82°C, a dla UV – dawka od 50 do 100 mJ/cm² w zależności od wcześniejszego sposobu oczyszczania (filtracja przez piasek lub tekstylia, mikrofiltracja, odwrócona osmoza). Dawki dla chlorowania mieszczą się w zakresie od 25 mg · min/dm³ do 450 mg · min/dm³ w zależności od stanu i stężeń mikroorganizmów chorobotwórczych: *Coli* typu kałowego i NPL (najbardziej prawdopodobna liczba) bakterii.

Przydatność ścieków oczyszczonych do nawadniania

Zapotrzebowanie roślin na wodę

Zapotrzebowanie roślin na wodę zależy od wielu zmiennych, głównie od sumy napełnienia parowania z powierzchni gleby i roślin (ewapotranspiracji), ale również od warunków glebowych, cech gatunkowych (lub odmian) oraz wielkości roślin, ich kondycji i etapu rozwoju, a także warunków klimatycznych (pogodowych).

Rzeczywiste potrzeby wodne roślin określa się, używając ewapotranspiracji. Wartość ewapotranspiracji, jako zależnej od uwarunkowań klimatycznych, takich jak: temperatura i zawartość pary wodnej w powietrzu, wiatr, promieniowanie słoneczne wyznacza się najczęściej z modeli matematycznych wykorzystujących dane meteorologiczne (Hattendorf i Davenport 1996, Treder i Klankowski 2017). Obliczanie wartości ewapotranspiracji jest możliwe również dzięki automatycznym stacjom meteorologicznym, wyposażonym w określony zestaw czujników (Treder i in. 2019).

Od lat czterdziestych do siedemdziesiątych ubiegłego stulecia ewapotranspiracja definiowana była jako ilość wody oddanej (utraczonej) w określonym czasie przez niskie, o jednolitej wysokości, uprawy zielone, całkowicie zacieniające podłoże glebowe, w warunkach odpowiedniego stanu wody w profilu glebowym (Penman 1948). Obecnie teoretyczne potrzeby wodne określa się zazwyczaj na podstawie ewapotranspiracji referencyjnej (Hilaire i in. 2008). Pojęcie ewapotranspiracji referencyjnej jest bardziej ściśle, mianowicie zostało sformułowane jako: tempo ewapotranspiracji z hipotetycznej uprawy referencyjnej trawy, wolnej od stresu wodnego i chorób, o wysokości uprawy 0,12 m, stałej rezystancji powierzchni, wynoszącej 70 s/m i albedo 0,23 (Irmak i Haman 2003). Ewapotranspirację referencyjną oblicza się za pomocą różnych równań, zaproponowanych na przykład przez Baca (1982) czy Grabarczyka (1989). Jednym z najczęściej stosowanych do szacowania ewapotranspiracji referencyjnej jest równanie Penmana-Monteitha zalecane przez FAO-56 (Allen i in. 1998).

Wartość ewapotranspiracji rzeczywistej oblicza się zazwyczaj, mnożąc wartość ewapotranspiracji referencyjnej (ET) przez wskaźnik empirycznie wyznaczany dla danego rodzaju lub gatunku rośliny (najczęściej oznaczany jako „K”) (Allen i in. 1998, Dudek i in. 2004). Wartość ewapotranspiracji rzeczywistej określa poniższa formuła (Nguyen 2019):

$$ET_C = K_C ET_0$$

gdzie: ET_C – ewapotranspiracja rzeczywista (mm),
 K_C – współczynnik korekcyjny,
 ET_0 – ewapotranspiracja referencyjna (potencjalna) (mm).

Wartość współczynnika korekcyjnego jest specyficzna dla określonego gatunku i zależy między innymi od fazy rozwojowej rośliny w okresie wegetacyjnym (Treder i in. 2019). Oczywiście wartości K_C dla poszczególnych gatunków lub odmian są zróżnicowane. Jedne z niższych wśród roślin uprawnych cechują na przykład truskawki (0,85 na etapie pełnego wzrostu), z kolei wysokie wartości charakteryzują między innymi buraki cukrowe (1,2 na etapie pełnego wzrostu). Warto zauważyć, że w zależności od fazy wzrostu wiele gatunków (lub odmian) cechuje duża zmienność wartości współczynnika K_C , na przykład dla lucerny ozimej mieści się w zakresie od 0,3 do 1,0, a dla sorgo sudańskiego od 0,3 do 1,1. Dostępne są katalogi tego parametru dla poszczególnych upraw (Allen i in. 1998).

Dodatkowo można uwzględnić czynnik stresowy (jako kolejny mnożnik). Przy wyznaczaniu potrzeb wodnych można też wykorzystywać opady optymalne, obliczane z użyciem liczb Klatta (Dudek i in. 2004).

Zapotrzebowanie na składniki pokarmowe oraz makro- i mikroelementy

Przydatność ścieków oczyszczonych do nawadniania upraw rolniczych określa się za pomocą wskaźników związanych z potrzebami i ograniczeniami zarówno roślin, jak i gleby.

Kilka podstawowych kryteriów określających przydatność wody lub ścieków oczyszczonych do nawadniania to (Morris i Devitt 1991):

- odczyn ścieków (pH), a w konsekwencji często również gleby
- zasolenie
- zawartość sodu (Na)
- zawartość węglanów i dwuwęglanów, zwłaszcza w kontekście stosunku do zawartości wapnia (Ca) i magnezu (Mg)
- współczynnik adsorpcji sodu (SAR, ang. *sodium adsorption ratio*),
- obecność składników odżywczych (biogenów) – głównie azotu (N), fosforu (P) i potasu (K)
- zawartość pierwiastków i substancji, które mogą być toksyczne – metale ciężkie, niektóre pierwiastki śladowe, wolny chlor, aniony, niektóre metale przejściowe i półmetale takie jak kadm (Cd) i bor (B).

Zasolenie jest jednym z kluczowych czynników, między innymi ze względu na wrażliwość roślin. Szacuje się, że ponad 20% wszystkich nawadnianych gruntów zostało zdegradowanych na skutek nadmiernego zasolenia. Warto uzmysłowić sobie, że w przypadku nawadniania 1 ha upraw 10 000 t wody wprowadza się od około 2 t do 5 t soli (<https://www.lenntech.com/applications/irrigation/salinity/salinity-hazard-irrigation.htm>). Nadmierne zasolenie stanowi jeden z najczęstszych

i najbardziej ważkich problemów związanych z nawadnianiem roślin w ogóle, a zwłaszcza nawadniania ściekami oczyszczonymi (wodą odzyskaną). Woda lub ścieki oczyszczone przeznaczone do ponownego wykorzystania do celów nawodnieniowych powinny charakteryzować się niskim lub średnim poziomem zasolenia (mierzonego jako przewodność elektryczna – od 0,6 do 1,7 mS/cm). Ścieki odprowadzane z oczyszczalni ścieków mogą wykazywać zasolenie znacznie powyżej 1,0 mS/cm (Staniszewski i in. 2017), a czasem nawet powyżej 1,7 mS/cm (Bergier i Włodyka-Bergier 2012).

Silne zasolenie ścieków stosowanych do nawodnień może mieć wielorako niekorzystny wpływ – zarówno na roślinność (plony), jak i na glebę (niebezpieczeństwo degradacji), a także na wody gruntowe (ryzyko zanieczyszczenia).

Można wyróżnić kilka zasadniczych czynników mających wpływ na skutki nawadniania upraw wodami lub ściekami zasolonymi, są to zwłaszcza:

- poziom tolerancji roślin na stężenie soli
- właściwości gleby
- warunki klimatyczne i pogodowe
- sposób gospodarowania i praktyki rolnicze.

Warto zauważyć, że w regionach dotkniętych suszą i w warunkach podwyższonych temperatur (także w okresach upałów) na skutek nasilonego parowania zawartość soli w glebie, ale również w wodzie lub ściekach użytych do nawadniania może znacząco wzrastać. Na glebach o zwiększonej przepuszczalności (umiarkowane wymywanie) można stosować nawadnianie ściekami oczyszczonymi (lub wodą) o umiarkowanym zasoleniu. W przypadku nawadniania ściekami oczyszczonymi o wysokim zasoleniu gleba powinna być silnie przepuszczalna i zdrenowana. Oczywiście, w takiej sytuacji należy stosować rośliny o wysokiej tolerancji na zasolenie.

Ponowne wykorzystanie ścieków oczyszczonych do nawadniania, które cechują się nadmiernym stężeniem soli, może negatywnie wpływać na gleby (w tym aktywność mikrobiologiczną), rośliny (plonowanie), a także wody (gruntowe i powierzchniowe). Gromadzenie w glebie soli powoduje podniesienie zawartości substancji rozpuszczonych i przewodności elektrycznej. Generalnie uprawy wykazują wyższą tolerancję na zasolenie na glebach lekkich (piaskowych), mniejszą na ilastych, a najmniejszą na gliniastych (<https://www.lenntech.com/applications/irrigation/salinity/salinity-hazard-irrigation.htm>).

Podobnie jak w przypadku wielu innych czynników, także w kontekście zasolenia poszczególne gatunki i odmiany wykazują bardzo zróżnicowane progi tolerancji. Warto nadmienić na przykład, że stosunkowo wysoką tolerancją odznacza się pszenica – próg zasolenia strefy korzeniowej na glebach piaszczystych wynosi 9,4 ECse (przewodność elektryczna ekstraktu nasyconego, ang. *electric conductivity of saturated extract*), umiarkowaną – kukurydza (próg zasolenia strefy korzeniowej na

glebach piaszczystych: 4,8 ECse), a z kolei stosunkowo niską – na przykład groszek (próg zasolenia strefy korzeniowej na glebach piaszczystych: 2,3 ECse).

Warto podkreślić, że drugim, bardzo ważnym parametrem, w dodatku powiązanim do pewnego stopnia z zasoleniem jest współczynnik adsorpcji sodu (SAR). Współczynnik adsorpcji sodu (SAR) gleby zależy w przypadku nawadniania ściekami oczyszczonymi głównie od stężenia kationów sodu (Na^+), ale także od stężenia kationów wapnia (Ca^{2+}) i magnezu (Mg^{2+}). SAR to stosunek stężenia (wyrażonego w mmol/dm^3) jonów sodu do jonów wapnia i jonów magnezu w postaci:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{1/2([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])}}$$

Podwyższona wartość współczynnika SAR ogranicza plon roślin, powoduje pogorszenie struktury gleby i zmniejsza jej przewodność hydrauliczną. Zazwyczaj zaleca się, aby współczynnik SAR w wodzie do nawadniania i ściekach oczyszczonych przeznaczonych do nawadniania nie przekraczał wartości 5-8 (Gross i in. 2015, Matos i in. 2012). Generalnie rzecz biorąc, do nawadniania nie należy stosować wody o wskaźniku SAR powyżej 6.

Istnieje możliwość, pod warunkiem weryfikacji w ramach specjalistycznych konsultacji, zmniejszenia (w ograniczonym stopniu) wartości wskaźnika SAR przez dodawanie do gleby wapnia, na przykład w formie siarczanu wapnia (gipsu). Zaleca się monitoring zawartości soli sodu w glebach solno-alkalicznych raz na rok lub raz na dwa lata (<https://www.lenntech.com>).

Wybrane pierwiastki i związki

Wśród składników roślin pobieranych ze środowiska (z gleby lub ze ścieków, użytych do nawadniania) można wyróżnić te, które występują w roślinach w stężeniach powyżej 1000 ppm, czyli tzw. makroskładniki oraz te, które występują w stężeniach mniejszych lub równych 500 ppm – mikroskładniki (mikroelementy). Do pierwszej grupy zalicza się: azot (N), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (Mg) oraz siarkę (S), do drugiej natomiast między innymi miedź (Cu), mangan (Mn), żelazo (Fe), bor (B), cynk (Zn), krzem (Si) i molibden (Mo) (<https://www.lenntech.com>).

Znaczna część związków chemicznych i pierwiastków może gromadzić się w glebie, ale też być wypłukiwana do wód gruntowych, powodując ich zanieczyszczenie. Poszczególne pierwiastki charakteryzują się zróżnicowaną reaktywnością i mobilnością, zależną również od rodzaju gleby – mogą ulegać dezaktywacji w reakcjach chemicznych lub gromadzić się w glebie, aż do osiągnięcia poziomu toksycznego. Niektóre struktury glebowe mogą sprzyjać retencjonowaniu tych

związków (pierwiastków) w strefie korzeniowej, powodując ich dostępność dla roślin. W przypadku większości składników zarówno niedobór, jak i nadmierna zawartość i zwiększone pobieranie przez strefę korzeniową powoduje ograniczenie rozwoju i wzrostu roślin.

Jednymi z najpowszechniej występujących w ściekach jonów są jony boru (B^-), chloru (Cl^-) i sodu (Na^+). Wchłanianie sodu i chlorków odbywa się zarówno przez korzenie, jak i przez liście, jednak tempo akumulacji na skutek wchłaniania przez liście jest większe, zwłaszcza w warunkach nawadniania tryskaczowego przy wysokiej temperaturze i niskiej wilgotności (<https://www.lenntech.com>). Poziom przydatności i toksyczności stężeń tych jonów jest oczywiście różny dla poszczególnych rodzajów upraw i zależy od warunków klimatycznych, glebowych, etapu wzrostu, stężenia innych jonów oraz ich kombinacji.

Jak wiele innych pierwiastków, również bor jest niezbędny do wzrostu roślin i bywa nawet dodawany do gleby jako nawóz. Niezbędne dla rozwoju roślin stężenie boru powinno wynosić do 1 mg/dm^3 , nadmiar jest toksyczny. Wyższe stężenia mogą powodować problemy u roślin wrażliwych (<https://www.lenntech.com>). W wyniku transpiracji dochodzi do akumulacji boru zarówno w liściach, jak i korzeniach roślin. Objawy toksycznego działania zauważyć można głównie na starszych liściach w postaci żółknięcia, plam lub też wysychania tkanki liścia na końcach i krawędziach. Warto przy okazji pamiętać, że podobnie jak w przypadku poziomów toksyczności wielu innych składników także struktura, pH i wilgotność gleby odgrywają rolę w intensywności przyswajania boru przez rośliny.

Ścieki oczyszczone mogą zawierać znaczne zawartości związków boru ze względu na ich stosowanie w różnego rodzaju detergentach i środkach czyszczących (np. nadboran jako środek wybielający). Trudno znaleźć jednoznaczne dane dla Polski dotyczące stężenia boru w ściekach komunalnych. Według niektórych źródeł (<https://www.lenntech.com>) średni poziom boru w ściekach bytowych wynosi około 1 mg/dm^3 , jednak w ściekach bytowych w krajach o klimacie suchym lub w innych – podczas długotrwałych okresów wysokich temperatur – stężenie boru może wzrosnąć nawet do 5 mg/dm^3 ze względu na zagęszczenie na skutek intensywnego parowania. Wytyczne dotyczące zalecanych lub bezpiecznych dla roślin dawek (stężeń) boru, zwłaszcza w wodzie do nawodnień (w tym ściekach oczyszczonych) można znaleźć w wielu źródłach. Jak z nich wynika, dopuszczalne stężenie dla roślin o wysokiej tolerancji to 3 mg/dm^3 , jednak dla większości roślin bezpieczna dawka nie powinna przekraczać $1\text{-}2 \text{ mg/dm}^3$ (Eaton 1944, Nguyen 2019).

W przypadku boru (podobnie jak wielu innych pierwiastków i związków) możemy mówić o zróżnicowanej relatywnej tolerancji gatunków roślin. Do bardzo wrażliwych ($< 0,5 \text{ mg/dm}^3$) należy na przykład jeżyna, do wrażliwych ($0,5\text{-}1,0 \text{ mg/dm}^3$) – brzoskwinia, wiśnia, śliwa, winogrono, cebula, czosnek, ziemniak, pszenica, jęczmień, słonecznik, truskawka; do średnio wrażliwych ($1,0\text{-}2,0 \text{ mg/dm}^3$) – czerwona

papryka, groch, marchew, rzodkiewka, ziemniak, ogórek; do średnio tolerancyjnych ($2,0-4,0 \text{ mg/dm}^3$) – sałata, kapusta, seler, rzepa, owies, kukurydza, karczoch, tytoń, gorczyca, dynia; a do roślin o znacznej tolerancji ($4,0-6,0 \text{ mg/dm}^3$) – pomidor, lucerna i pietruszka (ANZECC 1992).

Nie jest powszechnie wiadomo, że często w wodzie wodociągowej przez jakiś czas występuje pewna zawartość wolnego chloru, będąca skutkiem chlorowania wody podczas jej uzdatniania, co ma na celu zapobieganie ponownemu rozwojowi mikroorganizmów w sieci wodociągowej. W przypadku nawodnień przez deszczowanie stężenie wolnego chloru nieprzekraczające 1 mg/dm^3 nie powinno negatywnie wpływać na liście roślin (<https://www.lenntech.com>). W ściekach, na skutek wysokiej reaktywności i niestabilności oraz retencji w sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków, wolny chlor praktycznie nie występuje.

Względna tolerancja roślin uprawnych na jon chlorkowy (ANZECC 1992) dla przykładowych roślin uprawnych, podobnie jak w przypadku boru, mieści się w dość szerokim zakresie: rośliny wrażliwe ($< 178 \text{ mg/dm}^3$) – na przykład śliwa, morela; średnio wrażliwe ($178-355 \text{ mg/dm}^3$) – winogrono, papryka, ziemniak, pomidor; średnio tolerancyjne ($355-710 \text{ mg/dm}^3$) – jęczmień, kukurydza, ogórek; tolerancyjne ($>710 \text{ mg/dm}^3$) – kalafior i słończnik. Oczywiście, poziom tolerancji zależy od klimatu i warunków glebowych oraz odmiany rośliny.

Podstawowe czynniki wpływające na pobieranie kadmu (Cd) przez rośliny to odczyn gleby i zawartość w niej tego pierwiastka, a objawy toksyczności w postaci plam chlorotycznych i brunatnych na liściach i ich skręcenia oraz zaczerwienienia żyłek obserwuje się najczęściej przy stężeniu w glebie na poziomie już od 5 mg/kg , a zwłaszcza powyżej 30 mg/kg (Kabata-Pendias i Pendias 2001).

Kolejnym ważnym pierwiastkiem jest ołów (Pb), mało mobilny; jego pobieranie przez korzenie jest ograniczone, jednak to w nich głównie się kumuluje. Przyjmuje się, że toksyczną dla roślin jest jego zawartość w glebie na poziomie powyżej 500 mg/kg . Dostępność ołowiu dla roślin zależy między innymi od pojemności wymiennej gleby, pH, zawartości związków organicznych i biogennych, na przykład fosforu (Kabata-Pendias i Pendias 2001).

Niedobór cynku (Zn) powoduje upośledzenie wzrostu i reprodukcji roślin przez zakłócenia metabolizmu. Najczęściej przyjmuje się, że zawartość w glebie poniżej 20 mg/kg oznacza niedobór, a powyżej $300-400 \text{ mg/kg}$ jest toksyczne.

Poziom toksyczności poszczególnych pierwiastków zależy od gatunku lub odmiany rośliny. W literaturze naukowej i popularnonaukowej (np. <https://www.lenntech.com>) można znaleźć graniczne wartości toksyczności chronicznej i ostrej dla wybranych pierwiastków. Warto zauważyć, że większość pierwiastków jest toksyczna w krótkim czasie przy wyższych dawkach, a przy dawkowaniu długoterminowym dawki muszą być często kilkakrotnie niższe.

Warto pamiętać, że składniki pokarmowe w ściekach oczyszczonych, na przykład biogenne (azot i fosfor) mogą w pewnych warunkach prowadzić również do

„przenawożenia” upraw, co skutkuje zazwyczaj obniżeniem plonów, pogorszeniem kondycji roślin, a w skrajnych przypadkach ich obumieraniem.

Substancje biogenne takie jak azot i fosfor są obecne w ściekach oczyszczonych (zwłaszcza pochodzących z dużych aglomeracji, gdzie wymagane jest usuwanie biogenów z dużą skutecznością – do niskich stężeń) w stosunkowo niskich stężeniach. Nadmiar azotu w ściekach używanych do nawodnień może stanowić potencjalne ryzyko (wymywanie z gleby) dla wód gruntowych (EPA/600/R-12/618 Guidelines ... 2012).

Typowe dla ścieków wskaźniki zanieczyszczeń oprócz informacji związanej bezpośrednio ze ściekami dają również pośrednio pewne wskazówki dotyczące na przykład warunków filtracji gleby obsadzonej uprawami zasilanymi tymi ściekami. Jednym z dość powszechnych zagrożeń, zwłaszcza dla systemów drenarskich, jest kolmatacja gruntu. Ten złożony proces może mieć różny przebieg, jednak najczęstszą przyczyną jest zawartość zawiesin i substancji organicznych w stosowanych ściekach, co powoduje rozwój mikroorganizmów i przyrost objętości śluzów przez nie wytwarzanych w porach gruntu. Oczywiście same zawiesiny (cząstki stałe) i koloidy również przyczyniają się do blokowania tych przestrzeni. Dlatego takie wskaźniki zanieczyszczeń jak: zawiesiny ogólne, ogólny węgiel organiczny (OWO), chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), biochemiczne pięciodobowe zapotrzebowanie na tlen (BZT5) w ściekach stosowanych do nawodnień powinny być monitorowane i w miarę możliwości należy dążyć, aby ich wartości były jak najniższe. Na przykład dla zawiesin można w skrajnych przypadkach rozważać dodatkowe podczyszczanie przez mikrofiltrację lub sedimentację. Zawartość zawiesin wpływa również niekorzystnie na niektóre metody dezynfekcji (np. naświetlanie UV).

Wobec wielu różnych zagrożeń, z których część najważniejszych omówiono w rozdziale, istnieje potrzeba podjęcia określonych środków (zabezpieczeń). Wiele z nich zostało już zasygnalizowanych w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego... 2020). Środki te można podzielić na kilka grup:

- formalnoprawne
- proceduralne
- monitoringowo-kontrolne
- wypracowanie dobrych praktyk
- wsparcie naukowe, w tym badawczo-rozwojowe
- przeciwdziałanie powstawaniu i skutkom awarii
- ocena ryzyka
- świadomość społeczna wśród decydentów, operatorów zakładów dostarczających ścieki, użytkowników (zwłaszcza rolników) oraz społeczeństwa w ogóle.

Wykorzystanie ścieków odpowiednio oczyszczonych do nawodnień w rolnictwie wydaje się być racjonalne i raczej nieuniknione, zwłaszcza w dłuższym czasie w obliczu zmian klimatycznych i wzrastającego zapotrzebowania na produkty rolne (żywność). Należy spodziewać się aktów wykonawczych i dodatkowych szczegółowych regulacji, zwłaszcza na szczeblu państw członkowskich UE, które zdaniem autorów powinny ograniczyć do akceptowalnego (bezpiecznego) poziomu potencjalne zagrożenia dla zdrowia publicznego i środowiska związane z powtórным wykorzystaniem ścieków do nawadniania w rolnictwie.

Niesie ono jednak zarówno korzyści, jak i pewne zagrożenia. Oczywiście korzyści to:

- ograniczenie eksploatacji zasobów wody naturalnej
- możliwości lepszego dostosowania się do zmian klimatycznych i pogodowych (lokalna retencja)
- wykorzystanie składników nawozowych zawartych w ściekach oczyszczonych, zwłaszcza biogennych – azotu i fosforu.

Należy jednak pamiętać o zagrożeniach i niebezpieczeństwach, wśród których na pierwszy plan wysuwają się:

- zagrożenia sanitarne w stosunku do ludzi i zwierząt (jednym z wymagających najwyższej ostrożności będzie nawadnianie roślin przeznaczonych do spożycia w stanie surowym)
- zagrożenia dla gleby, zwłaszcza takie jak na przykład wskaźnik sodowy (SAR) i zasolenie
- zagrożenia związane z roślinami, głównie ze względu na toksyczność pierwiastków i substancji przy przekroczeniu określonych stężeń.

Literatura

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998): Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- ANZECC (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council) 1992: Australian water quality guidelines for fresh and marine waters. Canberra, Australia.
- Baca S. (1982): Agroklimatyczne podstawy melioracji wodnych w Polsce. PWRiL, Warszawa.
- Bergier T., Włodyka-Bergier A. (2012): Efektywność oczyszczania ścieków w przydomowej hybrydowej oczyszczalni hydrofitowo-biologicznej. Woda-Środ.-Obsz. Wiej., 12, 1 (37), 25-36.
- Climate change (2007): Impacts, adaptation and vulnerability. Red. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Dudek S., Żarski J., Kuśmierk R. (2004): Ocena potrzeb wodnych i efektów nawadniania kupkówki pospolitej. Acta Agrophys., 3, 1, 43-48.

- Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych. Dz.U. WE L 135 z 30.05.1991.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej. Dz.U. UE L z dnia 22 grudnia 2000 r. z późn. zm.
- Eaton F.M. (1944): Deficiency, toxicity, and accumulation of boron in plants. *J. Agric. Res.*, 69, 6, 237-279.
- European Environment Agency (2009): Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought. Report No 2. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe/>.
- Grabarczyk S. (1989): Potrzeby wodne użytków zielonych i traw. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 343, 43-56.
- Greywater use in irrigation: characteristics, advantages and concerns. *Irrigation-water management. Pollution and alternative strategies (2012)*: Red. C. Matos, A. Sampaio, I. Bentes, IntechOpen Limited, London, UK.
- Gross A., Maimon A., Alfiya Y., Friedler E. (2015): *Greywater reuse*. Taylor & Francis Group, New York.
- Handbook of wastewater reclamation and reuse (1995): Red. D.R. Rowe, I.M. Abdel-Magid. CRC Press LLC., Florida, USA.
- Hattendorf M.J., Davenport J.R. (1996): Cranberry evapotranspiration. *Hort. Sci.*, 31, 334- 337.
- Hilaire R.S., Arnold M.A., Wilkerson D.C., Devitt D.A., Hurd B.H., Lesikar B.J., Lohr V.I., Martin C.A., McDonald G.V., Morris R.L., Pittenger D.R., Shaw D.A., Zoldoske D.F. (2008): Efficient water use in residential urban landscapes. *Hort. Sci.*, 43, 7, 2081-2092.
- Irmak S., Haman D.Z. (2003): Evapotranspiration: potential or reference? *ABE 343/AE256*, Department of Agricultural and Biological Engineering, UF/IFAS Extension, 14, 6, 1-2.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. (2001): *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kaca E. (2015): Program rozwoju melioracji wodnych w perspektywie średnio- i długookresowej. Województwo lubelskie. Wydawnictwo ITP, Falenty.
- Kuchar L., Iwański S., Diakowska E., Gąsiorok E. (2015): Symulacja warunków hydrologicznych w północnej części centralnej Polski w perspektywie lat 2050-2060 dla potrzeb produkcji roślinnej i wybranych scenariuszy klimatycznych. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 319-334.
- Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P., Naylor R.L. (2008): Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319, 607- 610.
- Mekonnen M.M., Hoekstra Y.A. (2016): Four billion people facing severe water scarcity. *Am. Soc. Adv. Sci.*, 2, 1-7.
- Morris R., Devitt D. (1991): Sampling and interpretation of landscape irrigation water, Cooperative Extension, Bringing the University to You. Fact Sheet-02-91 University of Nevada,; <https://www.yumpu.com/en/document/view/27530444/water-sampling-and-interpretation-for-landscape-irrigation>.
- Nguyen T.H. (2019): Treatment and reuse of greywater for rye-grass irrigation. *Maszyn. Rozpr. dokt.*, Wyd. Inż. Środ. i Gosp. Przestrz., UPP, Poznań.
- Nowak D., Kajdan-Zysnarska I., Zborowski D., Pikosz M., Ciemiński L. (2020): Ochrona środowiska w gospodarstwie rolnym. Poradnik dla doradcy. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Poznaniu.
- Penman H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. London*, A193.
- Prawo wodne (Dz.U. 2021.624 t.j.).

- Report on the Review of the European Water Scarcity and Droughts Policy, European Commission (2012): https://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych. Dz.U. 2019 r. poz. 1311.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/741 z dnia 25 maja 2020 r. w sprawie minimalnych wymogów dotyczących ponownego wykorzystania wody, OJ L 177, 5.6.2020, 32–55.
- Staniszewski R., Jusik S., Andrzejewska B., Frankowski P. (2017): Wskaźniki jakości wody małego cieku leśnego odbierającego oczyszczone ścieki bytowe. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumieci.*, 16, 1, 161–171.
- Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do roku 2030 (2013). Ministerstwo Środowiska.
- Treder W., Klankowski K. (2017): An hourly reference evapotranspiration model as a tool for estimating plant water requirements. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 1, 469-481.
- Treder W., Klankowski K., Tryngiel-Gać A. (2019): Techniczne i technologiczne możliwości oszczędzania wody do nawadniania roślin uprawnych. Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach, Skierniewice.
- Tryngiel-Gać A., Treder W. (2017): Efficiency of irrigation of highbush blueberry in Poland. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 1099-1114.
- Uchwała Nr 67 Rady Ministrów z dnia 16 lipca 2019 r. w sprawie przyjęcia „Polityki ekologicznej państwa 2030 – strategii rozwoju w obszarze środowiska i gospodarki wodnej”. Warszawa, 6.09.2019, poz. 794.
- Uchwała Nr 123 Rady Ministrów z dnia 15 października 2019 r. w sprawie przyjęcia „Strategii zrównoważonego rozwoju wsi, rolnictwa i rybactwa 2030”. Warszawa, 5.12.2019, poz. 1150.
- US-EPA/600/R-12/618. Guidelines for water reuse (2012): U.S. Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management Office of Water. Washington, D.C. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development Cincinnati, Ohio U.S. Agency for International Development, Washington, D.C.
- Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. 2007 Nr 147 poz. 1033; t.j. Dz.U. z 2021 r. poz. 76).
- Wada Y., Beek L.P.H., Bierkens M.F.P. (2011): Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3785-3808.
- Water reuse for irrigation agriculture: landscapes, and turf grass (2005): Red. V. Lazarova, B. Akica. CRC Press, BocaRaton, USA.
- WHO (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Excreta and greywater use in agriculture. Geneva, Switzerland.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report (2017): Wastewater. The Untapped Resource. Paris, UNESCO.
- Żarski J., Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., Rolbiecki R., Rolbiecki S. (2013): Prognozowanie efektów nawadniania roślin na podstawie wybranych wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej. *Rocz. Ochr. Środ.*, 15, 2185-2203.

<https://www.lenntech.com/applications/irrigation/salinity/salinity-hazard-irrigation.htm>

Aktualny stan urządzeń melioracyjnych i możliwości poprawy ich funkcjonowania

Jerzy Bykowski

Urządzenia i systemy melioracyjne od samego początku ich wykonywania były ściśle związane z rolnictwem. Świadczy o tym sześć wcześniejszych (1860-1993) definicji melioracji (Pierzgalski 2011). Definicja Marcilonka, określa z kolei melioracje jako zespół zabiegów mających na celu wprowadzenie pożądanych zmian w ekosystemach rolniczych, leśnych i wodnych, które umożliwiają wzrost ich produktywności i zapewniają ekonomiczną efektywność gospodarowania zasobami przyrody, przy zachowaniu zasady zrównoważonego rozwoju (Marcilonek 1994).

Zmiany stosunków powietrzno-wodnych można dokonywać za pomocą różnego rodzaju urządzeń melioracji wodnych (odwadniających, nawadniających, odwadniająco-nawadniających), w tym między innymi urządzeń ciśnieniowych (deszczownie, systemy kroplujące), rowów odwadniająco-nawadniających (nawodnienia grawitacyjne) czy systemu zbieraczy i sączków ułożonych w glebie (drenowanie, również dwustronnego działania).

Według ostatnich danych (z 2013 roku) nie istniejącego już Wielkopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych (WZMiUW) dotychczas zmeliorowano 1051 tys. ha (58%), w tym 869 tys. ha gruntów ornych i 182 tys. ha użytków zielonych (tab. 16).

W przypadku gruntów ornych około 90% powierzchni zmeliorowanej w Wielkopolsce przypada na drenowania, natomiast na trwałych użytkach zielonych dominują grawitacyjne systemy nawadniające. System melioracji przestrzeni rolniczej Wielkopolski uzupełnia też ponad 32 tys. km rowów, które

7.



Tabela 16

Stan urządzeń melioracyjnych w Wielkopolsce (według stanu na 1.03.2013 r. – dane WZMiUW w Poznaniu)

Stan ewidencji zmeliorowanych użytków rolnych (ha)	Pozostałe do zmeliorowania po 1.01.2013	
	odbudowa i modernizacja (ha)	wymagające odbudowy (%)
Grunty orne	869 433	219 475 25,2
Użytki zielone	181 602	73 014 40,2
Ogółem województwo wielkopolskie	1 051 035	292 489 27,8

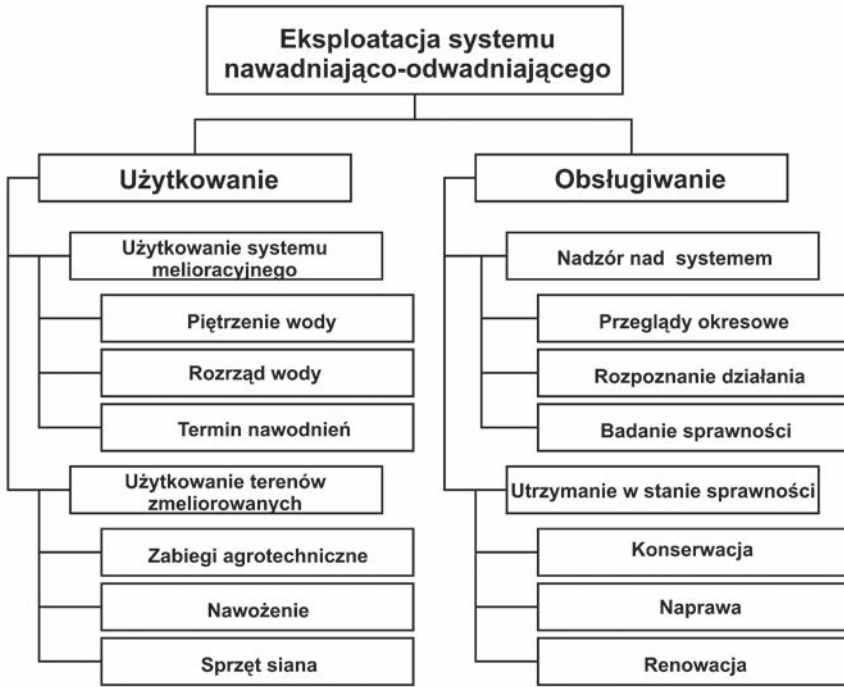
według obowiązującego wcześniej Prawa Wodnego z 2001 roku kwalifikowano do tzw. melioracji szczegółowych (art. 70), czyli potencjalnie wykorzystywanych w regulacji stosunków powietrzno-wodnych gleb. Według danych GUS (2020) w Wielkopolsce na około 18 tys. ha prowadzono nawodnienia podsiąkowe, a deszczowaniem objęto 2427 ha użytków rolnych. Wydaje się paradoksem, że w Wielkopolsce, w której występuje niedobór opadów do pokrycia potrzeb wodnych roślin (nierównomierność opadów), dominującym sposobem melioracji były drenowania. Jednak należy mieć na uwadze, że wykonywane w szerokim zakresie w latach 1960-1985 drenowania były tańsze niż systemy nawodnieniowe, a ponadto, jak podkreśla wielu autorów, dla roślin mniej szkodliwy jest okresowy niedobór wody w glebie niż jej okresowy nadmiar.

Urządzenia melioracyjne stanowią znaczny majątek narodowy, jednak, niestety, stan techniczny wielu urządzeń nie zapewnia obecnie zakładanej skuteczności ich funkcjonowania i uzyskiwania założonych celów ich eksploatacji. Chociaż na niektórych obiektach sprawnie funkcjonują urządzenia z końca XIX wieku, jednak generalnie, przy braku nowych inwestycji, urządzenia na znacznej powierzchni uległy dekapitalizacji.

Z danych byłego już WZMiUW w Poznaniu wynika, że w Wielkopolsce urządzenia na co czwartym hektarze gruntów ornych (25,2%) i niemal połowie użytków zielonych (40,2%), wymagają odbudowy i modernizacji. Również 28,7% długości ewidencyjnej rowów i kanałów wykorzystywanych do celów rolnictwa wymaga odbudowy. Ich stan pogarsza się z każdym rokiem, przy braku odpowiedniego utrzymania.

Podstawy prawidłowej eksploatacji urządzeń melioracyjnych

Urządzenia melioracyjne by spełniały swoje funkcje, powinny być właściwie eksploatowane. Zgodnie z definicją eksploatacja to działania mające na celu optymalne wykorzystanie urządzeń technicznych.



Ryc. 32. Schemat procesu eksploatacji systemów nawadniająco-odwadniającego (Marcilonek 1979, 1994, Gruszczynski i in. 1996)

W eksploatacji wszelkich urządzeń technicznych, w tym urządzeń i systemów melioracyjnych, wydziela się dwa podstawowe procesy: użytkowanie i obsługiwanie (ryc. 32). Użytkowanie urządzeń i systemów melioracyjnych to proces zapewniający pożądane kształtowanie zasobów materii (wody) i energii (ciepła) na zmeliorowanym obiekcie. Obejmuje użytkowanie systemu melioracyjnego (piętrzenie wody, rozrząd wody i sterowanie nawodnieniami) oraz użytkowanie terenów zmeliorowanych (zabiegi agrotechniczne, nawożenie i zbiory plonów). Obsługiwanie urządzeń i systemów melioracyjnych – to z kolei proces zapewniający trwałość, funkcjonalną sprawność oraz odpowiednią niezawodność w założonym czasie eksploatacji technicznej. Obejmuje nadzór nad systemem (przeglądy okresowe, rozpoznanie działania i badanie sprawności) oraz utrzymanie w stanie sprawności (konserwacja, naprawy i renowacja). Obsługiwanie może być jednokrotne lub wielokrotne, techniczne i organizacyjne (Nyc i Pokładek 2009).

Ustalenie parametrów (wymiarów) charakteryzujących pracę urządzeń składowych systemu technicznego, w tym melioracyjnego, opiera się na założeniu, że najważniejszą jego cechą jest niezawodne działanie w fazie eksploatacji (Nyc i Pokładek 2008). Pracę każdego elementu tego systemu opisuje funkcja dwuwartościowa stanu – element jest zdalny (wykonuje zadanie zgodnie z przeznaczeniem) lub

jest niezdatny (w określonych warunkach nie spełnia zadanych funkcji). Niezwykle istotny z punktu widzenia procesu eksploatacji jest więc moment przejścia ze stanu zdatności do stanu niezdatności, określane jako uszkodzenie elementu (Gruszczyński i in. 1996b). W sensie fizycznym uszkodzeniem będzie stan, w którym na skutek czynników zewnętrznych wystąpiły graniczne niedopuszczalne odchyłki co najmniej jednej z cech charakteryzujących pracę urządzenia.

Urządzenia melioracyjne ze względu na ich sprawność można podzielić na dwie grupy (Stąplem i Gołaszewski 1986):

- urządzenia sprawne, spełniające swoje funkcje bez ograniczeń
- urządzenia niesprawne, wymagające remontu, wymiany lub odbudowy.

Kaca i Interewicz (1991) w ocenie skuteczności funkcjonowania nawodnień podsiąkowych urządzenie melioracyjne uważają za zdadne technicznie, gdy wartości parametrów zasadniczych urządzenia nie przekroczyły wartości granicznych (dopuszczalnych). W przeciwnym razie urządzenie uważa się za niesprawne technicznie. Stan urządzenia jest więc zdefiniowany przez określenie pewnych wartości granicznych parametrów, przy których można je uznać za niesprawne.

Rowy melioracyjne

Rowy melioracyjne pełnią w systemach melioracyjnych zarówno odwadniających, jak i nawadniających kluczowe funkcje, a ich stan techniczny warunkuje niezawodność funkcjonowania całych systemów (Bala i in. 1988, Gruszczyński i in. 1993, 1995, 1996, Bykowski i in. 2005). Już na etapie projektowania rowów do zapewnienia prawidłowej skuteczności funkcjonowania systemu melioracyjnego niezbędne jest określenie podstawowych parametrów – przepływu (jako funkcji prędkości i stanu napełnienia) oraz wysokości piętrzenia. Przekroczenie lub nieosiągnięcie tych parametrów w fazie eksploatacji powoduje gwałtowne pogorszenie sprawności i przejście urządzenia do stanu niesprawności. Do podstawowych parametrów oceny stanu technicznego rowów zaliczamy:

- głębokość (odchyłka od wartości projektowanej)
- zamulenie
- wysokość porostu w dnie i na skarpach.

Oszacowanie wartości granicznych (dopuszczalnych) dla wszystkich obiektów liniowych (rowów), które zależą od wielu czynników, jest niezwykle trudne. W tabeli 17 zestawiono wartości tych parametrów na podstawie analizy literatury; za Bałą i in. (1990), Stąplem i Gołaszewskim (1986) oraz Kacą i Interewiczem (1991).

Przekroczenie przez rów melioracyjny jednego z wymienionych poniżej parametrów kwalifikuje urządzenie jako niesprawne.

Tabela 17

Warunki utraty stanu sprawności rowów melioracyjnych

Rowy	Parametr		
	odchyłka głębokości (m)	zamulenie (m)	wysokość porostu w dnie * (m)
Szczegółowe	> $\pm 0,20$	> 0,30	> 0,30
Zbiorcze	> $\pm 0,10$	> 0,20	> 0,25
Doprowadzające	> $\pm 0,10$	> 0,15	> 0,10

* Wysokość porostu należy określać jako 2/3 najwyższych roślin.

By zachować właściwe parametry, w procesie eksploatacji rowy i kanały melioracyjne powinny być poddawane zabiegom utrzymaniowym w odpowiednim zakresie i częstotliwości (Bala i in. 1988, Kosturkiewicz i Bykowski 1991). Utrzymanie urządzeń melioracyjnych w stanie sprawności technicznej jest jednak zadaniem trudnym i kosztownym, przede wszystkim z powodu ich rozmieszczenia na terenach rolniczych w znacznych odległościach, wymagających zwykle ręcznej i ciężkiej pracy w trudnych warunkach terenowych oraz częstych uszkodzeń wskutek erozyjnego działania wody, wiatru i niskich temperatur (ryc. 33) (Stąpel 1995).

Badania przeprowadzone w Wielkopolsce między innymi przez Bykowskiego i in. (2001) wykazały istotny wpływ niedostatecznej konserwacji rowów na skuteczność funkcjonowania urządzeń drenarskich w gruntach ornym. W trakcie analizy materiałów archiwalnych 169 obiektów drenarskich oddanych do eksploatacji w latach 1972-1998 reklamacje i zastrzeżenia do funkcjonowania odpływów i sieci drenarskiej odnotowano łącznie w 107 obiektach, co stanowiło 63,3% ogólnej ich liczby. Jako główną przyczynę wadliwego funkcjonowania urządzeń melioracyjnych wskazano niedostateczną konserwację rowów odpływowych (tab. 18). Ten rodzaj

Tabela 18

Przyczyny wadliwego działania drenowań związane z niewłaściwą eksploatacją obiektów drenarskich (Bykowski i in. 2001)

Przyczyna wadliwego działania drenowań	Obiekty	
	liczba	%
Niedostateczna konserwacja rowów	101	59,8
Zamulenie zbieraczy	36	21,3
Zamulenie studzienek	5	2,9
Zarośnięcie zbieraczy	7	4,1
Brak wylotów	22	13,0
Brak pokryw na studzienkach	19	11,9

usterki wystąpił w 101 obiektach drenarskich, co stanowiło ponad połowę (59,8%) analizowanych obiektów.

Pogorszenie warunków hydraulicznych odpływu wody z urządzeń na skutek braku konserwacji rowów mogło też być jedną z głównych przyczyn reklamacji związanych z zamuleniem zbieraczy (21,3% obiektów) i zamulenia studzienek drenarskich (2,9% obiektów).

Wyniki badań wskazywały też na przypadki dewastacji urządzeń, o czym może świadczyć brak lub zniszczenie wylotów (13,0% obiektów) oraz brak pokryw na studzienkach drenarskich (11,2% obiektów) (ryc. 34-36).

Na brak konserwacji rowów odpływowych jako jedną z głównych przyczyn wadliwego funkcjonowania urządzeń melioracyjnych wskazywał też Czarnowski (1988). Na podstawie badań ankietowych prowadzonych w latach osiemdziesiątych XX wieku usterki związane z brakiem konserwacji oszacował on na 26% przypadków.



Ryc. 33. Stan kanału melioracyjnego przed i po konserwacji (fot. R. Marcinkowska 2010) (Przybyła i in. 2012)

Ryc. 34. Przykład stanu wylotu drenarskiego (fot. A. Jarysz)



Ryc. 35. Przykład stanu studzienki drenarskiej (fot. A. Jarysz)



Ryc. 36. Przykład stanu zastawki (fot. A. Jarysz)



Jak wykazały analizy przeprowadzone w Wielkopolsce (Bykowski i.in. 2001, 2005, 2007), jednym z głównych czynników decydujących o stanie technicznym urządzeń są nakłady finansowe ponoszone na utrzymanie i remonty urządzeń. Niestety, w poprzednich latach były one niedostateczne w stosunku do potrzeb, a obliczenia Manteuffela Szoega i Interewicza (1995) wykazały, że współczynnik korelacji pomiędzy wydatkami na utrzymanie i średnią oceną stanu technicznego urządzeń, w odniesieniu do systemów z rowami otwartymi wyniósł 0,9, a do

systemów drenarskich 0,7. Z kolei Zuber (1983), prowadząc badania na 82 obiektach stwierdził, że w około 75% przypadków do przywrócenia sprawności funkcjonowania sieci drenarskiej wystarczyło wykonanie prac o charakterze typowo utrzymaniowym, takich jak: odmulenie lub renowacja rowów, odbudowa zniszczonych lub zasypanych wylotów oraz oczyszczenie zamulonych lub zarośniętych zbieraczy, szczególnie w ich dolnych odcinkach.

Z kolei badania Gruszczyńskiego i in. (1996) wykazały istotny wpływ poziomu eksploatacji na efektywność działania urządzeń i systemów melioracyjnych. Wzrostowi wskaźnika procesu eksploatacji od 0,04 do 0,5 (w skali punktowej od 0 do 1) towarzyszył bowiem prawie dwukrotny wzrost plonów, w przeliczeniu na 1 ha.

W podsumowaniu można stwierdzić, że właściwa konserwacja rowów i kanałów, jako głównych elementów systemów melioracyjnych, warunkuje niezawodność ich funkcjonowania i uzyskanie zakładanych efektów. Rowy służą nie tylko jako odbiorniki wód drenarskich czy dostarczają wodę do nawodnień, lecz także zapewniają szybkie przechwytywanie i odprowadzenie spływów wód powierzchniowych powstających po roztopach zimowych i lokalnych (o niewielkim zasięgu) nawałnych opadach atmosferycznych (Nyc i Pokładek 2004). Ma to istotne znaczenie, gdyż zmniejsza z jednej strony ryzyko występowania obszarów nadmiernie uwilgotnionych i potrzeby ich odwodnienia. Z drugiej strony ograniczenie lub wyeliminowanie spływów powierzchniowych wpływa na zmniejszenie występowania erozji wodnej, co jest zgodne z potrzebami ochrony gleb przed degradacją. Jak wykazały badania i obserwacje terenowe, potrzeba ochrony gleb przed erozją wodną dotyczy nie tylko terenów górskich i podgórszych, zagrożona nią jest także część Wielkopolski (Marcinek 1994). Szybkie odprowadzenie nadmiaru wód przez będące w dobrym stanie technicznym rowy ma istotne znaczenie przede wszystkim w lokalnej ochronie przeciwpowodziowej (Szafranski i in. 1994, 1997, Bykowski i in. 1998, 2001).

Charakterystyka wybranych robót utrzymaniowych

Mając na uwadze spostrzeżenia, między innymi wcześniej cytowanego Zuber (1983), poniżej przedstawiono krótką charakterystykę robót utrzymaniowych, które przy stosunkowo niewielkich nakładach finansowych mogą przywrócić sprawność funkcjonowania urządzeń i systemów melioracyjnych w przestrzeni rolniczej nie tylko Wielkopolski (Walczak i in. 2015).

Każdy z elementów systemu melioracyjnego wymaga innego sposobu podejścia do zagadnień związanych z ich konserwacją, nie tylko z uwagi na odmienne rozwiązania konstrukcyjne i założone funkcje w systemie, lecz przede wszystkim ze względu na ich charakter przestrzenny (Gruszczyński i in. 1993). Budowle liniowe

(rowy i kanały) są rozmieszczone na powierzchni całego obiektu, zajmując w sumie ciągi o długości niekiedy kilkudziesięciu kilometrów. Budowle piętrzące i komunikacyjne, jakkolwiek występujące licznie na obiektach, zlokalizowane są w pewnych konkretnych miejscach w terenie. Tak różne cechy charakterystyczne elementów systemu melioracyjnego nakazują indywidualny sposób rozwiązywania problemów związanych z utrzymaniem ich w stanie technicznej sprawności (Gruszczyński i Krzywiec 1993, Gruszczyński i Kwapisz 1995).

Kanały i rowy melioracyjne

Obowiązująca ustawa Prawo Wodne (2017) wymienia osiem kategorii prac utrzymaniowych (art. 227, ust. 3).

- Wykaszenie roślin z dna oraz brzegów śródlądowych wód powierzchniowych

Koszenie powinno się wykonywać przynajmniej dwukrotnie w ciągu roku. Koszenie roślinności porastającej urządzenia melioracyjne jest niekiedy jedynym zabiegiem konserwacyjnym ze względów oszczędnościowych. Czynność tę możemy wykonać ręcznie za pomocą tradycyjnej kosy, używając spalinowej kosy mechanicznej lub kosiarkami mechanicznymi. Podczas robót na obiektach melioracyjnych gdzie przez dłuższy czas nie było wykonywane systematyczne koszenie, może zaistnieć potrzeba wycięcia drzew i krzewów porastających skarpy lub dna cieków. Regularne koszenie powoduje niszczenie młodych pędów, które są stosunkowo miękkie i dają się usunąć kosą ręczną bądź mechaniczną.

Jak wynika z przeprowadzonych analiz, nakład jednostkowy (norma czasu pracy) na mechaniczne (kosiarka) koszenie skarp i dna cieków wynosi średnio 0,26 maszynogodziny na 100 m² powierzchni (KNR 15-01). Jednostkowe nakłady rzeczowe na ręczne koszenie skarp i dna cieków (KNR 15-01) uwzględniają cztery typy porostów: miękkie rzadki i gęste oraz twarde rzadki i gęste, przy czym odpowiednia ich klasyfikacja zapewnia właściwą kalkulację nakładów robocizny. Jednostkowe normy robocizny na ręczne koszenie skarp i dna cieków według cytowanego katalogu (KNR 15-01) wynoszą od 0,7 do 1,9 godziny (KNR 15-01) na powierzchni 100 m², ze złożeniem roślinności w kopki poza krawędzią skarpy.

Zabiegi utrzymaniowe ingerują istotnie w środowisko przyrodnicze, dlatego przy ich planowaniu i wykonywaniu należy brać pod uwagę ewentualne i rzeczywiste skutki. Wykaszenie bezpośrednio oddziałuje na usuwaną roślinność, a pośrednio na siedliska bezkręgowców i ryb w cieku, kanale lub rowie. Wykaszenie brzegów wpływa na funkcjonowanie stref buforowych i pośrednio na

eutrofizację i zmęczenie wód cieków. Stopień ingerencji w środowisko zależy od powierzchni wykaszanej i częstotliwości prac, a także od charakteru wykaszanej roślinności i postępowania z pokosem (Prus i in. 2017).

- Usuwanie roślin pływających i korzeniących się w dnie śródlądowych wód powierzchniowych

Do tej kategorii prac należy usuwanie kożucha roślin pływających oraz wydobywanie z cieków roślinności zanurzonej, roślin o liściach pływających oraz wynurzonej, przez ręczne lub mechaniczne wyrwanie czy wygrabienie, zwykle wraz z systemem korzeniowym. Działanie jest niekiedy wykonywane jako tzw. hakowanie dna. Polega ono na wydobywaniu z cieków kożucha roślin pływających (rzęsa wodna, glony, moczarka) z odrzuceniem na brzeg i złożeniem na przymy kompostowe. Hakowanie może być wykonywane ręcznie lub mechanicznie za pomocą koparko-odmularek ze specjalnym osprzętem. Jest to robota utrzymaniowa dająca dobre efekty przy stosunkowo niewielkich nakładach. Duża część cieków wodnych silnie zarasta roślinnością pływającą, zmniejszając przekrój czynny koryta (Walczak i in. 2015). Usunięcie roślinności z koryta powoduje udrożnienie cieków wodnych, a także zapobiega procesowi zamulania koryta obumierającą roślinnością. Normy czasu dotyczące hakowania wyłącznie technologią ręczną, zawierają Katalog Nakładów Rzeczowych (KNR) 15-01. Przy zarośnięciu powierzchni lustra wody do 60% jednostkowy nakład robocizny (norma czasu pracy) wynosi około 10 godzin i jak wykazały analizy, jest dwukrotnie mniejszy od odmulania dna warstwą namułu o miąższości do 0,1 m. Do tej kategorii nie powinny być kwalifikowane prace obejmujące wydobywanie osadów dennych.

Wymienione zabiegi bezpośrednio oddziałują na usuwaną roślinność, a pośrednio na siedliska bezkręgowców i ryb w ciekach. Hakowanie dna skutkuje wzruszeniem osadów dennych, zmętnieniem wody i uruchomieniem zgromadzonych w osadach biogenów (Prus i in. 2017).

- Usuwanie drzew i krzewów porastających dno oraz brzegi śródlądowych wód powierzchniowych

Prace obejmują szereg zabiegów: od pielęgnacji (przycinania koron) drzew, przez selektywną ścinę pojedynczych (żywych lub martwych stojących) drzew i krzewów na brzegach, na skarpach brzegowych lub w korycie, aż do wycinki całych pasów czy płatów zadrzewień i zarośli wzdłuż cieków i w międzywałach.

Zabiegi te znacząco przekształcają roślinność strefy brzegowej, w której drzewa są elementem strukturotwórczym. Zwykle silnie wpływa to także na sam ciek, zmieniając warunki jego oświetlenia, a co za tym idzie – temperatury i natlenienia wód, jak również ograniczając dostawę rumoszu drzewnego do koryta. Szczególnie inwazyjną formą prowadzenia prac w tej kategorii jest połączenie wycinki drzew lub krzewów z karczowaniem pni, co powoduje naruszenie struktury brzegów i dna oraz likwiduje naturalne umocnienia brzegów przez systemy korzeniowe drzew, niszcząc także siedliska ważne na przykład jako schronienia ryb (Prus i in. 2017).

- Usuwanie ze śródlądowych wód powierzchniowych przeszkód naturalnych i wynikających z działalności człowieka

W ramach tej kategorii wyróżnić należy zabiegi związane z usuwaniem z rzek naturalnego rumoszu drzewnego. Drugą grupę prac, o zupełnie odmiennym oddziaływaniu na środowisko, stanowi usuwanie elementów pochodzenia antropogenicznego, w tym: śmieci, konstrukcji wprowadzonych bez stosownych zezwoleń (np. prowizoryczne przepusty, pomosty, kładki) oraz uszkodzonych, zbędnych elementów zabudowy regulacyjnej.

Usuwanie naturalnego rumoszu drzewnego ma bardzo silny negatywny wpływ na stan środowiska rzeczno i zróżnicowanie siedlisk, ponieważ martwe drzewa w rzece stanowią ważny element ekosystemu. Usuwanie przeszkód antropogenicznych ma charakter prośrodowiskowy (Prus i in. 2017).

- Zabudowa biologiczna i zasypywanie wyrw w brzegach i dnie śródlądowych wód powierzchniowych

Działania wykonywane w ramach tej kategorii służą odtworzeniu uszkodzonych fragmentów brzegu oraz istniejących jego umocnień zdegradowanych przez naturalną dynamikę procesów korytowych, często wskutek działania wód wezbraniowych. Zasadniczym założeniem jest tu jedynie odbudowa uszkodzonych brzegów z wykorzystaniem materiałów naturalnych lub odtwarzanie zniszczonych umocnień. Możliwe jest przy tym zastępowanie dawnych umocnień kamiennych lub betonowych biologicznymi, na przykład zastąpienie płyt betonowych umocnieniami faszyną. W definicji prac utrzymaniowych nie mieści się wprowadzanie nowych lub znacznie bardziej trwałych elementów (np. zastępowania zniszczonych umocnień faszynowych gabionami lub konstrukcjami betonowymi czy larsenami) bądź też umocnienie brzegu narzutem kamiennym (Prus i in. 2017).

Nakłady jednostkowe robocizny na dość powszechnie stosowaną naprawę skarp przez darniowanie i obsiew wynoszą od 57 godzin (darniowanie na płask) do 275 godzin (darniowanie na mur, na powierzchni 100 m²) (KNR 15-01). Z reguły są większe niż nakłady na wykonanie nowych umocnień, gdyż wymagają również czynności rozbiórkowych zniszczonych umocnień.

Likwidując podcięcia i obrywy brzegowe mające duże znaczenie dla różnorodności biologicznej, ograniczamy dostawę materiału do koryta rzecznego i blokujemy procesy dynamiki koryta, możemy więc negatywnie oddziaływać na środowisko (Prus i in. 2017).

- Udrażnianie śródlądowych wód powierzchniowych przez usuwanie zatorów utrudniających swobodny przepływ wód oraz usuwanie namulów i rumoszu

Usuwanie zatorów to pilne i niezwłoczne interwencje w przypadku znacznego zablokowania przepływu przez przeszkody rozmaitego pochodzenia. Usuwanie namulów obejmuje zabiegi ręcznego lub mechanicznego usuwania drobnoziarnistego substratu dennego i zwane jest potocznie „odmulaniem”. Wykonywane jest ręcznie bądź z użyciem cięższego sprzętu (naziemnego – koparki, spychacze lub pływającego – pogłębiarki, refulery). Zwykle towarzyszy mu rozplantowanie wydobytego namułu na brzegach, jego wbudowanie w skarpy brzegowe lub wywiezienie. Prace należy ograniczać do naniesionych namulów, nie powinny one ingerować w piaszczyste lub żwirowe dna rzek nizinnych. Usuwanie rumoszu rozumiane jest zwykle jako usuwanie grubszych frakcji materiału dennego.

Normatywy techniczne wskazują, że odmulanie koryta rowów lub kanałów melioracyjnych dla potrzeb rolnictwa w przeciętnych warunkach, jeżeli rów nie jest niszczone przez bydło, powinno się przeprowadzać co 2–4 lata. Przy tego rodzaju robotach konieczna jest znajomość podłużnego i poprzecznego profilu cieku. Odmulenie należy rozpocząć od rowu głównego, wykonując wcześniej wykoszenie skarp cieku.

Roboty są często wykonywane na bardzo zaniedbanych i zniszczonych rowach bądź na skutek wieloletniego braku konserwacji, bądź złego użytkowania. Jednostkowe nakłady (normy) na wykonanie tych robót zawierają Katalog Nakładów Rzeczowych (KNR) 15-01. Do ustalenia ich wielkości niezbędne jest określenie grubości warstwy namułu, szerokości w dnie i głębokość cieku. Na przykład na odmulenie odcinka cieku o długości 100 mb, szerokości w dnie 2,0 m i zamuleniu 0,2 m potrzeba 6,72 maszynogodziny (KNR 15-01) pracy koparko-odmularki. Do najbardziej pracochłonnych robót w konserwacji rowów i kanałów melioracyjnych należy ręczne odmulanie dna. Jednostkowe nakłady wzrastają istotnie wraz z grubością warstwy usuwanego namułu, stąd tak ważna jest regularna konserwacja

bieżąca, przeciwdziałająca procesom zamulania koryta rowu. Przy dobrej organizacji robót norma robocizny na odmulenie odcinka cieku o długości 100 m, głębokości do 1,5 m, szerokości w dnie od 0,4 do 2,0 m i grubości namułu do 0,2 m, wynosi od 17 do 69 godzin. (KNP cz. 13). Przy grubości namułu 0,4 m norma czasu robocizny cieku wynosi już 178 godzin, stąd z ekonomicznego punktu widzenia o wiele taniej jest przeprowadzać systematycznie konserwację bieżącą lub okresowo gruntowną z odmuleniem 0,1 m do 0,2 m, niż raz na kilka lat odbudowę rowu. Biorąc pod uwagę możliwości technologiczne utrzymania urządzeń melioracyjnych, metody wykonawstwa ręcznego powinny być brane pod uwagę w ostateczności.

Udrażnianie śródlądowych wód powierzchniowych oraz usuwanie namułów wykazują najwyższy stopień ingerencji w strukturę koryta cieku. Usuwanie namułów i rumoszu powoduje zmianę głębokości cieku i profilu dna, w tym likwiduje przegłębienia i zaburzenia układu bystrze-płoso. Substrat denny stanowi podłoże dla szeregu procesów biologicznych oraz miejsce bytowania wielu organizmów, w tym bezkręgowców i ryb.

Sz szczególnie niekorzystny wpływ na środowisko cieku ma tzw. „konserwacja gruntowna” – polegająca na usuwaniu warstwy osadów dennych o miąższości ponad 40 cm, na długich, czasami wielokilometrowych odcinkach cieków, od wielu lat nieutrzymywanych. W przypadku usuwania frakcji gruboziarnistych działanie negatywnie wpływa na równowagę hydrodynamiczną cieku z powodu usunięcia materiału stabilizującego dno. Uruchamia to dodatkowo ruch frakcji piaszczystych oraz ich osadzania poniżej w sposób niekontrolowany.

Na ciekach wcześniej uregulowanych, które podlegały procesom renaturyzacji, wadliwie zaplanowane działania z tej kategorii robót prowadzą do zupełnego zniszczenia odtwarzających się naturalnych struktur morfologicznych takich jak odsypy brzegowe, meandrowe, śródkorytowe, a tym samym do zniweczenia szans na odtworzenie się dobrego stanu ekologicznego wód. Wydobyte osady denne składowane na brzegach pogarszają związki koryta rzeki z jej doliną, utrudniają okresowe rozlewanie się wód rzecznych przy wysokich stanach. Ponadto mogą przyczyniać się do eutrofizacji wód w wyniku mineralizacji i uwolnienia do środowiska zakumulowanych w nich substancji (Prus i in. 2017).

- Remont lub konserwacja stanowiących własność właściciela wody: budowli regulacyjnych i ubezpieczeń w obrębie tych budowli oraz urządzeń wodnych

Kategoria obejmuje remonty i konserwację istniejących obiektów i urządzeń hydrotechnicznych; należy do niej między innymi udrażnianie urządzeń zlokalizowanych na ciekach melioracyjnych, w tym w szczególności przepustów. Te budowle komunikacyjne pod drogami udrażnia się ręcznie lub płucze za pomocą pomp wysokociśnieniowych i węży zakończonych dyszami. Woda podawana przez pompę

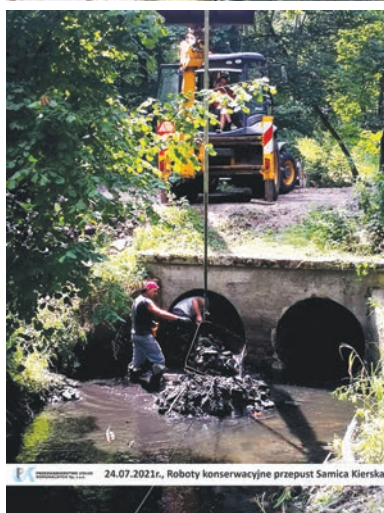
rozmywa namuły znajdujące się w rurach przepustu i unosi je do rowu poniżej. Przepłukiwanie przepustów powinno się wykonywać po wykoszeniu rowu.

Dla przepustów i budowli piętrzących okresy międzyobsługowe nie powinny być dłuższe niż trzy lata, przy systematycznym wykonywaniu konserwacji bieżących.

Szczególną uwagę należy zwracać na drożność przepustów zlokalizowanych na większych ciekach i kanałach. W przypadku hamowania odpływu wody przez zwężone światło takich przepustów, po często ostatnio występujących opadach nawalnych, może dochodzić do lokalnych podtopień, również na obszarach zurbanizowanych, Przykład takich robót ilustruje rycina 37.



Przed wykonaniem konserwacji przepustu Samica Kierska



24.07.2021r., Roboty konserwacyjne przepustu Samica Kierska



27.07.2021r. Po wykonaniu konserwacji przepustu Samica Kierska

Ryc. 37. Odmulenie przepustu w Samicy Kierskiej przez Poznańskie Spółki Wodne i Przedsiębiorstwo Usług Komunalnych w Rokietnicy (fot. PUK za zgodą prezesa PUK w Rokietnicy)

Tę kategorię robót jest prowadzi się zwykle punktowo, w znacznych odstępach czasu. Odznaczają się one zatem stosunkowo niewielkim stopniem bezpośredniej ingerencji w środowisko. Wymaga to jednak indywidualnej analizy, gdyż zdarzają się przypadki szczególne. Prace z tej grupy mogą mieć istotne oddziaływanie pośrednie, związane z utrwaleniem (a niekiedy wręcz z odtwarzaniem) negatywnego wpływu na środowisko istniejących urządzeń hydrotechnicznych, w tym szczególnie zabudowy poprzecznej (Prus i in. 2017).

- Rozbiórka lub modyfikacja tam bobrowych oraz zasypywanie nor bobrów w brzegach śródlądowych wód powierzchniowych

Ta grupa prac utrzymaniowych obejmuje usuwanie lub modyfikację tam bobrowych (usuwanie zgromadzonego przez bobry rumoszu drzewnego, przywracanie przepływu wód) oraz likwidację nor bobrów w brzegach rzek przez ich zasypywanie. Prawo wodne nie zalicza zasypywania nor innych gatunków zwierząt do prac utrzymaniowych (Prus i in. 2017).

Skutki tych prac dla ekosystemów wodnych mogą być zarówno negatywne (ograniczenie retencji i zróżnicowania siedlisk), jak i pozytywne (przywrócenie przepływu w ciekach zatamowanych przez bobry). Prace mają natomiast niewątpliwie negatywny wpływ na bobry, mogą spowodować ich przemieszczanie się tam, gdzie będą wyrządzały większe szkody.

Sieć drenarska (odwadniająco-nawadniająca)

Sieć drenarską tworzą zbieracze (o średnicy od 7,5 do 20 cm), sączki (o średnicy 5 cm) oraz budowle drenarskie (wyloty, studzienki drenarskie). Do wykonania sieci drenarskiej stosowano w Polsce rurki ceramiczne (sączki i zbieracze) oraz od 1973 roku rury drenarskie karbowane z nieplastifikowanego PCV, również owinięte materiałem filtracyjnym (słoma, włóknina melioracyjna, włókno kokosowe). O ile w przypadku zbieraczy rurociągi układano rowkowo (rowek wykopany ręcznie lub mechanicznie), o tyle w przypadku sączków stosowano dwa sposoby ułożenia sączków:

- rowkowy – rowek wykonany ręcznie lub mechanicznie, przy użyciu pługów drenarskich, koparek jedno- i wielonaczyniowych (np. ETC 202)
- bezrowkowy (od 1972 roku) – przy użyciu specjalistycznych maszyn do drenowania bezrowkowego (Bykowski 2014).

Podstawowymi oznakami mogącymi świadczyć o niewłaściwym funkcjonowaniu systemu drenarskiego jest powolne obsychanie gleby po roztopach zimowych, stagnowanie wody na polu po deszczach o dużym natężeniu czy miejscowe nadmierne uwilgotnienie gleby lub pojawienie się określonych gatunków roślin. Można na ich podstawie wnioskować o uszkodzeniu sieci drenarskiej, jej zamuleniu lub zarośnięciu korzeniami. Odkrywki sieci w tych miejscach pozwolą na ocenę stanu technicznego i podjęcie decyzji dotyczącej czyszczenia wybranych odcinków sieci drenarskiej lub jej renowacji. Do planowania, projektowania i wykonawstwa renowacji systemów drenarskich Kosturkiewicz i Szafranski (1990) opracowali stosowną instrukcję.

Przy zarośnięciu rurociągów korzeniami roślin lub znacznemu ich zamuleniu zbieracze i sączki można oczyścić za pomocą drutu. Czyszczenie rurociągów drenarskich wymaga następujących robót:

- wykonania na rurociągu odkrywek roboczych co 5 – 10 m
- wyjęcia 2 – 3 rurek z odkrywek i oczyszczenia ich z namułu
- oczyszczenia rurociągu między odkrywkami przez kilkakrotne przeciągnięcie drutu
- oczyszczenia dna w odkrywkach i ułożenia uprzednio wyjętych rurek
- zabezpieczenia rurek w odkrywce, przysypania ziemią urodzajną i zasypania odkrywek.

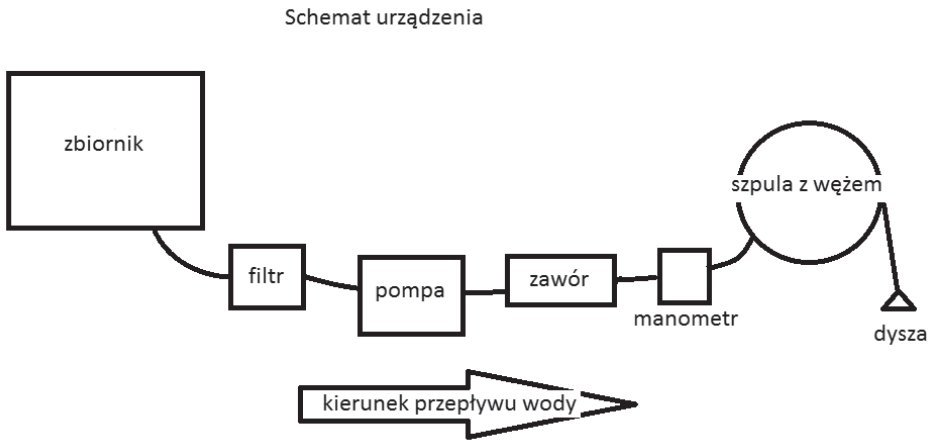
Do czyszczenia zalecane jest użycie drutu gładkiego o średnicy od 5 do 6 mm.

Przy lokalizacji rurociągów w terenie należy mieć na uwadze, że dokładność wykonania drenowania była następująca:

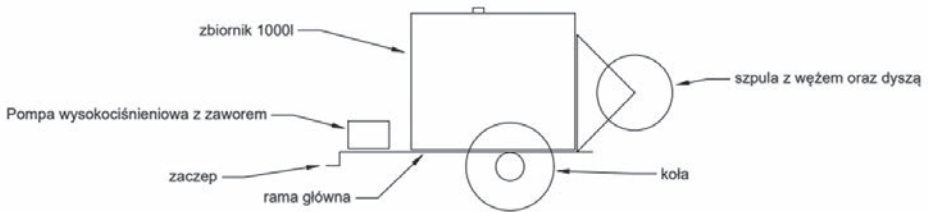
- odchyłka trasy zbieracza – 1,0 m
- odchyłka trasy sączka przy rozstawie < 12 m – 0,5 m
- odchyłka trasy sączka przy rozstawie 12-18m – 0,7 m
- odchyłka trasy sączka przy rozstawie > 18 m – 0,9 m
- odchyłka długości sączka – 2,0 m
- odchyłka przykrycia sączków – 0,1 m.

Płukanie wylotów oraz rurociągów można wykonać hydrodynamicznie, za pomocą specjalistycznych urządzeń wyposażonych w elastyczny wąż, który jest zakończony odpowiednio wyprofilowaną dyszą (Bala i Pichór 1987). Na rynku można obecnie znaleźć kilka ich typów, na przykład firm Preskan czy Brochard. Maszyny mogą posiadać zbiornik na czystą wodę lub wykorzystywać wodę z rowów. Są one jednak stosunkowo kosztowne, stąd warta odnotowania jest konstrukcja niedrogiego urządzenia opracowanego przez absolwenta Wydziału Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej – mgr. inż. Macieja Kaczanowskiego (2021). Koncepcja

urządzenia, która znana jest od lat 60. ubiegłego wieku, polega na przepłukiwaniu pod wysokim ciśnieniem rurociągów drenarskich z użyciem wody pobieranej z własnego zbiornika. W założeniu całość urządzenia miała być mobilna i mieścić się na podwoziu przyczepy z jedną osią, która ma współpracować z ciągnikiem rolniczym (ryc. 38 i 39).



Ryc. 38. Schemat układu podzespołów urządzenia do udrażniania systemów drenarskich (Kaczanowski 2021)



Ryc. 39. Szkic roboczy prototypu (Kaczanowski 2021)

Jego unikatowość polega na wykorzystaniu stosunkowo tanich i dostępnych części, które można złożyć w średnio wyposażonym technicznie gospodarstwie rolniczym. Efektem prac było urządzenie przedstawione na rycinie 40.

Wstępne wyniki eksploatacji maszyny wykazały jej skuteczność w odmuleniu wylotów i dolnych odcinków zbieraczy, co w wielu przypadkach przywraca sprawność funkcjonowania drenowania.



Ryc. 40. Prototyp urządzenia do płukania rurociągów drenarskich (Kaczanowski 2021)

Budowle drenarskie

Na sieci drenarskiej znajdują się wyloty drenarskie zlokalizowane w ujściu zbieracza do rowu oraz studzienki drenarskie (zbiorcze, kontrolne) zlokalizowane na zbieraczach, zgodnie z zasadami zawartymi między innymi w Wytocznych drenowania (1967, 1988). Budowle drenarskie zostały wykonane zgodnie z katalogami projektów typowych studzienek drenarskich i wylotów drenarskich, wydanyymi przez CBS i PWM w Warszawie.

Do wykonania budowli drenarskich z reguły stosuje się następujące materiały:

- studzienki: kręgi betonowe \varnothing 100 cm, pokrywy żelbetowe, klamry włazowe, cement portlandzki, piasek, pospółka lub żwir, papa izolacyjna
- wyloty: prefabrykaty betonowe na wyloty W-1, korytka betonowe, kratki do wylotów.

Obecnie do budowy studzienek używa się również elementów prefabrykowanych z tworzyw sztucznych. Ocena ich stanu technicznego polega na stwierdzeniu jakości betonu kręgów oraz pokrywy studni. W przypadku zamulenia osadnika studzienkę drenarską należy oczyścić z namulów.

Wszelkie roboty wykonywane w rejonie skrzyżowań z urządzeniami podziemnymi (np. gazociągi, kable) oraz powierzchniowymi (np. drogi) muszą być wykonywane pod nadzorem administrujących tymi urządzeniami.

Lokalizacja urządzeń melioracyjnych

Lokalizacja urządzeń melioracyjnych, w tym budowli naziemnych, nie nastręcza większych trudności, podobnie jak w przypadku rurociągów drenarskich, jeżeli posiada się odpowiednio dokładne, powykonawcze plany sytuacyjno-wysokościowe. Przy ich braku, co niestety zdarza się często w przypadku starych urządzeń, należy przeprowadzić poszukiwania rurociągów drenarskich w terenie. Poszukiwania rurociągów zaczynamy od wylotu drenarskiego w rowie. Niestety, czasami wskutek wieloletnich zaniedbań w utrzymaniu rowów wyloty mogą być w znacznym stopniu zamulone, a nawet znajdować się poniżej aktualnego dna rowu. Trasę początkowego odcinka zbieracza ustala się przez wizualną ocenę kąta wpadania wylotu do rowu. Dalszych odcinków zbieracza należy się spodziewać w zagłębieniach terenu, gdyż właśnie nimi, zgodnie z zasadami projektowania, najczęściej prowadzono zbieracz. Rurociągi najlepiej lokalizować wiosną, gdy profil glebowy jest nasiąknięty wodą. W okresie wegetacji rośliny są często bardziej rozwinięte wzdłuż prawidłowo działających rurociągów oraz mają wyraźniejszą barwę. Natomiast wzdłuż niesprawnych rurociągów, niezależnie od tego czy to sączki, czy zbieracze porastają rośliny charakterystyczne dla miejsc o nadmiernym uwilgotnieniu (np. skrzypy, oset, szczaw). Widoczny jest również spowolniony rozwój zbóż (Grzyb i in. 1985). Po wykonaniu orki i bronowaniu występują widoczne liniowe jaśniejsze przebarwienia gleby, co jest skutkiem niewymieszania się warstwy orno-próchnicznej z urobkiem wydobytym w czasie robót. Z biegiem czasu jest to widoczne, jednak coraz rzadziej.

Trasę przebiegu rurociągów (zbieraczy) wskazują też studzienki drenarskie. Po zdjęciu pokrywy nastudziennej można zweryfikować, z której strony zbieracz wpada do studni i określić kierunek jego przebiegu. Kontrola studzienek drenarskich pozwala też na ocenę sprawności funkcjonowania rurociągów (Pałys i Smoręda 1982). Spiętrzenie wody w studziencie może wskazywać na jego niedrożność poniżej studzienki. Brak wody wpadającej do studni, przy działających normalnie pozostałych zbieraczach, wskazuje z kolei na uszkodzenie rurociągu powyżej.

Zlokalizowanie sączków jest znacznie trudniejsze. Z zasady przyjmuje się, że biegną one równoległe do dróg czy rowów, jednak nie zawsze to się sprawdza. W przypadku dużych trudności ze zlokalizowaniem sączków należy usunąć

warstwę gleby o miąższości 30-40 cm, na szerokości minimum projektowanej rozstawy sączków i za pomocą sondy (szpilki – zastrzonego drutu o średnicy około 10 mm oraz długości 120-150 cm) należy zbadać podglebie (Pałys i Smoręda 1982). Możemy z dużym prawdopodobieństwem założyć, że w miejscach gdzie opór podczas wciskania sondy będzie mniejszy w porównaniu do pozostałych miejsc, znajduje się trasa rurociągu. Czasami po wyciągnięciu szpilki widoczny jest na zaostrowym końcu ślad w kolorze glinianej cegły (sączek ceramiczny). Niestety, większy problem jest w przypadku rurociągów z PCW.

W prowadzeniu robót utrzymaniowych na urządzeniach melioracyjnych należy mieć na uwadze podstawowe normy i wytyczne stosowane w wykonawstwie drenaży rolniczych:

PN-76/B-12040. Ceramiczne rurki drenarskie.

BN-78/6354-12. Rury drenarskie karbowane z nieplastyfikowanego polichloru winylu.

PN-93/B-12043. Drenowanie. Wykonawstwo. Roboty przygotowawcze.

BN-88/9191-16/20. Drenowanie. Układanie sączków drenarskich. Wymagania i badania przy odbiorze.

BN-78/9191-14. Bezrowkowe układanie rurociągów drenarskich. Wymagania i badania przy odbiorze.

BN-88/9191-16/07. Drenowanie. Projektowanie. Zabezpieczenie rurociągów drenarskich.

BN-62/6738-07. Beton hydrotechniczny. Wymagania techniczne.

PN-82/H-93215. Walcówka i pręty stalowe do zbrojenia betonu.

PN-75/D-96000. Tarcica iglasta ogólnego przeznaczenia.

BN-79/6751-01. Materiały izolacyjne. Papa asfaltowa.

BN-67/6744-08. Rury betonowe.

PN-88/B-30000. Cement portlandzki.

PN-86/B-06712. Kruszywa mineralne do betonu.

PN-89/B-27617. Papa asfaltowa.

Warunki techniczne wykonania i odbioru: Roboty drenarskie cz. I. Drenowanie gruntów ornych. Ministerstwo Rolnictwa: Warszawa 1980.

Wytyczne mechanizacji i organizacji robót drenarskich. Biuletyn Informacyjny Melioracje Rolne 1972 r.

Wytyczne drenowania gruntów ornych. Wyd. IMUZ: Falenty 1988, Materiały instruktażowe nr 65 zatwierdzone do stosowania przez Ministerstwo Rolnictwa, Leśnictwa i Gospodarki Żywnościowej, Departament Gospodarowania Ziemią i Melioracji 08.10.1988.

Wytyczne w sprawie drenowania użytków rolnych. Ministerstwo Rolnictwa 1967.

Instrukcja renowacji systemów drenarskich. Materiały instruktażowe IMUZ: Falenty 1990.

Konserwacje bieżące należy prowadzić systematycznie w ciągu roku, z uwzględnieniem terminów agrotechnicznych oraz harmonogramów nawodnień na eksploatowanych użytkach zielonych. Konserwacje gruntowne, znacznie ingerujące w środowisko przyrodnicze, można prowadzić w odstępach kilkuletnich, jednak zawsze po szczegółowej analizie potrzeb i lokalnych warunków obiektów.

Częstotliwość prowadzenia robót konserwacyjnych na rowach i kanałach melioracyjnych do celów rolnictwa powinna być następująca:

- koszenie roślinności na skarpach i w dnie rowu – dwa razy do roku, najlepiej w następujących terminach: od 20 maja do 30 czerwca i od 15 do 30 września
- usuwanie roślinności wodnej i podwodnej – raz w roku
- odmulenie dna rowów – na gruntach organicznych co dwa lata, na gruntach mineralnych co trzy lata.

Terminy wykonywania prac związanych z bieżącą i gruntowną konserwacją budowli piętrzących i komunikacyjnych powinny być dostosowane i zharmonizowane z terminami nawodnień. Okres wczesnej wiosny przed prowadzeniem nawodnień oraz okres od września do grudnia są szczególnie zalecane do wykonywania tych prac. Terminy konserwacji gruntownej przepustów przyjmuje się co dwa lub co trzy lata, równocześnie z konserwacją rowów, na których przepusty są posadowione. Dla budowli piętrzących okresy międzyobsługowe nie mogą być dłuższe niż trzy lata, przy systematycznym wykonywaniu konserwacji bieżących.

Należy podkreślić, że zaniedbania w bieżącym utrzymaniu rowów i kanałów melioracyjnych prowadzą do przyspieszonej utraty sprawności funkcjonowania całych systemów, a przywrócenie ich do właściwego stanu technicznego może w przyszłości wiązać się z wydatkowaniem znacznych nakładów na kosztowną odbudowę inwestycyjną. Jak wykazały bowiem stosowne obliczenia, stosunek kosztów wykonania konserwacji bieżącej, gruntowej i odbudowy inwestycyjnej ma się bowiem jak 1: 1,5 : 8.

Ekologiczne aspekty utrzymania urządzeń melioracyjnych

Największym problemem utrzymania urządzeń melioracyjnych jest pogodzenie wymagań środowiskowych z wymaganiami technicznymi warunkującymi sprawność ich funkcjonowania. Cieki, kanały i rowy pełnią bowiem w systemach melioracyjnych dwie różne funkcje – gospodarcze i ekologiczne. Funkcje gospodarcze są powszechnie znane, natomiast wiedza o funkcjach ekologicznych jest popularyzowana od 30 – 40 lat (Żelazo 1993, 2009). Z punktu widzenia ekologii utrzymanie w odpowiednim stanie technicznym cieków i kanałów melioracyjnych powinno zapewnić dobrą jakość wody oraz dobry stan ekosystemu wodno-łądowego. Roboty

konserwacyjne należy zatem wykonywać, wykorzystując technologię i zachowując terminy minimalizujące negatywne oddziaływanie na środowisko przyrodnicze (Ilnicki 1987, 1988, 1989). Stan taki można uzyskać dzięki właściwemu doborowi rodzaju maszyn i osprzętów roboczych, zastosowaniu przemiennej schematów technologiczno-organizacyjnych, dostosowaniu długości konserwowanych odcinków cieków do rozmieszczenia w korycie zbiorowisk roślinnych i zwierzęcych, wykonywaniu robót poza okresami ochronnymi organizmów czy pozostawieniu miejsc w stanie naturalnym w celu odbudowy biocenozy naruszonej w wyniku robót w korycie cieków (Bondar-Nowakowska 2009, Bondar-Nowakowska i Dejas 2005, Hachoł i Bondar-Nowakowska 2009). Trzeba mieć jednak na uwadze, że stosowanie technologii uwzględniających czynniki ekologiczne wpływa na wydajność robót i wielkość rocznej produkcji, a zatem na ekonomiczną efektywność funkcjonowania firm wykonawczych. Stąd już w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wskazywano na konieczność opracowania odpowiednich współczynników do technicznych norm ilościowych czasu pracy maszyn i robotników (np. Katalog Nakładów Rzeczowych KNR 15-01), które by uwzględniały ten aspekt robót (Dejas i Bondar-Nowakowska 1995). Chociaż cytowane katalogi nie są już obowiązujące, to nadal stanowią podstawę do rozliczenia robót, na przykład w spółkach wodnych.

Dodatkowe problemy w utrzymaniu kanałów i rowów melioracyjnych spotyka się również w przypadku ich lokalizacji na obszarach objętych programem NATURA 2000 (Przybyła i in. 2011). Rozpoczęcie inwestycji oraz wykonanie prac mogących wpływać na środowisko, w tym również robót konserwacyjnych i bieżącej eksploatacji, wiąże się z szeregiem procedur i uzyskaniem specjalnych pozwoleń. Zamieszkujący omawiane obszary oraz instytucje regionalne sprawujące nadzór na terenach objętych europejską siecią Natura 2000 często unikają podejmowania działań, obawiając się, że dalszy rozwój gospodarczy tych terenów będzie ograniczony. Skutkiem tego są wieloletnie zaniedbania w utrzymaniu i konserwacji urządzeń melioracyjnych mające wpływ na rozwój określonych typów siedlisk przyrodniczych oraz ograniczenia różnorodności przyrodniczej tych terenów. Przy przestrzeganiu odpowiednich procedur można dalej realizować określone przedsięwzięcia, a jednocześnie chronić przyrodę i wspomagać rozwój zagrożonych biocenozy (Przybyła i in. 2011).

Generalnie należy pamiętać, że obecnie poprawa gospodarowania wodą w rolnictwie polega głównie na odtworzeniu retencji glebowej i krajobrazowej, a także odstąpieniu od inwestycji mających na celu udroźnienie i regulowanie cieków – w konsekwencji przyspieszających odpływ wody ze zlewni i zwiększających ryzyko zarówno suszy (na terenach rolniczych), jak i powodzi (w dolnych odcinkach dużych rzek). To najpilniejsze zadania, które będą chronić zasoby wodne Polski i zapewnią trwałość produkcji rolnej, a zatem bezpieczeństwo żywnościowe kraju (Nawrocki i Nieznański 2020).

Poprawę gospodarowania wodą w rolnictwie mogą jednak dalej wspierać systemy melioracyjne, których rozwój ilościowy i jakościowy jest konieczny. Wskazuje na to na przykład publikacja E. Kacy z 2015 roku: „Średnio- i długoterminowe programy rozwoju melioracji wodnych w skali kraju i regionów”. W opracowaniu tym stwierdzono, że w ślad za rozwojem ilościowym powinien następować rozwój jakościowy melioracji, a więc oparty na wiedzy i polegający na wprowadzaniu innowacji produktowych, procesowych, strukturalnych oraz innowacji w dziedzinie organizacji i zarządzania melioracjami (Kaca i in. 2020). Wskazują na to wyniki badań uzyskanych w ramach projektu „Innowacje technologiczne oraz system monitoringu, prognozowania i operacyjnego planowania działań melioracyjnych dla precyzyjnego gospodarowania wodą w skali obiektu melioracyjnego (INOMEL)”. Projekt realizowano w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo” BIOSTRATEG, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (BIOSTRATEG3/347837/11/NCBR/2017). Projekt obejmował siedem badawczych pakietów roboczych i jeden pakiet przedwdrożeniowy. Pakiet „Opracowanie metod operacyjnego planowania regulowanych odwodnień i nawodnień podsięgowych” został uznany za kluczowy dla projektu, gdyż w wyniku jego realizacji powinna powstać grupa zweryfikowanych innowacji ukierunkowanych na wdrożenia w systemach melioracyjnych.

Zgodnie z wnioskiem projektu w pakietach podejmuje się tematykę operacyjnego planowania regulowanych odwodnień i nawodnień podsięgowych w skali obiektu melioracyjnego wyposażonego w innowacyjne, opracowane w ramach projektu, urządzenia do regulacji (hamowania) odpływu wody z obiektu oraz regulacji i pomiaru natężenia przepływu wody ujmowanej do nawodnień podsięgowych. Są to zagadnienia trudne i skomplikowane, szczególnie wobec sytuacji w Polsce, gdyż dotyczą operacyjnego wyznaczania w warunkach dużej niepewności między innymi terminów odwodnień i nawodnień, ich intensywności, a w przypadku nawodnień podsięgowych – wyznaczania pożądanego natężenia i czasu trwania poboru wody na ujęciu. Założono, że w opracowywanych w ramach prac rozwojowych metodach operacyjnego planowania działań melioracyjnych będą wykorzystywane możliwie proste, analityczne, koncepcyjne (empiryczne) modele regulowanych odwodnień i nawodnień podsięgowych, specyficzny monitoring uwilgotnienia gleby i stanów wód gruntowych oraz krótkoterminowe prognozy agro-hydro-meteorologiczne (Kaca i in. 2020).

Oczekuje się, że realizacja projektu przyczyni się do wzrostu wiedzy naukowej na temat prostych, koncepcyjnych analitycznych modeli i metod modelowania wpływu działań melioracyjnych (regulowane odwodnienia i nawodnienia) na stosunki powietrzno-wodne w glebie na zmeliorowanych obszarach użytków rolnych. Wdrożenie proponowanych metod powinno wpłynąć między innymi na ograniczenie skutków susz i niedoborów wody na obszarach zmeliorowanych (ok. 6,4 mln ha, tj. 36% geodezyjnej powierzchni użytków rolnych), na redukcję odpływu związków biogennych do wód, co jest bardzo ważne na terenach o szczególnym zagrożeniu wód związkami

azotu i fosforu ze źródeł rolniczych, na redukcję fal powodziowych, zwłaszcza w małych ciekach, oraz na zmniejszenie tempa degradacji (mineralizacji) zmeliorowanych gleb hydrogenicznych i emisji gazów cieplarnianych do atmosfery (Kaca i in. 2020).

Część wyników z realizacji projektu w Wielkopolsce została przedstawiona w kolejnym rozdziale monografii.

Literatura

- Bala W., Kwapisz J., Wróbel F. (1988): Planowanie zabiegów konserwacyjnych rowów w odwodnianych systemach melioracyjnych. *Inf. Region. Zakł. Upow. Post. AR Krak.*, 272, 15-26.
- Bala W., Kwapisz J., Wróbel F. (1990): Wyznaczenie normatywów obsługi rowów melioracyjnych na podstawie badań eksploatacyjnych. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, 28, 107-124.
- Bala W., Pichór W. (1987): *Technologia i organizacja robót wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa.
- Bondar-Nowakowska E. (2009): Mapa ryzyka ekologicznego w robotach konserwacyjnych na ciekach. *Nauka Przyr. Technol.* 3, 3, #80.
- Bykowski J. (2014): Bezrowkowa technologia drenowania w Polsce z perspektywy 40 lat badań i doświadczeń. *Wiad. Melior. Łąk.*, 1, 24-27.
- Bykowski J., Kozaczyk P., Przybyła Cz., Sielska I. (2005): Problemy eksploatacji systemów melioracyjnych Nizin Obrzańskich. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 506: 111-118.
- Bykowski J., Kozaczyk P., Przybyła Cz., Sielska I. (2007): Techniczno-ekonomiczne aspekty eksploatacji systemów melioracyjnych w zlewni Kościańskiego Kanału Obry. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 519: 47-55.
- Bykowski J., Przybyła Cz., Rutkowski J. (2011): Stan urządzeń melioracyjnych oraz potrzeby ich konserwacji warunkiem optymalizacji gospodarowania wodą w rolnictwie na przykładzie Wielkopolski. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 56 (3): 45-51.
- Bykowski J., Szafranski Cz., Fiedler M. (1998): Potrzeby modernizacji systemów melioracyjnych dla optymalnego kształtowania zasobów wodnych użytków rolnych. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, 355, 59, 47-55.
- Bykowski J., Szafranski Cz., Fiedler M. (2001): Stan techniczny i uwarunkowania ekonomiczne eksploatacji systemów melioracyjnych. *Zesz. Nauk. Wydz. Bud. Inż. Środ. Polit. Kosz.*, 20, 715-723.
- Dejas D., Bondar Nowakowska E. (1995): Mechanizacja robót konserwacyjnych na tle wymagań ekologicznych. *Zesz. Nauk. AR Wrocł.*, 266, *Konf.* 8, 261-266.
- Gruszczyński J., Krzywiec H. (1993): Wybrane technologie utrzymania systemów melioracyjnych. *Wiad. Melior. Łąk.*, 2, 61-64.
- Gruszczyński J., Kwapisz J. (1995): Zalecenia technologiczne wykonywania robót konserwacyjnych na rowach i kanałach melioracyjnych. *Pol. Tow. Inż. Rol.*, 2, 121-125.
- Gruszczyński J., Kwapisz J., Łokas M. (1996): Stan urządzeń melioracyjnych eksploatowanych w systemach nawadniająco-odwadniającego w dolinie rzeki Mierzwicy. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, *Tech. Rol.*, 14, 53-66.
- Gruszczyński J., Kwapisz J., Łokas M., Vogelgesang J., Woźniak A. (1996): Ocena efektywności procesu eksploatacji systemów nawadniająco-odwadniającego. *Zesz. Nauk. AR Krak.*, *Tech. Rol.*, 14, 19-40.
- Gruszczyński J., Kwapisz J., Łokas M., Woźniak A. (1993): Metoda doboru zestawów technologicznych do robót konserwacyjnych dla rowów i kanałów melioracyjnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 408, 387-393.
- Grzyb H., Kocan T., Rytel Z. (1985): *Melioracje*. PWRiL, Warszawa.
- GUS (2020): *Rocznik statystyczny rolnictwa*. Warszawa.

- Ilnicki P. (red.) (1987): Warunki prowadzenia robót z zakresu melioracji i gospodarki wodnej na terenach o szczególnych wartościach przyrodniczych. PIOŚ, Warszawa.
- Ilnicki P. (1988): Ekologiczne aspekty konserwacji cieków wodnych. *Wiad. Melior. Łąk.*, 7, 173-179.
- Ilnicki P. (1989): Warunki prowadzenia gospodarki rolnej w dolinach rzek w aspekcie zachowania naturalnych walorów przyrodniczych. Red. W. Mioduszewski. Rola melioracji w środowisku przyrodniczym. Polska Akademia Nauk, Warszawa: 89-115.
- Kaca E. (red.) (2020): Operacyjne sterowanie procesem nawodnień podsiągowych i odwodnieni – komputerowy system wspomagania decyzji wraz z przykładami zastosowania. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Kaca E., Interewicz A. (1991): Metodyka oceny stanu technicznego urządzeń melioracyjnych w systemach nawodnień podsiągowych. *Mat. Konf. Nauk. Postęp w projektowaniu i eksploatacji systemów nawodnień podsiągowych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 90-99.
- Kaczanowski M. (2021): Opracowanie technologii stosowania hydrodynamicznej metody udrożnienia systemów drenarskich z wykorzystaniem własnego prototypu urządzenia. Praca magisterska. Wydz. Inż. Środ. Inż. Mech. UPP, Poznań.
- KNP cz. 13. (1982). Katalog norm pracy. Roboty budownictwa wodnego (melioracyjne i regulacyjne). Resort. Ośr. Org. Norm Pracy, Warszawa.
- KNR 15-01 (1989). Katalog nakładów rzeczowych nr 15-01. Roboty remontowo-konserwacyjne melioracji i zaopatrzenia wsi w wodę. Tom 1. Roboty remontowo-konserwacyjne melioracji. Min. Roln. Leśn. Gospod. Żywn., Warszawa.
- Kosturkiewicz A., Bykowski J. (1991): Konserwacja i sprawność działania urządzeń drenarskich. *Rocz. AR Pozn.*, 224, 33-39.
- Kosturkiewicz A., Szafrński Cz. (1990): Obsługa systemów melioracyjnych – utrzymanie. Instrukcja renowacji systemów drenarskich. IMUZ, Falenty.
- Manteuffel Szoego H., Interewicz A. (1995): Eksploatacja systemów melioracyjnych w świetle monitoringu ekonomicznego w latach 1987-1992. *Wiad. Melior. Łąk.*, 3, 122-125.
- Marcilonek S. (1979): Eksploatacja urządzeń melioracyjnych. Wydawnictwo AR, Wrocław.
- Marcilonek S. (1994): Eksploatacja urządzeń melioracyjnych. Wydawnictwo AR, Wrocław.
- Marcinek J. (1994): Rozmiary erozji wodnej gleb w Wielkopolsce. *Rocz. AR Pozn.*, 14: 63-73.
- Nawrocki P., Nieznański P. (2020): Utrzymanie rzek a środowisko i susza, Potrzeba radykalnej zmiany dotychczasowych praktyk w gospodarowaniu wodami na terenach rolniczych. Ekspertyza. Woda w rolnictwie. Koalicja Żywa Ziemia 2020.
- Nyc K., Pokładek R. (2004): Współczesne problemy eksploatacji w melioracjach. *Woda – Środ. - Obsz. Wiej. IMUZ, Falenty*: 31-46.
- Nyc K., Pokładek R. (2008): Aktualne problemy melioracji użytków zielonych. *Woda – Środ. - Obsz. Wiej. IMUZ, Falenty*: 97-103.
- Nyc K., Pokładek R. (2009): Eksploatacja systemów melioracyjnych podstawą racjonalnej gospodarki wodnej w środowisku przyrodniczo-rolniczym. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Wrocław.
- Pały F., Smoręda Z. (1982): Poradnik technika melioranta. PWRiL, Warszawa.
- Pierzgalski E. (2011): Systemy i urządzenia melioracyjne przegląd problemów. *Kontrola Państw.*, 1, 48-60.
- Prus P., Popek Z., Pawlaczyk P. (2017): Dobre praktyki utrzymania rzek. Wydawnictwo WWF.
- Przybyła Cz., Bykowski J., Marcinkowska R. (2012): Efektywność robót konserwacyjnych w programie „Rowy”. *Rocz. Ochr. Środ.*, 14, 834-843.
- Przybyła Cz., Bykowski J., Rutkowski J. (2011): Środowiskowe uwarunkowania konserwacji cieków melioracyjnych w aspekcie wykorzystania wielozadaniowej maszyny nowej generacji. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 56 (4), s. 71-78.

- Rutkowski J., Bykowski J., Pawłowski T., Przybyła Cz., Ratajczak P., Woźniak P. (2011): Potrzeby w zakresie konserwacji rowów i kanałów melioracyjnych podstawą koncepcji nowej maszyny. *Nauka Przyr. Technol.*, 5, 5, #94.
- Stąpel Z. (1995): Podstawy sterowania jakością użytkową urządzeń melioracji szczegółowych. *Zesz. Nauk. AR Wroc.*, 266, Konf. 8, 29-37.
- Stąpel Z., Gołaszewski M. (1986): Instrukcja przeglądów okresowych stanu technicznego budowli melioracyjnych. IMUZ, Falenty. Maszynopis.
- Szafrański Cz., Bykowski J. (1994): Opinia dotycząca celowości usuwania drzew i krzewów rosnących w dnie i na skarpach rowów melioracyjnych. Ekspertyza wykonana na zlecenie Wielkopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu. Katedra Melioracji Rolnych i Leśnych AR w Poznaniu. Maszynopis.
- Szafrański Cz., Fiedler M., Stasik R. (1997): Wpływ przebiegu warunków meteorologicznych na stopień zagrożenia erozją wodną gleb Pojezierza Gnieźnieńskiego. *Rocz. AR Pozn.*, 294, 19, 141-149.
- Ustawa Prawo Wodne (2001). *Dz.U.* 2001 nr 115 poz. 1229.
- Ustawa Prawo Wodne (2017). *Dz.U.* 2017 poz. 1566.
- Walczak N., Hämmerling M., Bykowski J., Walczak Z. (2015): Ekonomiczne i hydrauliczne kryteria utrzymania dobrego stanu rowów melioracyjnych. *J. Agribus. Rural Dev.*, 1 (35), 137-146.
- Zuber S. (1983): Stan i potrzeby drenowań gruntów ornych oraz przyczyny wadliwego działania urządzeń drenarskich i sposoby ich usprawnienia. *Wiad. Melior. Łąk.*, 12, 336-339.
- Żelazo J. (1993): Współczesne poglądy na regulację małych rzek nizinnych. *Ochrona przyrody i środowiska w dolinach nizinnych rzek Polski*. Red. L. Tomiałojć. Wydawnictwo Instytutu Ochrony Przyrody PAN, Kraków: 145-154.
- Żelazo J. (2009): Wybrane problemy zabudowy rzek o szczególnych wartościach przyrodniczych. *Nauka Przyr. Technol.*, 3, 3, #13.

Odptyw sterowany jako kompleksowe podejście do tradycyjnych melioracji

Michał Napierata

Rosnący deficyt wody, a zarazem coraz bardziej nieprzewidywalne i gwałtowne zjawiska pogodowe powodują konieczność dostosowania się do zachodzących zmian. Rolnictwo w tym zakresie jest najbardziej narażone i wymaga podjęcia działań natychmiastowych mających na celu załagodzenie ich skutków, przede wszystkim przez ochronę zasobów wodnych. Metod jest bardzo wiele, a jednym ze sposobów retencjonowania wody może być wykorzystanie istniejącego systemu melioracyjnego, zaadaptowanego do nowych warunków gospodarowania.

Melioracje, za sprawą pewnych środowisk, kojarzone były i niestety nadal są wyłącznie jako działania negatywne, związane z nadmiernym osuszaniem gleb czy nawet zmniejszaniem zasobów wód podziemnych. Szerzenie takich poglądów nie znajduje jednak potwierdzenia w praktyce. Lata 1960–1980 to okres, w którym prowadzone były intensywne prace melioracyjne. Zmeliorowano wówczas około 4 mln użytków rolnych. Gdyby więc wyrażana opinia była prawdziwa, to poziom płytkich wód gruntowych powinien w tym czasie znacznie się obniżyć. Tymczasem wyniki badań Chełmińskiego (2001) nie potwierdzają takiej tendencji, bowiem w większości przypadków (62%) we wspomnianym okresie zanotowano istotne podwyższenie poziomu tych wód. Co więcej, wyniki badań Zabłockiego (2017) wskazują wręcz na istotną rolę oddziaływania systemów drenażu w ochronie jakości wód przypowierzchniowego poziomu wodonośnego. Jak widać, opinie na temat skutków melioracji są różne. Warto więc wrócić do początku i genezy tych działań, a właściwie



odnieć się do samego terminu „melioracja”, pochodzącego od łacińskiego *meliorare* i oznaczającego nic innego jak: poprawiać, polepszać. Należy pamiętać, że zasadniczym celem i zadaniem melioracji jest przede wszystkim regulowanie stosunków powietrzno-wodnych w glebie dla stworzenia możliwie dobrych warunków wzrostu roślin uprawnych, uwzględniając przy tym ich funkcję odwadniająco-nawadniającą. Badania wskazują (Stryjewski 1975), że melioracje gruntów ornych na glebach ciężkich korzystnie wpływają na ich strukturalność i właściwości fizyczne. Gleby takie stają się bardziej przewiewne, przepuszczalne i mają większą zdolność retencjonowania wody. Ponadto na glebach zdrenowanych spływy powierzchniowe są mniejsze, ograniczając tym samym ich erozję i wypłukiwanie związków nawozowych z powierzchni gleby do otwartych zbiorników wodnych. Proces polepszania produktywności gleb dzięki drenowaniom ma jednak również negatywne skutki i konsekwencje. Stosowanie melioracji w nowoczesnym rolnictwie precyzyjnym, skupionym głównie na ciągłym zwiększaniu plonowania przez intensyfikację produkcji, przyczynia się do większego zanieczyszczenia środowiska przez odpływy drenarskie. Chodzi tu przede wszystkim o odprowadzanie siecią melioracyjną związków azotu, fosforu czy nawet resztek pestycydów, które trafiają bezpośrednio do rowów, kanałów, strumieni, rzek bądź jezior. W efekcie proces ten przyczynia się do nadmiernej eutrofizacji zbiorników wodnych oraz powiększania tzw. „martwej” strefy związanej ze wzrostem obszarów o niskiej zawartości tlenu rozpuszczonego w wodzie.

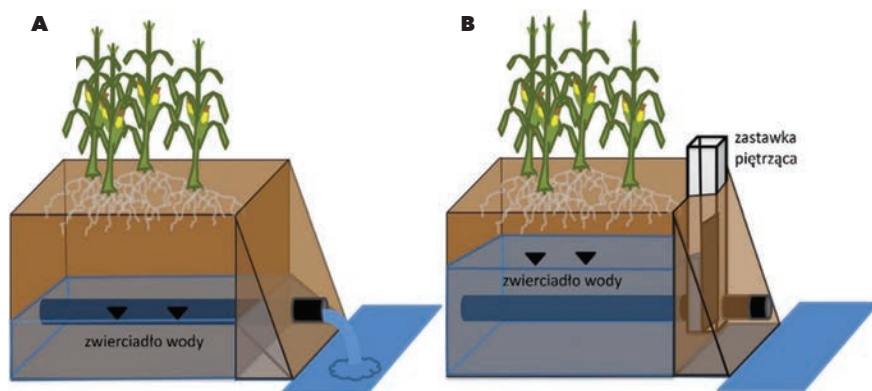
Czy zatem możliwe jest korzystanie z istniejących melioracji bez szkody dla istniejącego środowiska? Opinie na ten temat są podzielone. Jednak zdaniem Napierały (2019) do melioracji trzeba podchodzić dziś pragmatycznie. Nie da się niestety już cofnąć czasu, kiedy rozwój melioracji w Polsce i na świecie był podyktowany istniejącą potrzebą rozwoju rolnictwa, niekiedy destrukcyjną dla środowiska (m.in. przez osuszanie torfowisk). Istniejące systemy melioracyjne są i będą stałym elementem krajobrazu, nie tylko rolniczego, czy tego chcemy, czy nie. Dlatego należy skupić się na możliwości adaptacji istniejącej infrastruktury technicznej do pełnienia nowych funkcji, które wcześniej nie były uwzględniane na etapie jej projektowania. Oczywiście należy to robić tam gdzie istnieje taka potrzeba. Zdaniem Grygoruka (2018) cześć sieci melioracyjnej na obszarach zalewowych powinna być zlikwidowana na rzecz „zielonej infrastruktury” zapobiegającej w naturalny sposób suszom i powodziom. Potrzeba jednak w tym celu stworzenia narzędzi finansowych kompensujących właścicielom zmianę charakteru wykorzystania tych terenów.

W melioracjach preferowane jest obecnie stosowanie rozwiązań kombinowanych, łączących tradycyjne systemy z nowymi innowacyjnymi rozwiązaniami i technologiami pozwalającymi między innymi na ich dostosowanie do nowych funkcji. Wystarczy spojrzeć chociażby na rozwijające się na obrzeżach miast osiedla, które do niedawna stanowiły jeszcze pola uprawne. Postęp suburbanizacji jest tak duży, zwłaszcza w obrębie dużych aglomeracji, że konieczne stało się

przystosowanie i adaptacja istniejących rowów melioracyjnych do nowych funkcji (Przybyła i in. 2011). Co więcej, urządzenia te stały się na tych terenach wręcz nieodzowne, a jakiegokolwiek zaniedbania w zakresie prac konserwacyjnych wiązały się z poważnymi problemami okresowych lokalnych powodzi czy podtopień. Co więc robić, aby obie strony interesariuszy były zadowolone? Z obserwacji rynku rolnego i stopniowo pogarszającej się efektywności produkcji wynika, że właściwie działające melioracje staną się jednym z istotnych elementów mogących znacznie poprawić opłacalność tego sektora gospodarki. Ważne jest to, że w perspektywie zachodzących zmian klimatycznych podejmowane są już działania na szczeblu państwowym w zakresie właściwego zagospodarowania i ochrony zasobów wodnych (LPW 2020, PPSS 2020). Jednym z takich działań może być adaptacja istniejących systemów drenarskich, która przy odpowiednich działaniach zarządczych stanie się zabiegiem korzystnie wpływającym na gospodarkę wodną pola i otoczenia. Warto przy tym dodać, że działania te, w głównej mierze polegające na wstrzymywaniu odpływu drenarskiego za pomocą odpowiednich urządzeń piętujących, możliwe są zarówno na istniejącej, jak i nowo powstającej sieci odwadniającej. W ten sposób zredukować można znaczną ilość biogenów, które do tej pory swobodnie odpływały drenami. Dlatego tak ważne jest wzmacnianie wśród społeczeństwa świadomości o znaczeniu i roli melioracji we współczesnym świecie. Nie ma bowiem idealnego systemu, a melioracje w tej kwestii mają akurat jeszcze wiele do zaoferowania.

Zastosowanie odpływu kontrolowanego na sieci drenarskiej

Odpływ kontrolowany, czy też inaczej sterowany, został po raz pierwszy zaimplementowany na sieci drenarskiej, na polderze Noordoost w Holandii w 1950 roku (Stuyt 2013). Od tego czasu praktyka ta rozprzestrzeniła się na cały świat i stosowana jest między innymi w USA, Kanadzie, Chinach, Bangladeszu, Egipcie, Włoszech, Czechach, Niemczech, Litwie czy w Szwecji. Kluczem do rozwoju kontrolowanego odpływu jest zrozumienie panujących reżimów hydrologicznych w danej zlewni, ponieważ pozwala to na osiągnięcie najlepszej równowagi między usuwaniem wody i jej retencją a identyfikacją miejsc i czasów odpływu. Zrozumienie tego faktu spowodowało, że odpływ sterowany (ang. *Control Drainage*) jest obecnie traktowany kompleksowo jako jedna z podstawowych zasad zarządzania wodą, wdrażana w ramach tzw. BMS-ów (ang. *Best Management Practices* – Najlepszych Dostępnych Praktyk), będących swoistym odpowiednikiem Dobrych Praktyk Rolniczych. Stąd też w literaturze obcej tego typu działania znane są bardziej pod takimi terminami jak: DWM (ang. *Drainage Water Management*) czy też CAD (ang. *Climate Adaptive Drainage*) i oznaczają nic innego jak zarządzanie wodą drenarską (ryc. 41). W Polsce pierwsze wzmianki o tego typu rozwiązaniu pojawiły się w poradniku Mioduszewskiego (2003).



Ryc. 41. Drenowanie konwencjonalne (A) i drenowanie sterowane (B)

Brak zainteresowania tym tematem należy wiązać z faktem, że w tamtym czasie w kraju funkcjonowała jeszcze dość dobrze i szeroko rozwinięta infrastruktura urządzeń piętrzących na ciekach otwartych. To właśnie ten system sterowania odpływem przez lata sprawdzał się i funkcjonował w Polsce, gdy gospodarka rolna była scentralizowana. Wówczas możliwe było podejmowanie jednoznacznej decyzji o piętrzeniu wody w rowach czy kanałach melioracyjnych, zwiększając tym samym retencję korytową na znacznym obszarze (systemy melioracyjne). Sytuacja zmieniła się po roku 1990, kiedy doszło do prywatyzacji państwowych gospodarstw rolnych, a pozostałe grunty rolne przejął Skarb Państwa lub prywatni właściciele. Spowodowało to, że sposób gospodarowania wodą za pomocą istniejącej infrastruktury melioracyjnej na ciekach otwartych stał się utrudniony lub po prostu niemożliwy z powodu przede wszystkim powstającego konfliktu interesów. Obecnie pola przylegające do określonego rowu czy kanału melioracyjnego należą często do różnych właścicieli, którzy nie zawsze godzą się na to, aby wodę w danym terminie spiętrzyć lub nie, z uwagi na specyfikę uprawianych tam roślin i ich różnych potrzeb wodnych. Dlatego gospodarka wodna w obrębie pola, a dokładniej zbieracza i wylotu drenarskiego, na którym można zastosować regulator piętrzenia, nabiera znaczenia. Co ważne, takie podejście umożliwi również przywrócenie sprawności eksploatacyjnej dawnym urządzeniom piętrzącym na rowach i kanałach otwartych.

Na czym polega zarządzenie wodą na obiekcie drenarskim?

Od lat 70. ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki zaczęto w rolnictwie propagować system kontrolowanego odpływu. Jest to nic innego jak zastosowanie na jednym z wylotów drenarskich lub zbieraczu okresowego ograniczenia lub nawet wstrzymania odpływu. Działania te polegają w głównej mierze na zastosowaniu

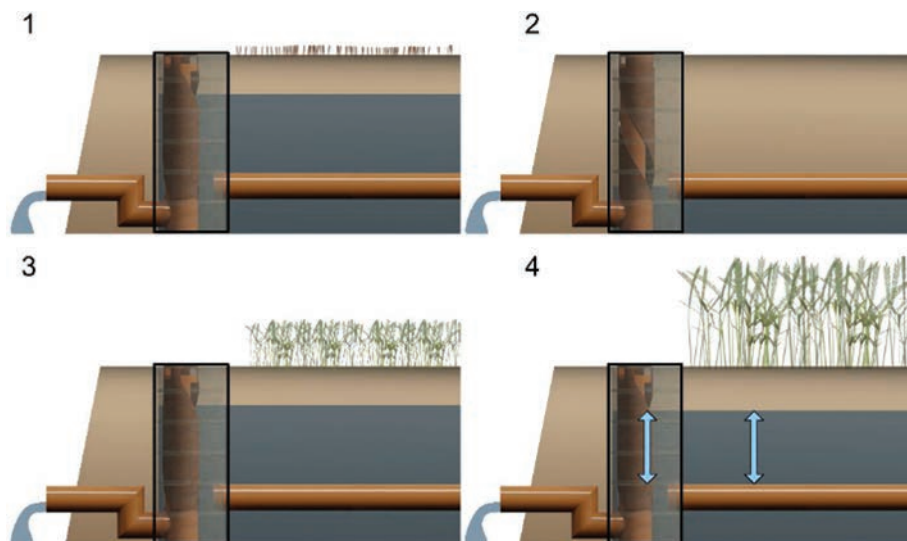


Ryc. 42. Montaż regulatora odpływu

urządzenia do opóźniania odpływu, tzw. regulatora piętrzenia (ryc. 42). Montuje się go zwykle na ujściu, w obrębie danego obiektu drenarskiego, w domyśle rozumianego jako dział drenarski. Sam dział drenarski to natomiast pewien obszar pola uzbrojony w podziemną infrastrukturę sączków, drenów i zbieraczy połączonych ze sobą w jedną sieć, mającą swe ujście w rowie w postaci wylotu drenarskiego. Właściwe gospodarowanie wodą na terenach wyposażonych w system regulowanego odpływu powinno być prowadzone według określonych zasad (ryc. 43):

- tuż po zbiorze roślin woda jest zatrzymywana w polu w celu zredukowania odpływu składników pokarmowych dostarczanych roślinom podczas nawożenia (1)
- przed siewem (wiosna) i przed żniwami (lato) woda z systemu jest odprowadzana w celu umożliwienia przeprowadzenia prac polowych (2)
- po siewie odpływ z systemu jest wstrzymywany w celu zapewnienia optymalnych warunków do rozwoju roślin (3)
- w sezonie wegetacyjnym możliwe jest sterowanie poziomem wód gruntowych w łanie w zależności od rodzaju uprawy. W tym okresie szczególnie ważna jest kontrola poziomu wód gruntowych oraz zatrzymanie maksymalnej ilości wody w obrębie obiektu – systemu melioracyjnego, nie powodując równocześnie uszkodzenia systemu korzeniowego roślin poprzez ich podtopienie (4).

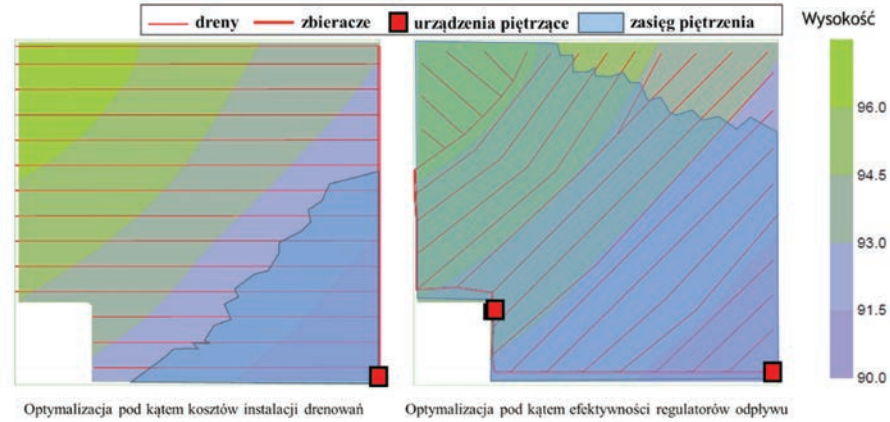
Od tego czy dany obiekt drenarski ma potencjał, by zastosować na nim urządzenia do sterowania odpływem, zależy będzie głównie od ukształtowania powierzchni, rodzaju gleby czy warunków meteorologicznych. Im teren bardziej płaski, tym



Ryc. 43. Zasada działania kontrolowanego odpływu (Sojka i Napierała 2020)

„wydajność”, a właściwie zasięg oddziaływania urządzenia piętrzącego będzie większy, a co za tym idzie, bardziej opłacalny. Drenaż sterowany najlepiej sprawdza się na względnie płaskich polach o średnich nachyleniach mniejszych niż 0,5%, chociaż nie ma przeciwwskazań, aby stosować go także na terenach o większych spadkach. Z ekonomicznego punktu widzenia większe nachylenie terenu wymaga jednak zastosowania większej liczby urządzeń kontrolnych. Dlatego w praktyce nie powinno ono przekraczać 1%. Zaleca się również, aby każda budowla piętrząca montowana była co każde 30-50 cm różnicy wysokości terenu. Jest to niezbędne do utrzymania jednolitego poziomu zwierciadła wody na polu. Szacuje się, że zasięg oddziaływania jednego regulatora obejmuje obszar około 4 ha. Wykonując nowe systemy drenarskie na potrzeby kontrolowanego odpływu, należy zastosować zmodyfikowany przebieg sieci melioracyjnej. Sieć drenarska prowadzona jest wtedy równolegle do przebiegu poszczególnych warstw wysokościowych. W ten sposób można zoptymalizować zasięg oddziaływania urządzeń piętrzących (ryc. 44).

Podobnie jest z istniejącą już siecią drenarską. Jednak tutaj optymalizacja położenia regulatorów jest utrudniona z uwagi na już istniejącą infrastrukturę, co może niekiedy wymagać większych nakładów pracy związanej z częściową przebudową sieci melioracyjnej. W celu efektywnego sterowania wodą w systemach regulowanego odpływu można również dodatkowo wyposażać obiekt w urządzenia do automatycznych pomiarów warunków hydrometeorologicznych, w tym monitoringu stanów wód gruntowych i wilgotności gleby. Na rynku pojawiły się już gotowe rozwiązania z automatycznym systemem sterowania odpływem. Jednym z nich jest



Ryc. 44. Optymalizacja przebiegu sieci drenarskiej w celu poprawy efektywności urządzeń piętrzących

Smart Drainage System firmy Agridrain. Regulacja odpływu odbywa się tutaj autonomicznie na podstawie analizy prognozy pogody i aktualnych warunków glebowych (ryc. 45).

Takie regulatory pozwalają na racjonalne wykorzystywanie zasobów wodnych, szczególnie przez zredukowanie odpływów drenarskich oraz zwiększenie uwilgotnienia gleby. Ograniczając odpływy, mamy również możliwość zredukowania strat składników nawozowych (szczególnie związków azotu, fosforu czy nawet potasu).



Ryc. 45. Smart Drainage System firmy AgriDrain (USA) w praktyce (<https://www.agridrain.com/smart-drainage-system/>)

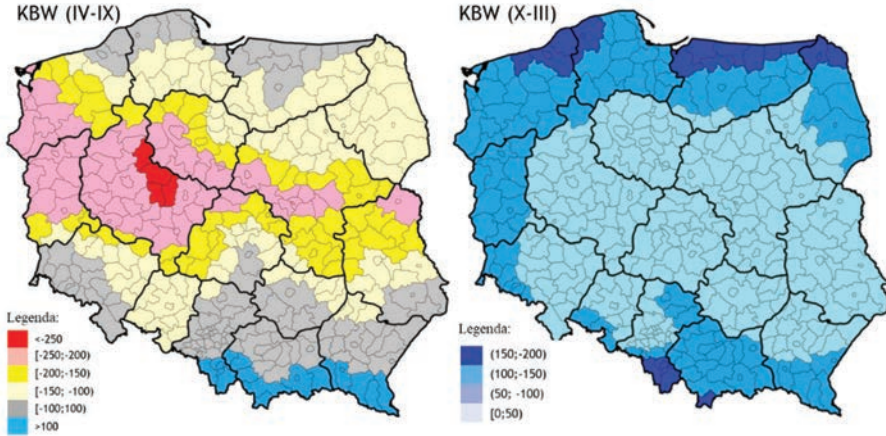
Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia wymagań wynikających z ustawy Prawo wodne (2017) oraz programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych i zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu środowiska (założenia Dyrektywy Azotanowej z 12 grudnia 1991 r.).

Warto wspomnieć, że od 2018 roku Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu prowadzi pionierskie w skali kraju badania na temat sposobu i roli kontrolowanego odpływu na gospodarkę wodną gleb. Badania realizowane są w ramach ogólnopolskiego projektu INOMEL-Biostrateg, finansowanego przez NCBiR, oraz projektu Inkubator Innowacyjności 2.0 finansowanego przez MNiSW. W ramach tego ostatniego przeprowadzono również badania wdrożeniowe. Efektem tych działań było wprowadzenie na rynek przez Centrum Innowacji i Transferu Technologii przy Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu gotowego produktu – regulatora piętrzenia. Nabywcą technologii jest firma ASC Technologie z Poznania.

Perspektywy i obawy związane z wdrażaniem kontrolowanego odpływu w warunkach polskich

Jednym z podstawowych sposobów pozwalających oszacować możliwość potencjalnego odpływu z sieci drenarskiej jest klimatyczny bilans wodny (KBW) pokazany na rycinie 46. Stanowi on różnicę między zasilaniem opadowym, czyli wysokością opadów, a parowaniem terenowym. Klimatyczny bilans wodny świadczy o potencjalnym niedoborze lub nadmiarze opadu, które z kolei są istotnymi parametrami do oceny potrzeb nawadniania i odwadniania terenów rolniczych. Dodatnia wartość KBW oznacza, że w okresie, którego dotyczy, wystąpiła przewaga opadów nad parowaniem, a więc istnieje ryzyko powstania odpływów. W przypadku ujemnej wartości KBW mamy do czynienia z sytuacją przeciwną, parowanie przeważa nad opadami. Wartość klimatycznego bilansu wodnego zwykle rozpatrywana jest dla okresów wegetacyjnych, istotnych z punktu widzenia chociażby zaopatrzenia rolnictwa w wodę. Natomiast pod kątem potencjalnego odpływu z sieci drenarskiej zasadniczą rolę odgrywa okres zimowy.

W Polsce średnia wartość klimatycznego bilansu wodnego w okresie od kwietnia do końca września na większości obszaru kraju jest ujemna i wynosi średnio -145 mm. Oznacza to, że w tych rejonach występuje potencjalnie niedobór wody opadowej. Najmniejszą wartość (-125 mm) osiąga na Podkarpaciu i w południowej Małopolsce w agroklimacie wilgotnym i umiarkowanie ciepłym. Największe wartości uzyskano natomiast na Pobrzeżu Szczecińskim (-220 mm) w agroklimacie suchym i umiarkowanie ciepłym oraz Pojezierzu Wielkopolskim (-240 mm) w agroklimacie suchym i ciepłym. W tym względzie Wielkopolska jest regionem

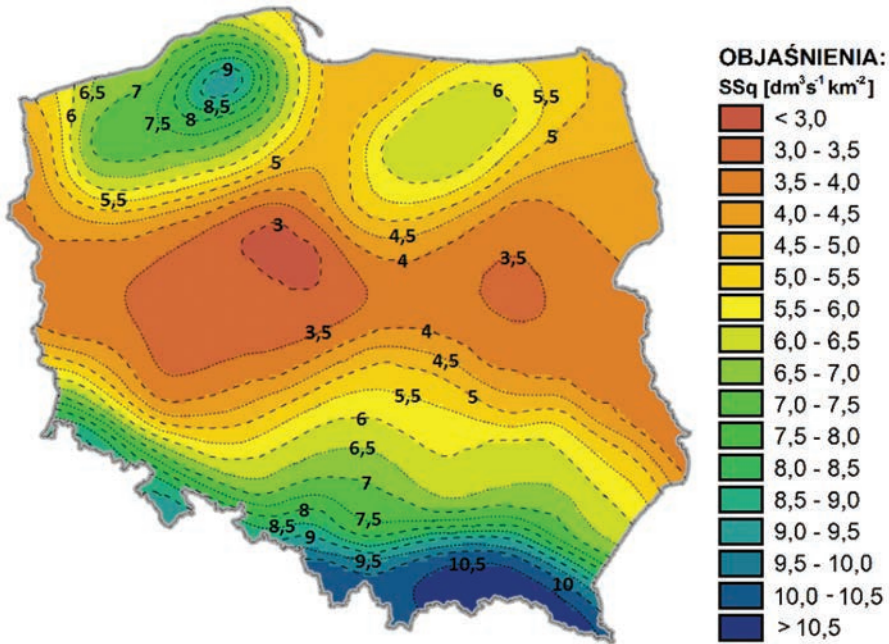


Ryc. 46. Klimatyczny Bilans Wodny dla Polski w sezonie letnim i zimowym (Łabędzki i Bąk 2014)

najbardziej deficytowym pod względem opadów atmosferycznych w kraju. Szczególnie niekorzystny dla produkcji roślinnej rozkład opadów występuje w rejonie Gniezna. Klimatyczny bilans wodny w roku średnim w okresie wegetacyjnym może osiągnąć wartość nawet -255 mm. Natomiast wartości dodatnie klimatyczny bilans wodny osiąga tylko w powiatach położonych na południu i południowym wschodzie Polski. Wartości te są na poziomie 100 mm. W przypadku okresu zimowego liczonego od października do końca marca średni klimatyczny bilans wodny wynosi 102 mm i w żadnym rejonie kraju nie spada poniżej 50 mm. Oznacza to, że w Polsce w okresie zimowym występuje potencjalnie nadmiar wody opadowej w stosunku do parowania. Istnieją więc potencjalne przesłanki do powstawania w tym okresie odpływów drenarskich, a więc i okazja do ewentualnego ich opóźnienia czy zatrzymania.

Największy klimatyczny bilans wodny (190 mm) występuje w południowej Małopolsce, a najmniejszy w Kotlinie Kłodzkiej (60 mm). Inną wielkością charakteryzującą dodatkowo ogólne potrzeby stosowanie opóźniania odpływów z sieci drenarskich są zasoby płynących wód powierzchniowych i określające je średnie odpływy rzeczne SSQ (ryc. 47). Przeciętnie nieco więcej niż jedna czwarta opadów atmosferycznych odpływa rzekami. Należy mieć również na uwadze, że w Polsce odpływ rzeczny podlega dużej zmienności przestrzennej spowodowanej znacznym zróżnicowaniem warunków środowiska geograficznego i klimatu. Średnie roczne odpływy jednostkowe, odzwierciedlające naturalne zasoby wodne zlewni, osiągają największe wartości w zlewniach rzek górskich, a najmniejsze rzek nizinnych.

Średni odpływ jednostkowy jest najmniejszy w pasie nizin środkowych ($2 - 4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), większy na wyżynach (do $5 - 6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), a największy w górach (do $10 - 20 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). W Tatrach przekracza nawet $40 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$



Ryc. 47. Rozkład jednostkowego odpływu średniego rocznego SSq w Polsce w latach 1951-2010 (Szymczak 2014)

i osiąga około $100 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ w Potoku Olczyskim. Wyraźnie większy odpływ średni obserwuje się również w północnych regionach kraju, tj. na pojezierzach i Przymorzu ($8 - 10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Co to oznacza dla melioracji? Z gospodarczego punktu widzenia można powiedzieć, że w zależności od ukształtowania terenu dziennie z 1 ha odpływa średniorocznie rzekami: od $1,7$ do $3,5 \text{ m}^3$ (z obszarów nizinnych) do nawet $4-5 \text{ m}^3$ (z wyżyn), czy $8,6-17 \text{ m}^3$ (z gór). Są to więc ogromne zasoby wodne, które potencjalnie można zagospodarować w obrębie danej zlewni, a konkretniej, na danym polu.

Najnowsze badania pokazują, że z każdym rokiem wody będzie coraz mniej (Pińskwar i in. 2019). Spowodowane jest to wyraźnym wzrostem średniej rocznej temperatury, która w ostatnim stuleciu wzrosła z $7,5^\circ\text{C}$ do 10°C . Widać to zresztą gołym okiem – zimy są coraz cieplejsze, a lata bardziej upalne. Wskutek rosnących temperatur, przy braku znaczącej zmiany opadów mamy do czynienia ze spadkiem średniej wilgotności względnej powietrza. W efekcie zwiększy to parowanie, czego efektem będzie poważny wzrost zagrożenia suszą. Do tego opad, który występuje latem, ma coraz częściej postać gwałtownych opadów nawałnych. Wydłużają się również okresy bez opadów i mniej jest umiarkowanie silnego deszczu. To powoduje, że woda z opadów intensywniej spływa po powierzchni gleby, zamiast zostać

zmagazynowana. Innym poważnym problemem są opady zimowe. Do niedawna były jeszcze one pod postacią śniegu, który powoli topniejąc, umożliwiał zretencjonowanie wody, zapewniając ją tym samym na sezon wegetacyjny. Teraz deszczowe zimy powodują, że woda szybko spływa do rzek, sprawiając, że jeszcze przed nadjeściem wiosny trafia do Bałtyku. Narastające zagrożenie suszą dotyczy nie tylko Polski. Problemy te będą się niestety pogłębiały, gdyż obecna sytuacja klimatyczna pociągała będzie za sobą kolejne, już widoczne skutki tych zmian. Są to między innymi wzmożona erozja gleb, spadek poziomu wód gruntowych, wysychanie rowów, strumieni, rzek oraz mokradeł, stawów czy jezior. Aby temu zapobiec, konieczne jest podjęcie działań adaptacyjnych mających na celu zatrzymać wodę w krajobrazie.

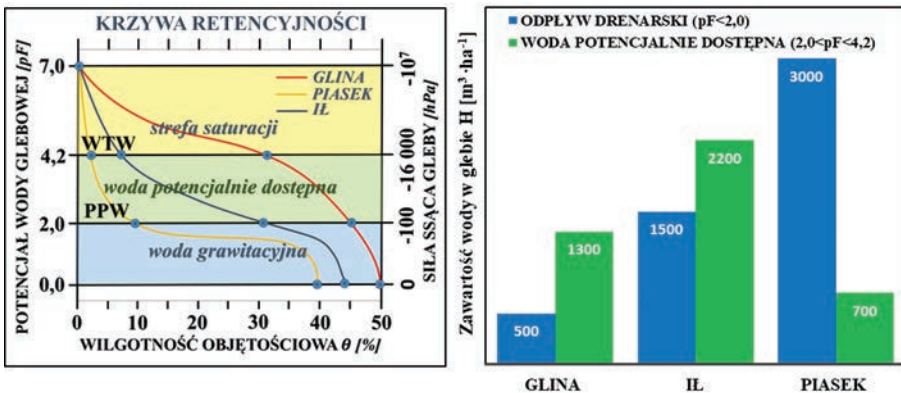
Melioracje mają więc jeszcze wiele do zaoferowania, a zastosowanie regulatorów do hamowania odpływu jest niewątpliwie jednym z takich działań. Pewne obawy może budzić jedynie obecny system legislacyjny. Zgodnie z obowiązującym prawem (Prawo Wodne z dnia 20 lipca 2017 r.) hamowanie odpływu drenarskiego w myśl artykułu 395 ust. 12 nie wymaga pozwoleń wodnoprawnych, jednak przepis ten nie znajduje zastosowania w przypadku przebudowy urządzeń. Tutaj według opinii Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie (PGWWP) wykonanie jakiegokolwiek urządzenia wodnego będzie już wymagało uzyskania pozwolenia zgodnie z art. 389. ust. 6 ustawy. W myśl tego prawa jakakolwiek interwencja w sieć drenarską wiązać się będzie z koniecznością uzyskania odpowiednich pozwoleń, co może ograniczyć potencjalnie zainteresowanie tą metodą. Jednak w trakcie indywidualnych konsultacji jakie prowadzono z PGWWP, stwierdzono, iż powyższy artykuł dotyczy sytuacji, w której całkowicie zmieniony zostałby zasięg dotychczasowego oddziaływania sieci drenarskiej. W przypadku zastosowania kontrolowanego odpływu jego oddziaływanie nie przekracza zwykle tego zakresu. W efekcie decyzja o konieczności sporządzenia operatu wodnoprawnego oraz uzyskania pozwolenia wodnoprawnego na urządzenie wstrzymujące odpływ będzie podejmowana indywidualnie.

Wymierne korzyści stosowania kontrolowanego odpływu

Dotychczasowe badania wskazują, iż wspomniana metoda wstrzymywania odpływu wpływa na wzrost okresowej retencji. Szacuje się, że w warunkach Polski odpływy drenarskie sięgają przeciętnie 100 mm, a w latach mokrych nawet 250 mm (Koc i Solarski 2004). Takie odpływy oznaczają, że z 1 ha rocznie ubywa z pola od 1000 do 2500 m³ wody. Jest to ogromna ilość, którą w całości bądź przynajmniej w części można by zatrzymać i zretencjonować w profilu glebowym. Ocenia się, że sama pojemność istniejących w Polsce rowów melioracyjnych wynosi ponad 0,5 mld m³, co stanowi około 4% średniego odpływu rzecznego z terenu kraju (Mioduszeński, 2004). Przeprowadzone obliczenia numeryczne dla konkretnej zlewni oraz

rzeczywistych warunków atmosferycznych i klimatycznych wykazały, że hamowanie odpływu wody z dolinowych systemów melioracyjnych wyraźnie podwyższa poziom wód gruntowych, zwiększając tym samym o około 20% zasoby wodne dostępne dla roślin. W ten sposób zmniejsza się także objętość wody odpływającej z obiektu w okresach wiosennych. Korzyści z zaoszczędzonej w ten sposób wody zależą przede wszystkim od ilości opadów i ich struktury czasowej w sezonie wegetacyjnym oraz od zapotrzebowania wody przez rośliny w danym okresie.

Kontrolowane odwadnianie ma największe korzyści produkcyjne tam, gdzie warunki suszy są przerywane okresami opadowymi i są dość krótkotrwałe. Rzeczywiste magazynowanie wody jakie daje kontrolowany odpływ, zależy głównie od samej struktury gleby, jej porowatości i przepuszczalności co ma wpływ na przebieg sieci drenarskiej i jej rozstawę. Gleby ciężkie, zawierające duże ilości cząstek drobnych (ilastych) mają dużą pojemność wodną, natomiast bardzo małą – gleby przepuszczalne, lekkie (piaszczyste). Należy podkreślić, że rolnik ma ograniczone możliwości kształtowania zdolności retencyjnej gleby, gdyż zależy ona głównie od składu granulometrycznego, a tylko w pewnym zakresie można ją modyfikować przez zawartość materii organicznej (próchnicy) w wierzchniej warstwie ornej. Dlatego też zastosowanie kontrolowanego odpływu daje dodatkowe możliwości zmagazynowania części wody grawitacyjnej, która w normalnych warunkach odprowadzona zostałaby drenażem do rowu. Pewne zależności jakie zachodzą w różnych glebach, przedstawiono na rycinie 48. Wykres ten interpretuje odpływ drenarski jako ilość wody odciekającej z profilu pod wpływem siły grawitacji. Odpływ rozpoczyna się, gdy wilgotność gleby powyżej drenów przekroczy połowę pojemności wodną. Jest to tzw. woda grawitacyjna, która wskutek przesylenia profilu glebowego odprowadzana jest do głębszych partii profilu. W glebach ciężkich (gdzie dominują gliny czy iły), a głównie te są zdrenowane, odpływy następują po większych opadach. Woda



Ryc. 48. Krzywa retencyjności gleby i jej zdolność do magazynowania wody przy pełnym nasyceniu

w takich glebach utrzymuje się dłużej w profilu glebowym (dłużej się też wysyca), jest jej więcej i dłużej trwają same odpływy. Na glebach przepuszczalnych (piaszczystych) duża ilość wody w glebie jest niedostępna dla roślin z powodu zbyt słabych sił wiążących mogących tę wodę zatrzymać. W efekcie woda bardzo trudno wysyca taki profil.

Na przykładzie badań prowadzonych w Szwecji przez Wesström i in. (2003), gdzie średnia opadu w okresie prowadzonych analiz (600 mm) była zbliżona do warunków polskich, zastosowanie wstrzymywanego odpływu pozwoliło zmagazynować z opadu od 132 do nawet 229 mm wody rocznie. W przeliczeniu na objętość jest to od 1320 do 2290 m³ wody na obszarze 1 ha, stanowiąc około 60% odpływu drenarskiego. Podobne wyniki otrzymali Tolomio i Borin (2019), którzy w rezultacie wieloletnich badań nad odpływem kontrolowanym w północno-wschodnich Włoszech uzyskali oszczędności wody wynoszące średnio 182 mm, tj. 69% odpływów. Oba przykłady pokazują, jak ogromny potencjał retencyjny ma istniejąca infrastruktura melioracyjna. Dla porównania zobrazowano to w postaci liczby zbiorników powszechnie stosowanych do gromadzenia wody deszczowej (ryc. 49) na obszarach, gdzie woda może być czynnikiem ograniczającym w produkcji rolnej.

Kontrolowany odpływ wykazuje znaczne korzyści w zakresie plonowania przez utrzymywanie wody w glebie, do czasu wykorzystania przez rośliny w okresach suchych. Jednak w przypadku zbyt głębokiego zalegania wód gruntowych podsiąk kapilarny może być znacząco ograniczony, co sprawia, że rola urządzeń sterujących odpływem nie wpłynie ani na plon, ani na poziom retencji. W tych warunkach występuje opadowo-retencyjny typ gospodarki wodnej, w którym bilans wodny zależy od samej retencji glebowej i bieżących opadów deszczu. Przeprowadzone do tej pory badania wskazują jednak, że zastosowana metoda zarządzania wodą na obiekcie drenarskim w znaczny sposób przyczynia się do stabilności uzyskiwanych



Ryc. 49. Ilość wody jaką można zatrzymać w glebie przy zastosowaniu kontrolowanego odpływu

plonów i to szczególnie w latach suchych. Hamowanie odpływu w tym czasie może spowodować zwiększenie wydajności produkcyjnej gleby nawet o 25% w porównaniu do konwencjonalnego odwadniania.

W ekstremalnych latach suchych (2018, 2019), kiedy nie będzie wystarczającej ilości opadów do odpowiedniego spiętrzenia i zretencjonowania, korzyści takie po prostu nie wystąpią. Wieloletnie badania wykazują jednak, że średni wzrost plonów kształtuje się na poziomie 1-17%, w przypadku kukurydzy i soi oraz 2-18% w przypadku pszenicy i jęczmienia (tab. 19). W niektórych sytuacjach odpływ kontrolowany może w skrajnych warunkach negatywnie wpłynąć na poziom uzyskiwanych plonów. Ma to miejsce szczególnie w okresach wegetacyjnych obfitujących w dużą ilość opadów i wynika głównie z braku kontroli nad utrzymywaniem właściwego poziomu zwierciadła wody. Przykładem jest kukurydza, która ma układ korzeniowy bardzo wrażliwy na podtopienia, dlatego należy w okresie wegetacji kontrolować poziom zwierciadła, aby nie dopuścić do nadmiernego przesylenia wodą profilu glebowego i powstania warunków beztlenowych dla roślin. W glebie zachodzą wówczas procesy denitryfikacji prowadzące do strat azotu. W ich wyniku jony azotanowe zostają przekształcone w formy gazowe, które ulatniają się do atmosfery.

Tabela 19

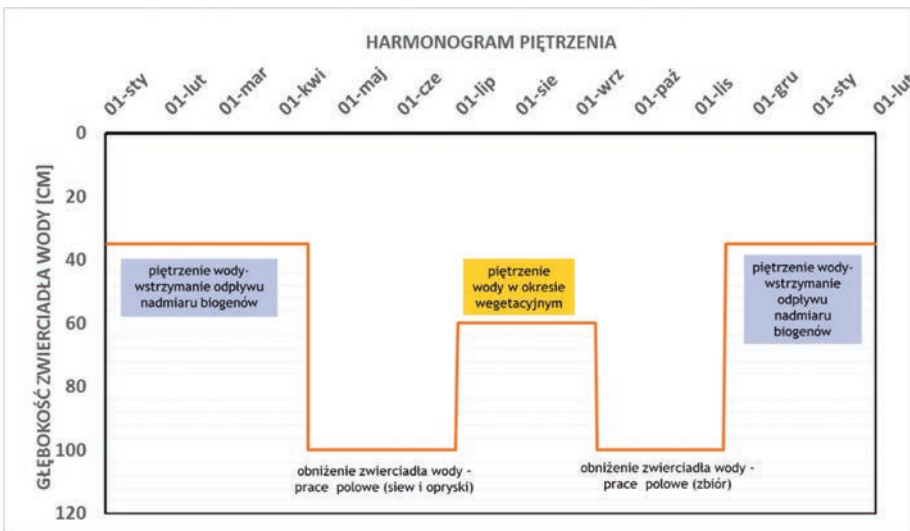
Wpływ odpływu sterowanego na poziom uzyskiwanych plonów

Miejsce	Literatura	Roślina	Procent wzrostu
USA	Cooke i Verma (2012)	kukurydza i soja	brak
USA	Delbec i in. (2012)	kukurydza	6-10
USA	Jaynes i in. (2012)	kukurydza	brak
USA	Jaynes i in. (2012)	soja	8
USA	Helmers i in. (2012)	kukurydza	-3
USA	Helmers i in. (2012)	soja	brak
Włochy	Tolomio i Borin (2019)	pszenica	(-2) - (8)
Włochy	Tolomio i Borin (2019)	soja	3-5
Włochy	Tolomio i Borin (2019)	kukurydza	5-32
USA	Poole i in. (2013)	kukurydza	4-23
USA	Poole i in. (2013)	soja	2-20
USA	Poole i in. (2013)	pszenica	2-(-11)
USA	Ghane i in. (2012)	kukurydza	1-17
USA	Ghane i in. (2012)	soja	1-7
USA	Drury i in. (2008)	kukurydza i soja	brak
Szwecja	Wesström i in. (2007)	pszenica i jęczmień	2-18

Denitryfikacja szczególnie intensywnie zachodzi w warunkach ograniczonej ilości tlenu w glebie. Dlatego docelowy poziom lustra wody należy regularnie kontrolować i dostosować w zależności od uprawy, etapów wzrostu oraz panujących warunków pogodowych. Aby ograniczyć ryzyko wystąpienia tych zjawisk, należy przyjąć odpowiedni harmonogram piętrzenia dostosowywany na bieżąco do występujących opadów. Przykład takiego harmonogramu zamieszczono na rycinie 50.

Jak pokazują wyniki polskich badaczy (Koc i in. 2007, Szymczyk 2010, Hus i Pułikowski 2011, Szejba i in. 2016), wraz z odpływem drenarskim do wód powierzchniowych odprowadzane są znaczne ilości biogenów. Według badań, jakie od lat prowadzą Amerykanie, kontrolowany odpływ znacznie zmniejsza utratę składników odżywczych z systemów drenarskich. Badania prowadzone na terenie Kanady w rejonie Ontario przez Agriculture and Agri-Food Canada i South Nation Conservation wykazały znaczne zmniejszenie utraty amonu (57%), azotanów (65%) i fosforu (63%) w okresie wegetacyjnym. Podobne wyniki badań otrzymano również w innych ośrodkach badawczych (tab. 20). Na podstawie tych danych określono, że obciążenie ilościowe azotu ogólnego w wodach odprowadzanych siecią drenarską można zredukować nawet do 85% w porównaniu do konwencjonalnego sposobu odwodnienia.

W Polsce największe zagrożenie ze strony melioracji płynie z ilości odprowadzanych biogenów, a w szczególności azotanów ($N-NO_3$). Związki te charakteryzują się intensywną migracją i wymywaniem przez wody gruntowe, co sprzyja ich przemieszczaniu z wierzchnich warstw profilu glebowego do wód gruntowych i sieci melioracyjnej. Natomiast azot w formie amonowej (NH_4^+) ma małe stężenia



Ryc. 50. Przykładowy harmonogram piętrzenia wody dla kukurydzy (Napierała 2019)

Tabela 20

Wpływ zastosowania odpływu sterowanego na poziom redukcji azotanów

Miejsce	Literatura	Procent redukcji N
USA	Cooke i Verma (2012)	51-79
USA	Adenya i in. (2012)	18-23
USA	Jaynes i in. (2012)	46
USA	Helmers i in. (2012)	21
USA	Fausey i in. (2012)	46
Szwecja	Wesström i in. (2007)	80
USA	Gilliam i in. (1979)	50-85
USA	Evans i in. (1989)	18-56
USA	Pool i in. (2018)	92
Włochy	Tolomio i Borin (2018)	92
USA	Drury i in. (2008)	44
USA	Lalonde i in. (1996)	69-82
USA	Tan i in. (1998)	19
Litwa	Ramoska i in. (2011)	20-28

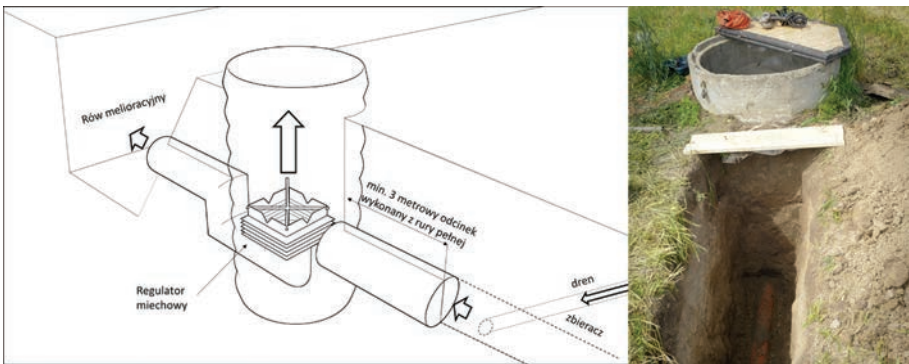
w wodzie gruntowej. Jest to wynikiem głównie procesów sorpcyjnych ograniczających jego migrację w głąb profilu glebowego, pomimo dobrej rozpuszczalności. Największe stężenie azotu w formie azotanowej (NO_3^-) występuje pod koniec zimy, szczególnie w marcu i kwietniu, a najmniejsze latem. Różnica wynika ze zwiększonej sorpcji azotanów przez roślinność porastającą rowy oraz związana jest ze spowolnionym spływem w rowach w stosunku do przepływu w sieci drenarskiej. Zimą system drenarski odprowadza 10-krotnie więcej azotanów niż rowy (Koc i Solarzski 2006). Odpływ azotu, głównie w formie azotanowej, zależy przede wszystkim od warunków meteorologicznych i glebowych. W przypadku gleb ciężkich wynosi rocznie średnio 22 kg N- NO_3 na hektar i maksymalnie może osiągać nawet 70 kg N- NO_3 (Koc i in. 2008).

Praktyczne aspekty eksploatacji systemów drenarskich z odpływem kontrolowanym

Odpływy drenarskie rozpoczynają się, gdy poziom wody w glebie przekracza połowę pojemność wodną. Gleba jest wówczas nadmiernie uwilgotniona, co skutkuje stopniowym niedotlenieniem gleb i spadkiem ich produktywności. Powoduje to

szkodliwy dla środowiska glebowego proces denitryfikacji, czego efektem są straty azotu w postaci gazowej (N_2 , NO, N_2O) i straty w plonach. Wielkość odpływów drenarskich jest zmienna i zależy między innymi od sumy rocznej opadów, ich rozkładu w czasie, ewapotranspiracji oraz od rodzaju gleb. W Polsce odpływy z sieci drenarskiej nie występują lub są niewielkie w latach suchych, w szczególności na glebach ciężkich. W latach mokrych, gdy suma opadów rocznych wynosi 700 mm, odpływ drenarski osiąga nawet 250 mm (przy korzystnym rozkładzie opadów i słabo przepuszczalnych glebach). W wielu przypadkach możliwe i celowe bez szkody dla plonu jest podwyższenie poziomu zwierciadła wody zarówno w sieci drenarskiej, jak i w ciekach odprowadzających nadmiar wody z tej sieci. Tradycyjne systemy odwadniające odprowadzają wodę w okresach jej nadmiaru z uwagi na potrzeby roślin uprawnych. Są to systemy niekontrolowane, które bardzo często zbyt mocno obniżają poziom wód gruntowych. Ważne, że wystarczające dla celów rolniczych jest odwodnienie, które zapewnia 6-8% powietrza w wierzchniej warstwie gleby.

Wstępnym rozwiązaniem technicznym pozwalającym na ograniczenie nadmiernego odpływu wody z systemu melioracyjnego jest chociażby zastosowanie przetamowań na rowach melioracyjnych w postaci progów o stałym poziomie piętrzenia. Zazwyczaj rzędna takiego progu położona jest w granicach 40-60 cm poniżej powierzchni terenu. W szczególnych, uzasadnionych wypadkach można wykonać zastawkę pozwalającą na dodatkową regulację poziomu wody. Jednak w praktyce ten drugi sposób kontroli odpływu często się nie sprawdza z uwagi na wspomniane na początku konflikt interesów. Dlatego łatwiejszym sposobem zarządzania wodą na polu będzie instalacja podziemna montowana na sieci drenarskiej. W tym przypadku można zaadaptować istniejącą już budowlę (studnię drenarską), montując w jej wnętrzu gotowy regulator (ryc. 51). Stan takiej studni powinien zapewnić możliwie dużą szczelność, tak by piętrzona woda nie przesiąkała przez szczeliny i nie uchodziła bezpośrednio do drenów. Studnie z poprzesuwanymi kręgami powinny zostać wykluczone z możliwości montażu w ich wnętrzu regulatorów. W przypadku



Ryc. 51. Prawidłowy montaż regulatora w postaci gotowego modułu

gotowych modułów w postaci studni z zainstalowanym wewnątrz regulatorem konieczne jest wykonanie wykopu do głębokości drenażu oraz usunięcie i zastąpienie go na odcinku około 3 m rurą gładką, nieperforowaną. Pozwoli to na ograniczenie migracji wody wokół studni, a tym samym zapewni skuteczność działania systemu. Urządzenia piętrzące mogą być obsługiwane ręcznie lub wyposażone w system automatycznej regulacji, działający na podstawie danych z pobliskiej stacji meteorologicznej.

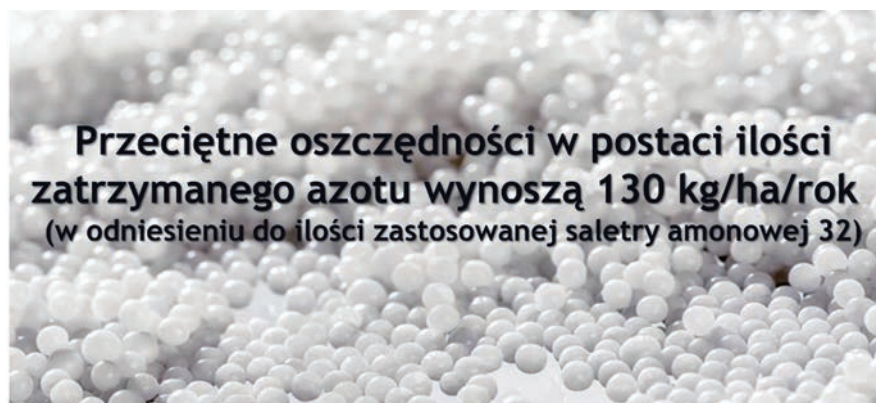
W okresie wegetacji zalecane jest podniesienie zwierciadła wody, zwłaszcza po wysiewach, w celu zwiększenia dostępności wody dla świeżo korzeniących się roślin. W tym okresie należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie dopuścić do zbytniego przesylenia wodą profilu glebowego, prowadzącego nawet do stagnowania wody. Trzeba mieć na uwadze, że w okresach mokrych działanie regulatora będzie znacząco ograniczone, spowodowane zbyt wysokim poziomem zwierciadła wody. W przypadku gleb podatnych na przesuszanie woda w okresie wegetacyjnym może być dostarczana dodatkowo do gleby za pomocą typowego nawadniania deszczownianego. Rolą takiego systemu jest wówczas możliwość przechwytywania i zatrzymywania wody, jaka przesiąkła przez profil i jej ponowne użycie. W niektórych glebach i systemach melioracyjnych woda może być podawana bezpośrednio do gleby przez istniejącą sieć drenarską. Ta praktyka nawodnieniowa jest nazywana nawadnianiem podsiąkowym. Jednak by efekt był skuteczny, odległość między sączkami powinna być o połowę mniejsza od tradycyjnej rozstawy. Badania nad uprawą soi i kukurydzy potwierdziły skuteczność tego systemu nawodnień, dając wzrost plonu na poziomie od 10% do 64% (Frankenberger i in. 2017). Z drugiej strony należy pamiętać, że mniejsze odległości między sąsiednimi drenami podwyższają intensywność drenażu. W efekcie przyczynia się to do zwiększonej ilości utraty azotanów. Stanowi to, niestety, istotny problem dla tradycyjnych melioracji, jednak wzrost intensywności rolnictwa wymagać będzie stosowania tego typu zabiegów, szczególnie tam gdzie istnieje duże ryzyko nadmiernego uwilgotnienia gleby. Ogólnie w tym aspekcie funkcjonuje zasada: „Im płytszy drenaż oraz większa rozstawa drenów, tym mniejszy odpływ wód drenarskich, a co za tym idzie, mniejsze zanieczyszczenie wód powierzchniowych biogenami”.

W okresie międzywegetacyjnym urządzenia piętrzące służą do zatrzymywania odpływu drenarskiego przez utrzymanie najwyższego poziomu piętrzenia. Jeśli poziom zwierciadła wody znajduje się 30 cm pod powierzchnią terenu, powodować może ograniczenie możliwości wjazdu sprzętu na pole, co z kolei prowadzi do opóźnienia terminu siewu i zwiększa ryzyko zbytniego zagęszczenia gleby w czasie uprawy, a także przyczynia się do nadmiernego stresu wodnego. Należy unikać sytuacji, w których przez piętrzenie wody w sieci drenarskiej możemy spowodować nadmierne wysycenie gleby. Utrzymanie odpowiednio wysokiego poziomu wody w glebie jest ważne z punktu widzenia środowiska, gdyż zapobiega odpływowi biogenów z pola, a tym samym wydłuża okres ich mineralizacji, w którym

jony amonowe utleniają się do azotanów (nityfikacja). Proces ten przebiega intensywnie nie tylko w czasie wegetacji roślin, lecz także jesienią i wczesną wiosną oraz zimą, gdy utrzymują się dodatnie temperatury. W tym okresie uwalniający się azot wraz z wodą jest wymywany w głąb profilu glebowego poza zasięg systemu korzeniowego. Dlatego, aby zmniejszyć straty składników nawozowych z nawozów naturalnych, a tym samym ograniczyć skażenie wód azotanami, prowadzi się na polu okresowe piętrzenia.

Ekonomiczne przesłanki do wdrażania odpływu sterowanego

Stosowanie kontrolowanego odpływu należy wdrażać tylko wtedy, gdy można wykorzystać jego potencjał. Istotne w tym względzie jest to, że nie tylko sam układ pola jest ważny, ale również przebieg sieci melioracyjnej ma istotne znaczenie. O ile oddziaływanie tego systemu na poziom uzyskiwanych plonów jest niejednoznaczne z uwagi na udział zbyt wielu czynników, to w przypadku szacowania ilości biogenów jest już o wiele prościej i pewniej. W tym względzie całą metodykę szacowania opłacalności inwestycji można oprzeć wyłącznie na pomiarach poziomu odpływu. Zasada jest bowiem taka: „Im więcej odpływa wody z sieci drenarskiej, tym więcej biogenów usuwanych jest z pola”. Ograniczenie tego zjawiska automatycznie przynosi wymierne korzyści finansowe w postaci zaoszczędzonego azotu (głównie w formie saletranej $-NO_3$), nie wspominając już o korzystnym wpływie na środowisko. Odnosząc się do wspomnianych badań (Koc i in. 2007, Szymczyk 2010, Hus i Pulikowski 2011), szacuje się, że w warunkach polskich poziom zużycia nawozów azotowych można zredukować od 20 do nawet $400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, a przeciętnie około $130 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (ryc. 52). Przyjmując, iż zasięg oddziaływania jednego



Ryc. 52. Oszczędności ze stosowania kontrolowanego odpływu w odniesieniu do rzeczywistego zużycia nawozów mineralnych (Koc i Solarski 2008)

regulatora wynosi około 4 ha, to oszczędności z samego tylko ograniczenia zużycia nawozów wyniosą od 31 do nawet 624 zł/ha, a średnio około 203 zł/ha (zakładając cenę saletry amonowej na poziomie 1560 zł/t wg cen z 20.08.2021). Jeden regulator przynosi zatem oszczędności na poziomie od 124 do nawet 1600 zł. Biorąc pod uwagę koszt wykonania takiego urządzenia oraz montaż, trzeba się liczyć z nakładem na poziomie 1500-1800 zł. Prosty okres zwrotu takiej inwestycji może wówczas wynieść od 1,5 roku do nawet 15 lat. Należy tutaj dodać, iż w kalkulacji nie uwzględniono wpływu zastosowanego systemu na wzrost plonów (w Polsce dopiero trwają w tym zakresie badania) ani też ewentualnych sankcji wynikających z przekroczenia dozwolonych emisji wynikających z obowiązujących przepisów prawnych. Jeżeli przyjmiemy średni poziom oszczędności, to szacowany okres zwrotu zakupu i montażu regulatora odpływu nie powinien przekroczyć 9 lat.

Należy mieć na uwadze, iż przedstawiona w pracy praktyka zarządzania wodą drenarską na polu, sprawdzi się nie wszędzie i nie w każdej sytuacji, a jej skuteczność nie będzie równa we wszystkich lokalizacjach czy latach.

Literatura

- Chełmicki W. (2001): Woda – zasoby, degradacja, ochrona. PWN, Warszawa.
- Frankenberger i in. (2017): Questions and answers about drainage water recycling for the midwest. Transforming drainage project team, and the north central extension and research activity 217 (NCERA-217).
- Grygoruk M. (2020): Melioracje wodne w kontekście funkcjonowania zlewni. W: Woda w rolnictwie. Polski Klub Ekologiczny Koło Miejskie, Gliwice.
- Hus T., Pulikowski K. (2011): Content of nitrogen compounds in waters flowing out of small agricultural catchments. *Pol. J. Environ. Stud.*, 20, 4, 895-902.
- Koc J., SolarSKI K. (2004): Wpływ systemu melioracyjnego na odpływ składników nawozowych z gleb użytkowanych rolniczo. *Nawozy Nawoz.*, 6, 2, 19.
- Koc J., SolarSKI K., Koc-Jurczyk J. (2008): Wpływ warunków atmosferycznych na odpływ związków azotu ze zlewni zdrenowanej. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Roln.*, 528.
- Koc J., SolarSKI K., Rochwerg A. (2007): Effect of land reclamation system on the volume and seasonality of nitrate runoff from croplands. *J. Element.*, 12(2), 121-133.
- LPW (2020): <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/lokalne-partnerstwa-ds-wody2>.
- Łabędzki L., Bąk B. (2014): Meteorological and agricultural drought indices used in drought monitoring in Poland: a review. *Meteorol. Hydrol. Water Manage. Res. Operation. Appl.*, 2.
- Mioduszewski W. (2003): Mała retencja. Ochrona zasobów wodnych i środowiska naturalnego. Poradnik. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- Mioduszewski W. (2004): Ochrona przed powodzią a walory przyrodnicze dolin rzecznych. *Wiad. Melior. Łąk.*, 47(1), 33-37.
- Napierała M. (2019): Gospodarowanie wodą na obiekcie drenarskim. W: Ochrona i kształtowania zasobów wodnych na terenach wiejskich. Poradnik WODR. <https://www.wodr.poznan.pl/downloads/sir/publikacje/ochrona-zasobow-wodnych.pdf>.
- Pińskwar I., Choryński A., Graczyk D., Kundzewicz Z.W. (2019): Observed changes in extreme precipitation in Poland: 1991-2015 versus 1961-1990. *Theor. Appl. Climat.*, 135(1), 773-787.

- PPSS (2020): <https://wody.gov.pl/nasze-dzialania/stop-suszy>.
- Przybyła Cz., Bykowski J., Mroziak K., Napierała M. (2011): Rola infrastruktury wodno-melioracyjnej w procesie suburbanizacji. *Rocz. Ochr. Środ.*, 13(1), 769-786.
- Sojka M., Napierała M. (2020): Regulator odpływu wody z sieci drenażowych. Materiały XIX seminarium naukowo-szkoleniowego „Wybrane zagadnienia hydrauliki dużych rzek nizinnych” połączone z obchodami „Światowego dnia wody”. SITWM, Poznań.
- Stryjewski F. (1975): Melioracje rolne – drenowanie. Wydawnictwo AR, Poznań.
- Stuyt L.C.P.M. (2013): Controllable drainage as key in future-resistant water management. Overview of results of research, experiences and impressions at home and abroad. Alterra-report-Wageningen University and Research Centre.
- Szymczak T. (2014): Hydrologiczne uwarunkowania rozwoju melioracji. W: Uwarunkowania rozwoju melioracji w Polsce. Red. E. Kaca. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie 37. Wydawnictwo ITP, Falenty, 53-85.
- Szymczyk S. (2010): Influence of the type of soil dewatering and land use on the dynamics of concentrations and volume of nitrogen discharged from agricultural areas. *J. Element.*, 15(1), 189-211.
- Tolomio M., Borin M. (2018): Water table management to save water and reduce nutrient losses from agricultural fields: 6 years of experience in North-Eastern Italy. *Agric. Water Manage.*, 201, 1-10.
- Wesström I., Ekbohm G., Linner H., Messing I. (2003): The effects of controlled drainage on subsurface outflow from level agricultural fields. *Hydrol. Proc.*, 17(8), 1525-1538.
- Zabłocki S. (2017): Identyfikacja wymywania azotu na podstawie badań chemizmu wód w rolniczych systemach drenażowych na przykładzie Wysoczyzny Kałuszyńskiej. *Przegl. Geol.*, 65(11/2), 1398-1402.

Funkcje, planowanie i użytkowanie w gospodarstwie małych zbiorników wodnych

Michał Fiedler

Jednym z elementów poprawiających bilans wodny terenów użytkowanych rolniczo są małe zbiorniki wodne, określane jako oczka wodne lub stawy. Zgodnie z Ustawą o ochronie gruntów rolnych i leśnych z dnia 3 lutego 1995 roku jako oczka wodne rozumie się śródpolne i śródleśne zbiorniki wodne o powierzchni do 1 ha, niepodlegające klasyfikacji gleboznawczej (Dz.U. 1995 Nr 16 poz. 78, 1995). Do tej grupy zbiorników wodnych zaliczamy zarówno te o pochodzeniu naturalnym, jak i antropogenicznym.

Naturalne oczka wodne zostały zdefiniowane jako elementy sieci hydrograficznej o powierzchni mniejszej niż 1 ha, z występującym stale, okresowo lub epizodycznie zwierciadłem wody (Drwal i Lange 1985). Mają one charakter glacji-wytopiskowy, a ich wielkość związana jest z rozmiarami brył martwego lodu, pozostałymi po wycofaniu się lodowca, około 10 tys. lat temu (ryc. 53). Zasięg występowania polodowcowych oczek wodnych obejmuje w Europie: północną część Wysp Brytyjskich, Jutlandię, północno-wschodnie Niemcy, kraje nadbałtyckie, północną część Rosji oraz obszar Polski do linii Głogów-Poznań-Płock-Augustów (Lutze i in. 2007, Mojski 1968, Sibbett 1999). Zagęszczenie oczek na tych terenach jest bardzo zróżnicowane i zależy od lokalnych czynników. Maksymalne zagęszczenie oczek może sięgać 100 na km², jednak zazwyczaj są to wartości znacznie niższe, wynoszące średnio od 1 do 6 na 1 km² (Drwal i Lange 1985, Solarski i Nowicki 1990). W zbliżonym okresie powstały również liczne polodowcowe oczka wodne na terenie Ameryki Północnej, tworząc tak zwany Prairie Pothole Region





Ryc. 53. Śródpolne oczko wodne



Ryc. 54. Staw wiejski

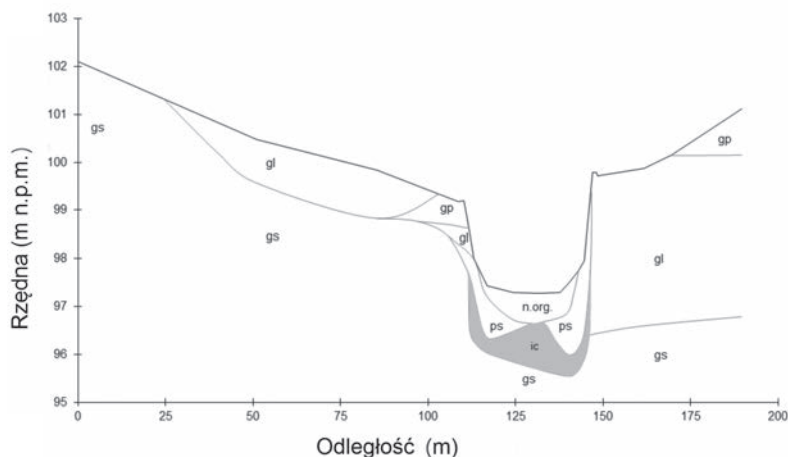


Ryc. 55. Zagospodarowany rekreacyjnie staw wiejski

(Richardson i in. 1994). Badania nad wpływem oczek na obieg wody na tych terenach, a także nad możliwościami gospodarczego wykorzystania oczek w rolnictwie i hodowli prowadzone były już od lat 40. XX wieku (Austin 1998, Eisenlohr Jr. 1972, Shjeflo 1968, Sloan 1972).

Z kolei jako stawy określić możemy niewielkie zbiorniki wodne o pochodzeniu antropogenicznym, o powierzchni od kilkuset metrów kwadratowych do kilkunastu hektarów, zasilane wodami gruntowymi lub powierzchniowymi (ryc. 54). Często mają charakter małych zbiorników zaporowych retencjonujących wodę pochodzącą z małych cieków lub rowów (Mioduszewski 2014). Cechuje je przystosowanie do pełnionej funkcji i zazwyczaj są to niewielkie stawy rybne, zbiorniki przyzagrodowe czy stawy wiejskie (ryc. 55) (Skwierawski 2010).

Różnice między naturalnymi a sztucznymi zbiornikami wodnymi zauważyć można w kształcie czaszy zbiornika i budowie dna. Zbiorniki naturalne mają kształty zbliżone do owalnych lub nieregularnych. Także ich skarpy mogą charakteryzować się znaczną zmiennością. Dno polodowcowego oczka wodnego często wyścielone jest nieprzepuszczalną warstwą ilów oddzielających część zbiornika od wód gruntowych (ryc. 56). Natomiast w trakcie budowy oczka sztucznego następuje naruszenie istniejącego układu warstw gleby, co może ułatwiać przesiąki wody z oczka do terenów przyległych. W przypadku takich sytuacji dno i skarpy zbiornika wodnego powinny być uszczelnione.



Ryc. 56. Przekrój przez zlewnię polodowcowego śródpolnego oczka wodnego: ps – piasek słabogliniasty, gp – glina piaszczysta, gl – glina lekka, gs – glina średnia, ic – ił ciężki, n.org. – namuł organiczny

Funkcje i znaczenie małych zbiorników wodnych w krajobrazie rolniczym

Małe zbiorniki wodne usytuowane w krajobrazie rolniczym mogą pełnić szereg funkcji. Do najważniejszych zaliczyć można funkcje (Koc i in. 2001, USDA 2016):

- hydrologiczne – które wynikają z retencjonowania wody, szczególnie w okresach roztopów wiosennych i z intensywnych opadów deszczu (Fiedler 2011, Mastin 2009). Zgromadzone w ten sposób zasoby wody zasilają tereny przyległe w okresach wegetacyjnych. Jednak zasięg oddziaływania oczek wodnych silnie związany jest z ukształtowaniem terenu oraz warunkami glebowymi i może wynosić od kilkunastu metrów na terenach silnie pofałdowanych do ponad stu metrów na terenach płaskich (Korytowski 2006, Kosturkiewicz i Fiedler 1993). Mogą również retencjonować odpływy drenarskie, zmniejszając odpływy wody z terenów meliorowanych (Kosturkiewicz i in. 1996)
- gospodarcze – większe zbiorniki mogą stanowić źródło wody do nawodnień, produkcji ryb czy źródło wody pitnej dla bydła (USDA 2016). Funkcje te wymagają w miarę stałych warunków uzupełniania ubytków wody w zbiornikach wynikających z poboru wody. Warunki te trudne są do spełnienia w przypadku naturalnych oczek wodnych, które cechują się najczęściej znacznymi wahaniami stanów wody w okresach rocznych i wieloletnich, prowadzącymi nawet do ich okresowego wysychania
- biocenotyczne – zbiorniki wodne stanowią źródło wody i pokarmu, a także miejsce rozmnażania i kryjówek dla zwierząt. Są podstawowym biotopem

występowania i rozrodu płazów i zapewniają bioróżnorodność (Skwierawski 2010)

- krajobrazowe i mikroklimatyczne – zbiorniki wodne wraz z prawidłowo zagospodarowanym otoczeniem poprawiają jakość krajobrazu. Wpływają również na poprawę mikroklimatu
- rekreacyjne – mogą stanowić miejsce wypoczynku, służyć jako kąpieliska czy miejsca połowu ryb. Teren otaczający oczka może być miejscem pikników (ryc. 55).

Zdolności retencyjne zbiorników

Pojemność retencyjna zbiornika wodnego zależy od ukształtowania jego dna i skarp oraz przyjętej wysokości piętrzenia wody ponad dno doliny. Dla naturalnych polodowcowych oczek wodnych opracowano szereg zależności empirycznych określających ich pojemność na podstawie powierzchni przy pełnym napełnieniu lub maksymalnej głębokości, na przykład (Wiens 2001):

$$V = 2,85A^{1,22}$$

Gdzie: V – pojemność (dam^3),

A – powierzchnia (ha).

Bardziej złożone formuły pozwalają dodatkowo uwzględnić kształt czaszy zbiornika oraz obliczyć pojemność V (m^3) i powierzchnię lustra wody A (m^2) przy różnym napełnieniu zbiornika (Hayashi i Kamp 2000):

$$A = s \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{2}{p}} \quad V = \frac{s}{1 + \frac{2}{p}} \cdot \frac{h^{1 + \frac{2}{p}}}{h_0^{\frac{2}{p}}}$$

gdzie: h – stan wody, dla którego prowadzone są obliczenia (m),

s – powierzchnia oczka przy maksymalnym napełnieniu (m^2),

h_0 – maksymalne napełnienie oczka (m),

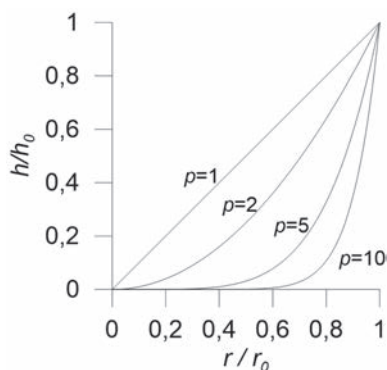
p – współczynnik określający kształt dna i skarp zbiornika (ryc. 57).

W przypadku wyznaczania pojemności V zbiornika położonego w dolinie cieku orientacyjnie można przyjąć, że (Mioduszewski 2014):

$$V = 0,4 \cdot H \cdot A$$

Gdzie: H – wysokość podpiętrzenia wody ponad dno doliny w przekroju budowli piętrzącej,

A – powierzchnia lustra wody w zbiorniku.



Ryc. 57. Wartości współczynnika p w zależności od kształtu skarpy oczka

Do określania pojemności retencyjnej istniejących zbiorników wodnych wykorzystać można również szczegółowe dane pomiarowe pochodzące z powietrznego skaningu laserowego LiDAR (Fiedler i in. 2017). Należy jednak zwrócić uwagę, że pozyskiwanie tych danych powinno dotyczyć okresów, gdy zbiorniki mają widoczne dno, czyli są całkowicie opróżnione z wody.

Źródła wody

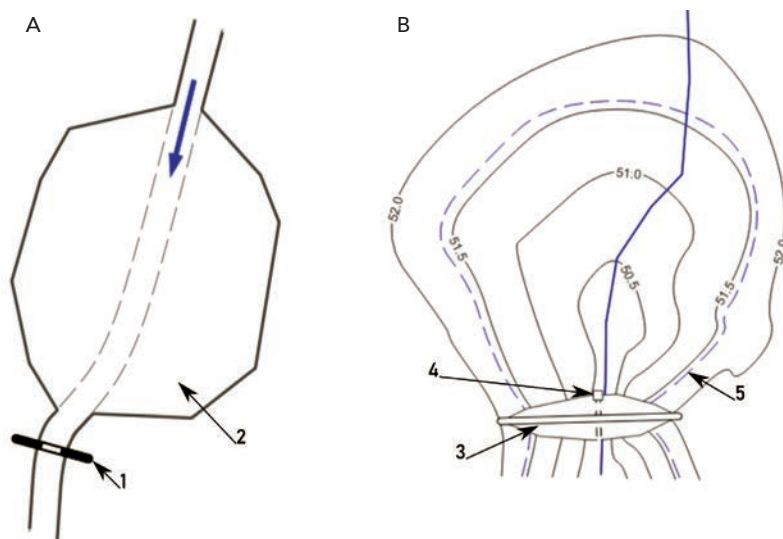
Objętość możliwej do pozyskania wody decyduje o celowości wykonania zbiornika sztucznego lub wykorzystania zbiornika naturalnego. Jako źródła wody służyć mogą cieki lub rowy melioracyjne, spływy powierzchniowe, dopływ wód gruntowych oraz dopływy z sieci drenarskiej.

Największe możliwości sterowania dopływem wody daje zasilanie z płynących wód powierzchniowych, pozwalając na uzyskanie stabilnego lustra wody w zbiorniku. Zasilanie to można zastosować w przypadku przegrodzenia koryta cieku lub rowu budowlą piętrzącą (ryc. 58a). Jednak objętość możliwej do zatrzymania w ten sposób wody jest niewielka i najczęściej stanowi jeden z etapów nawodnień podsiękowych. W celu zwiększenia objętości retencjonowanej wody można poszerzyć koryto cieku jedno- lub dwustronnie. Część ziemi pochodzącej z wykopu może posłużyć do wykonania grobelek wzdłuż brzegów, co pozwoli na podniesienie poziomu piętrzenia wody. Budowla piętrząca może być wykonana jako stały próg piętrzący albo jako zastawka umożliwiająca regulację poziomu piętrzenia wody.

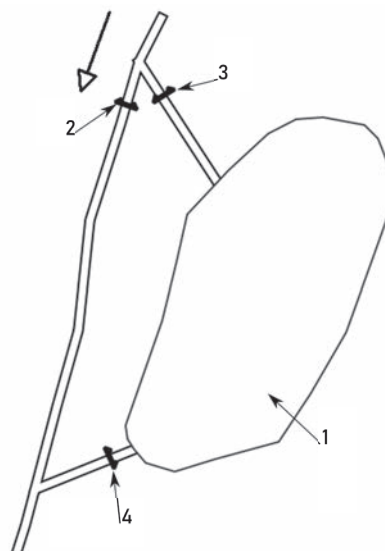
Bardziej rozbudowane systemy polegają na przegrodzeniu, poza korytem, także doliny cieku (ryc. 58b). Piętrzenie wody realizowane jest najczęściej za pomocą zapory ziemnej z wbudowaną zastawką.

Woda pochodząca z cieku może zasiląć również zbiorniki położone w dolinie (ryc. 59) zarówno sztuczne, jak i dostosowane zbiorniki naturalne. Zasilanie takich zbiorników polega na piętrzeniu wody w cieku i kierowanie jej rowem do stawu.

Warunki zasilania zbiorników wodnych zależą od przepływu wody w cieku stanowiącym źródło wody. W przypadku małych cieków praktycznie nie dysponujemy bezpośrednimi wynikami pomiarów, które pozwoliłyby na określenie przepływów charakterystycznych. Podstawowe przepływy charakterystyczne używane przy projektowaniu stawów (Mioduszewski 2014) to:



Ryc. 58. Przykłady stawu piętrzącego wodę: a – w poszerzonym cieku, b – zbiornika zaporowego. 1 – budowla piętrząca, 2 – wykop, 3 – zapora ziemna, 4 – budowla upustowa, 5 – normalny poziom piętrzenia



Ryc. 59. Schemat stawu w dolinie cieku: 1 – staw, 2 – budowla piętrząca na cieku, 3 – ujście wody, 4 – budowla upustowa

- przepływ minimalny (Q_{min}) – określa minimalny dopływ do zbiornika w roku suchym
- przepływ średni (Q_{sr}) – średni przepływ roczny służący do obliczeń bilansu wodnego zbiornika
- przepływ maksymalny (Q_{max}) – przepływ, którego prawdopodobieństwo przekroczenia jest stosunkowo duże (np. roczny), służący do wymiarowania światła budowli piętrzących
- przepływ katastrofalny (Q_k) – przepływ o prawdopodobieństwie 10%, używany do obliczeń budowli upustowych dla wód wielkich, może występować po deszczach nawalnych lub gwałtownych roztopach.

Najprostszym sposobem obliczania przepływów charakterystycznych są metody empiryczne, do których można zaliczyć wykorzystanie map odpływów jednostkowych zawartych w „Atlasie hydrologicznym Polski” (1986). Metoda ta pozwala na wstępne oszacowanie celowości budowy zbiornika (Mioduszewski 2014) i może być używana dla zlewni o powierzchni większej niż 10 km². Bardziej rozbudowane metody określania przepływów maksymalnych wykorzystują metody modelowania matematycznego i powinny być wykonywane przez specjalistów z zakresu hydrologii (Banasik i in. 2017).

Część wody, która pozostaje po wypełnieniu retencji powierzchniowej i ustabilizowaniu infiltracji, stanowi tak zwany „opad efektywny”, bezpośrednio zasilający ciek wodny lub inny odbiornik i tworzy falę wezbraniową. Jedną z częściej wykorzystywanych, z uwagi na prostotę i praktyczność użycia, metod obliczania wielkości opadu efektywnego jest metoda SCS-CN opracowana przez Służbę Ochrony Gleb Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (Soil Conservation Service USDA). Obecnie metoda ta nosi nazwę NRCS-CN (National Resources Conservation Service – Curve Number) (Banasik i in. 2014, NRCS 2004). Opad efektywny w tej metodzie zależy od bezwymiarowego parametru CN, uwzględniającego grupy gleb, sposób użytkowania terenu zlewni oraz uwilgotnienie zlewni przed wystąpieniem opadu (tab. 21).

Opad efektywny oblicza się ze wzoru:

$$H = \begin{cases} \frac{(P - 0,2S)^2}{(P - 0,8S)} & P > 0,2S \\ 0, & P \leq 0,2S \end{cases}$$

Gdzie: H – spływ powierzchniowy (mm),

P – opad atmosferyczny (mm),

S – maksymalna potencjalna retencja zlewni (mm) obliczana z zależności:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right).$$

Parametr *CN* przyjmuje wartości od 0, oznaczającego całkowity brak spływów niezależnie od wielkości opadów, do 100 (cały opad tworzy spływ powierzchniowy). W praktyce wartości *CN* wynoszą od około 30 dla gleb o bardzo wysokiej infiltracji (np. żwirowe) do około 98 w przypadku powierzchni nieprzepuszczalnych (np. dachy, powierzchnie dróg asfaltowych), a nawet 100 dla wód powierzchniowych. Przykładowe wartości współczynnika *CN* dla przeciętnych warunków wilgotnościowych podano w tabeli 21.

Tabela 21

Przykładowe wartości parametru *CN* przy przeciętnym uwilgotnieniu gleby (Banasiak i in. 2017, USDA 2016)

Pokrycie powierzchni ziemi	Warunki hydrologiczne	Wartości <i>CN</i> dla grup glebowych			
		A	B	C	D
Tereny otwarte: trawniki, parki, pola golfowe, cmentarze itp.	złe	68	79	86	89
	średnie	49	69	79	84
	dobrze	39	61	74	80
Tereny nieprzepuszczalne: utwardzone parkingi, dachy, jezdnie		98	98	98	98
Drogi i ulice z nawierzchnią	nieprzepuszczalną z rowami otwartymi	83	89	92	93
	żwirową lub tłuczniową	76	85	89	91
	gruntową	72	82	87	89
Tereny zamieszkałe – przy przeciętnej powierzchni działki	≤ 500 m ² (65% p. n.)	77	85	90	92
	1000 m ² (38% p. n.)	61	75	83	87
	1350 m ² (30% p. n.)	57	72	81	86
	2000 m ² (25% p. n.)	54	70	80	85
	4000 m ² (20% p. n.)	51	68	79	84
Zagrody (budynki, ścieżki, dojazdy i otoczenie)		59	74	82	86
Rośliny okopowe	warunki przeciętne	67	77	83	87
Rośliny zbożowe	warunki przeciętne	62	73	81	85
Rośliny motylkowe	warunki przeciętne	60	72	80	83
Pastwiska	warunki przeciętne	49	69	79	84
Łąki	warunki przeciętne	30	58	71	78
Sady i szkółki	warunki przeciętne	43	65	76	82
	rzadkie	45	66	77	83
Lasy	średniogęste	36	60	73	79
	gęste	30	55	70	77

p.n. – powierzchnia nieprzepuszczalna.

Gleby podzielono ze względu na możliwość powstania spływu powierzchniowego na cztery grupy (Banasiak i in. 2017, NRCS 2009):

- Gleby o małej możliwości powstania odpływu powierzchniowego; charakteryzują się dobrą przepuszczalnością i dużymi współczynnikami filtracji

($k > 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Do tej grupy zaliczyć można głębokie piaski, piaski z niewielką domieszką gliny, żwiry

- Gleby o przepuszczalności powyżej średniej, średni współczynnik filtracji ($4 \cdot 10^{-6} < k \leq 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Należą tej do grupy: gleby piaszczyste średnio głębokie, płytkie lessy oraz ily piaszczyste
- Gleby o przepuszczalności poniżej średniej ($0,4 \cdot 10^{-6} < k \leq 4 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Należą do niej gleby uwarstwione, posiadające wkładki słabo przepuszczalne oraz ily gliniaste, płytkie ily piaszczyste, gleby o niskiej zawartości części organicznych, gliny o dużej zawartości części ilastych
- Gleby o dużej możliwości powstawania odpływu powierzchniowego, o przepuszczalności bardzo małej i bardzo niskim współczynniku filtracji ($k \leq 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Do grupy tej należą: gleby gliniaste, gliny pylaste, gliny zasolone, gleby uwarstwione z warstewkami nieprzepuszczalnymi.

Przestrzenną zmienność parametru CN w obrębie zlewni uwzględnia się, obliczając wartość średniej ważonej:

$$CN = \frac{\sum CN_j A_j}{\sum A_j}$$

gdzie: CN_j – wartość parametru dla j -tej powierzchni jednorodnej o powierzchni A_j .

Obliczone dla wybranych wysokości opadu P i średnich dla obszaru zlewni wartości parametru CN wysokości opadu efektywnego (spływu powierzchniowego) H przedstawiono w tabeli 22. Do przekształcenia opadu efektywnego w odpływ

Tabela 22

Wskaźnik spływu powierzchniowego (mm)

Wysokość opadu	Spływ dla średniego numeru krzywej CN						
	60	65	70	75	80	85	90
15	0	0	0	0	0,08	0,72	2,33
20	0	0	0	0,11	0,75	2,18	4,84
25	0	0	0,09	0,70	2,00	4,23	7,87
30	0	0,05	0,58	1,75	3,70	6,72	11,28
35	0,01	0,40	1,43	3,18	5,80	9,57	14,97
40	0,21	1,07	2,61	4,94	8,21	12,7	18,86
45	0,69	2,02	4,08	6,99	10,89	16,06	22,92
50	1,40	3,22	5,81	9,29	13,80	19,61	27,11
55	2,34	4,65	7,77	11,81	16,91	23,32	31,40
60	3,49	6,29	9,94	14,52	20,19	27,17	35,78

wykorzystać można liniowe modele o parametrach skupionych, na przykład model Snydera (Wałęga 2012). Model ten wykorzystuje koncepcję hydrogramu jednostkowego, którego podstawowymi parametrami są czas wystąpienia kulminacji hydrogramu t_p oraz przepływ kulminacyjny q_p . Wartości t_p oblicza się z zależności:

$$t_p = t_L + \frac{t_D}{2}$$

gdzie: t_L – czas opóźnienia odpływu, obliczany wzorem:

$$t_L = C_t (L \cdot L_c)^{0,3}$$

gdzie: C_t – współczynnik związany z retencją zlewni,

L – odległość wzdłuż głównego cieku od działu wodnego do przekroju zamykającego (km),

L_c – odległość wzdłuż głównego cieku od przekroju ujściowego do środka ciężkości zlewni (km).

Wartość t_D – standardowy czas trwania opadu efektywnego – jest wyznaczana ze wzoru:

$$t_D = \frac{t_L}{5,5}$$

Natomiast przepływ kulminacyjny hydrogramu q_p obliczany jest z zależności:

$$q_p = 2,75 \frac{C_p \cdot A}{t_L}$$

gdzie: C_p – parametr modelu związany z retencyjnością zlewni,

A – powierzchnia zlewni (km²).

Kolejnym źródłem wody zasilającej małe zbiorniki wodne są spływy powierzchniowe. Powstają one w okresach roztopów wiosennych oraz po intensywnych opadach atmosferycznych. Wielkość spływów powierzchniowych można wyznaczyć przedstawioną wcześniej metodą CN SCS. Wartości wskaźnika spływu powierzchniowego w zależności od średniego wartości parametru CN i wysokości opadu przedstawiono w tabeli 22.

Sprawdzenie, czy źródła wody są wystarczające do uzyskania objętości wody zapewniającej napełnienie zbiornika i utrzymanie lustra wody na wymaganym poziomie, można uzyskać, sporządzając bilans wodny. Bilans wykonujemy dla okresów, w których wymagane jest napełnienie stawu. Może on obejmować cały rok lub krótsze okresy, na przykład okres wegetacyjny. Prawidłowo sporządzany pozwala

również określić, czy krótkotrwałe, bardzo wysokie dopływy wody (np. spływy powierzchniowe po opadach burzowych) nie spowodują zalania terenów przyległych do zbiornika wodnego. Analiza stanu zasobów wodnych w stawie oraz prognozowanie ich zmian w układzie dobowym wymaga dużej liczby danych o poborze wody i zasilaniu, co powoduje celowość zastosowania systemów komputerowych (Ouyang i in. 2017).

Bilans wodny w uproszczonej postaci wygląda następująco:

$$Q_c + Q_p + Q_g + Q_d + P + V_p + Q_z + Q_o + Q_f + Q_s + E = V_k$$

gdzie: P – opad atmosferyczny na powierzchnię lustra wody w stawie,

Q_c – dopływ wody do zbiornika z cieku,

Q_p – dopływ wody ze spływów powierzchniowych,

Q_g – dopływ wód gruntowych do zbiornika,

Q_d – zasilanie wodami drenarskimi,

V_p – objętość początkowa wody w zbiorniku,

Q_z – pobór wody,

Q_o – odpływ wody ze stawu,

Q_o – przesięki ze zbiornika do wód gruntowych,

Q_s – odpływ do sieci drenarskiej,

E – parowanie z lustra wody,

V_k – objętość wody w zbiorniku na koniec okresu bilansowania.

W zależności od typu zbiornika wodnego zmienia się waga różnych składowych w bilansie końcowym.

W przypadku zbiorników zaporowych pomijane jest zasilanie wodami gruntowymi, natomiast przesięki wód ze zbiornika mogą stanowić istotne źródło strat wody. Jak podaje Boyd (2005), wielkości przesięków przez skarpy stawów rybnych sięgać mogą ponad 100 cm, a straty na filtrację wynoszące $0-5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ uważane są za małe. Z kolei odwrotną zależność można zaobserwować w przypadku stawów kopanych o stałym zasilaniu wodami gruntowymi. Natomiast w przypadku naturalnych oczek wodnych kierunek przepływu wody zmienia się sezonowo. W okresie zimowo-wiosennym obserwujemy zasilanie oczka przez wody gruntowe, natomiast w okresie letnim oczko zasila tereny przyległe (Kosturkiewicz i Fiedler 1993). Wielkość tej wymiany wody zależy od przebiegu warunków meteorologicznych w analizowanym sezonie. Jak wykazały badania prowadzone na Pojezierzu Gnieźnieńskim, w roku mokrym przesięki do oczka w okresie wiosny mogą zwiększyć poziom wody o prawie 200 mm, a filtracja do wód gruntowych sięgać może 275 mm. Z kolei w roku o opadach zbliżonych do średnich wartości te wynoszą odpowiednio 250 mm i 2 mm (Fiedler 1998). Podawane przez innych autorów wartości przesięków do oczek wynoszą 1-45 mm, a z oczek do wód gruntowych 5-40 mm

(Hayashi i in. 1998, Shjeflo 1968). Zasilanie spływami powierzchniowymi jest pomijane w przypadku, gdy spadki zlewni są mniejsze niż 10%, natomiast uwzględnąć trzeba spływy z powierzchni nieprzepuszczalnych, takich jak dachy, parkingi, drogi, jeśli bezpośrednio kierowane są do zbiornika wodnego.

Należy zwrócić uwagę, że ze względu na zachodzące w ostatnich latach zmiany klimatyczne (IMGW 2021) stosowanie danych o średnich z wielolecia opadach i temperaturach powietrza przedstawionych w „Atlasie hydrologicznym Polski” (1986) może skutkować nieprawidłowymi wynikami obliczania bilansu. Zaleca się więc używanie aktualnych wartości pozyskanych na przykład z IMGW-PIB.

Lokalizacja zbiorników wodnych

Podstawowym wskaźnikiem decydującym o wyborze miejsca budowy stawu jest dostępność objętości wody wystarczającej do utrzymania wymaganego napełnienia stawu. Wskaźnik ten może być często trudny do spełnienia w przypadku oczek polodowcowych, usytuowanych losowo w rzeźbie terenu. Kolejnym wskaźnikiem określającym celowość wyboru miejsca założenia stawu jest budowa podłoża glebowego w miejscu planowanego zbiornika. Prawidłowa ocena możliwa jest po wykonaniu badań geotechnicznych pozwalających na określenie budowy podłoża do głębokości wynoszącej co najmniej dwukrotność projektowanej wysokości piętrzenia, w przypadku zbiornika zaporowego, lub co najmniej 0,5 m poniżej dna stawu. W takiej ocenie wystarczy opisać podstawowe grupy gruntów (Mioduszewski 2014):

- grunty bardzo przepuszczalne, do których można zaliczyć żwiry oraz piaski grube i średnie
- grunty przepuszczalne – czyli łatwo ulegające sufozji pyły i piaski pylaste
- grunty słabo przepuszczalne, czyli glina piaszczysta, piasek gliniasty, pospółka gliniasta
- grunty nieprzepuszczalne, czyli gliny i ły
- grunty organiczne – namuły i torfy.

W przypadku zasilania zbiorników wodami powierzchniowymi najbardziej korzystna jest lokalizacja w miejscu zalegania grubej warstwy gruntów nieprzepuszczalnych lub słabo przepuszczalnych, dzięki czemu minimalizowane są straty wody na przesiąki przez dno i skarpy zbiornika. USDA (2016) jako warunki wystarczające w przypadku piętrzenia wody do wysokości 3 m określa występowanie poniżej dna zbiornika 1-metrowej warstwy utworów co najmniej średnioplastycznych, o co najmniej 20-procentowym udziale materiału przechodzącego przez sito 0,075 mm.

Jeśli grunty zbudowane są z utworów o wysokim współczynniku przepuszczalności, konieczne jest uszczelnienie skarp i dna z wykorzystaniem środków

technicznych, na przykład bentonitu lub folii z tworzyw sztucznych. Powoduje to jednak bardzo znaczny wzrost kosztów inwestycji i wymaga dodatkowej analizy opłacalności.

Należy unikać lokalizacji stawów w przypadku występowania w podłożu utworów silnie podatnych na sufozję, szczególnie gdy występować może szybkie obniżanie lustra wody, na przykład przy poborze wody. Prowadzić to może do niszczenia skarp przez zsuwy powierzchniowe, a w skrajnych przypadkach do niszczenia nieprawidłowo zaprojektowanych budowli. Szczególnej uwagi wymagają również projekty budowli posadowionych na głębokich gruntach organicznych.

W przypadku stawów kopanych, zasilanych wodami gruntowymi, istotne jest stałe występowanie płytkiego lustra wody gruntowej.

Projektowanie stawów

Stawy kopane w stosunkowo płaskich terenach mają najczęściej kształt zbliżony do prostokąta. Wynika to głównie z łatwości wykonania kształtu przez maszyny kopiące. Jednak w przypadku walorów estetycznych stawów, wynikających na przykład z chęci uniknięcia kontrastu z otaczającym krajobrazem, kształt powinien być nieregularny. Równocześnie należy zaplanować takie zagospodarowanie materiału pochodzącego z wykopu, aby jak najlepiej wkomponował się w otoczenie stawu.

Wymiary wykopu zależy od wymaganej objętości retencjonowanej wody zwiększonej o część wynikającą z planowanego położenia lustra wody poniżej poziomu terenu. Głębokość czaszy zbiornika wodnego nie powinna być mniejsza niż 2 m, a nachylenie skarp nie powinno być większe od 1 : 2 w przypadku gruntu spoistego i 1 : 2,5 w przypadku gruntu niespoistego. Gdy staw stanowić będzie źródło wody dla zwierząt, należy zaprojektować rampę ułatwiającą dostęp do wody, o nachyleniu nie większym niż 1 : 4. Natomiast zalecane nachylenie dojdzie do wodopoju powinno mieć nachylenie 1 : 6-1 : 12 (Mioduszewski 2014). Zaleca się również złączenie przejścia między skarpą a dnem i terenem otaczającym.

Objętość koniecznego do usunięcia gruntu V (m^3) obliczyć można z zależności:

$$V = \frac{A + 4 \cdot B + C}{6} \cdot D$$

gdzie: A , B , C – powierzchnia wykopu (m^2) odpowiednio na powierzchni wykopu, w połowie głębokości oraz na dnie wykopu,
 D – średnia głębokość stawu (m).

W trakcie budowy zbiornika lub bezpośrednio po jej ukończeniu należy wykonać nasadzenia roślinności. Trawy, byliny, krzewy i drzewa chronią skarpy stawu

i jego otoczenie przed erozją, tworzą osłonę, wpływają na mikroklimat, zapewniają warunki bytowania dla dzikich zwierząt, a także zmniejszają dopływ substancji zanieczyszczających do zbiornika (Giaccio i in. 2017, Le Bissonnais i in. 2004, Young i in. 1980). Dobór gatunków musi być dostosowany do lokalnych warunków klimatycznych i glebowo-wodnych, by zapewnić jak najdłuższe przeżycie roślin przy jak najmniejszych kosztach utrzymania.

Małe zbiorniki wodne zarówno pochodzenia naturalnego, jak i wykonane przez człowieka stanowią cenny element środowiska. Zwiększają zasoby wody dostępnej do produkcji rolniczej, ale także pełnią funkcje rekreacyjne, estetyczne czy biocenotyczne. Wykonanie zbiornika wodnego, w zależności od jego parametrów, może podlegać przepisom prawa wodnego, prawa budowlanego, prawa ochrony środowiska i innym. Dlatego przed rozpoczęciem prac należy skonsultować się ze specjalistą hydrotechnikiem oraz właściwymi urzędami administracji publicznej.

Literatura

- Atlas hydrologiczny Polski. (1986). Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- Austin J.E. (1998): Waterfowl in the prairie pothole region. W: Status and trends of the nation's biological resources. Red. M.J. Mac, P.A. Opler, C. E. Puckett Haecker, P.D. Doran. U.S. Geological Survey, USGS Publications Warehouse. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/93823>: 456-457.
- Banasik K., Krajewski A., Sikorska A., Hejduk L. (2014): Curve number estimation for a small urban catchment from recorded rainfall-runoff events. *Archiv. Environ. Prot.*, 40(3), 75-86. <https://doi.org/10.2478/aep-2014-0032>.
- Banasik K., Wałęga A., Węglarczyk S., Więzik B. (2017): Aktualizacja metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. Stowarzyszenie Hydrologów Polskich, Warszawa. <https://www.kzgw.gov.pl/files/zam-pub/20170402-przeglad-i-aktualizacja-map/zal-2-do-OPZ-ujednolicony-1.pdf>.
- Boyd C. (2005): Water use in aquaculture. *World Aquacult.*, 3(36), 12-15, 70.
- Drwal J., Lange W. (1985): Niektóre hydrologiczne i limnologiczne odrębności oczek. *Zesz. Nauk. Wyzd. BGiO UG, Geografia*, 14, 69-83.
- Dz.U. 1995 Nr 16 poz. 78. (1995). Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. O ochronie gruntów rolnych i leśnych. *Dz.U.* 1995 Nr 16 poz. 78. <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19950160078/U/D19950078Lj.pdf>.
- Eisenlohr Jr., W.S. (1972): Hydrologic investigations of prairie potholes in North Dakota, 1959-68. Report Nr 585A; Professional Paper, s. 114. USGS Publications Warehouse.
- Fiedler M. (1998): Bilanse wodne zlewni śródpolnych oczek wodnych na terenie zdrenowanym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 477, 51-57.
- Fiedler M. (2011): Gospodarka wodna mikrozwlewni rolniczych z występującymi oczkami wodnymi na Pojezierzu Gnieźnieńskim. Wydawnictwo UPP, Poznań.
- Fiedler M., Antkowiak M., Oliskiewicz-Krzywicka A., Zbierska A. (2017): Model for the volume-area-depth relations of midfield ponds using LiDAR. *J. Ecol. Eng.*, 18(6), 36-42.
- Giaccio G.C.M., Laterra P., Cabria F. (2017): Floristic associations and filtering ability of riparian vegetation strips. *Phyton*, 86(1), 112-123.

- Hayashi M., van der Kamp G. (2000): Simple equations to represent the volume–area–depth relations of shallow wetlands in small topographic depressions. *J. Hydrol.*, 237(1-2), 74-85.
- Hayashi M., van der Kamp G., Rudolph D. L. (1998): Water and solute transfer between a prairie wetland and adjacent uplands. 1. Water balance. *J. Hydrol.*, 207(1-2), 42-55.
- IMGW. (2021). *Klimat Polski 2020*. IMGW-PIB.
- Koc J., Cymes I., Skwierawski A., Szyperek U. (2001): Znaczenie ochrony małych zbiorników wodnych w krajobrazie rolniczym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 476, 397-407.
- Korytowski M. (2006): Wpływ śródlęsnego oczka wodnego na stany wód gruntowych w przyległych siedliskach leśnych. *Acta Sci. Pol. Form. Circum.*, 5,2, 91-100.
- Kosturkiewicz A., Fiedler M. (1993): Związki stanów wody w śródpolnych oczkach wodnych ze stanami wód gruntowych. W: *Geokosystem terenów nizinnych*. Ossolineum, Wrocław: 115-121.
- Kosturkiewicz A., Szafranski Cz., Fiedler M. (1996): Śródpolne oczka wodne w gospodarce wodnej meliorowanych terenów bogato urzeźbionych. *Przeł. Nauk. Wydz. Melior. Inż. Środ.*, 11, 245-255.
- Le Bissonnais Y., Lecomte V., Cerdan O. (2004): Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie*, 24(3), 129-136.
- Lutze G., Kiesel J., Kalettka T. (2007): Charakteristische Ausstattungselemente von Jungmoränenlandschaften—Dargestellt am Beispiel von Ackerhohlformen und Flurgehölzen in der Zietheiner Moränenlandschaft. W: *Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Red., Landschaften beobachten, nutzen und schützen*. Teubner: 219-235.
- Mastin M.C. (2009): Watershed models for decision support for inflows to potholes reservoir. Report Nr 2009-5081; Scientific Investigations Report. USGS Publications Warehouse, Washington.
- Mioduszewski W. (2014): *Stawy małe zbiorniki wodne. Planowanie, wykonawstwo, użytkowanie*. PWRiL, Warszawa.
- Mojski J. (1968): *Zarys stratygrafii zlodowacenia północnopolskiego (bałtyckiego)*. Pr. Geogr. Inst. Geogr. PAN, 74, 37-57.
- NRCS. (2004): Estimation of direct runoff from storm rainfall. W: *National engineering handbook. Part 630 Hydrology*. USDA. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17752.wba>
- NRCS. (2009): *Hydrologic soil groups*. W: *National engineering handbook. Part 630 Hydrology*. USDA.
- Ouyang Y., Paz J.O., Feng G., Read J.J., Adeli A., Jenkins J.N. (2017): A model to estimate hydrological processes and water budget in an irrigation farm pond. *Water Res. Manage.*, 31(7), 2225-2241.
- Richardson J.L., Arndt J.L., Freeland J. (1994): *Wetland soils of the prairie potholes*. W: *Advances in agronomy*. Elsevier: 121-171.
- Shjeflo J. B. (1968): *Evapotranspiration and the water budget of prairie potholes in North Dakota*. Report Nr 585B; Professional Paper. USGS Publications Warehouse.
- Sibbett N. (1999): *The distribution and abundance of ponds in Suffolk*. *English Nature*.
- Skwierawski A. (2010): *Funkcjonowanie małych zbiorników wodnych w różnych typach krajobrazu*. W: *Ochrona zasobów i jakości wody w krajobrazie wiejskim*. UWM, Olsztyn: 175-195.
- Sloan C.E. (1972): *Ground-water hydrology of prairie potholes in North Dakota*. Report Nr 585C; Professional Paper. USGS Publications Warehouse.
- Solarski H., Nowicki Z. (1990): *Możliwości retencyjne oczek wodnych i mokradel na Pojezierzu Olsztyńskim*. *Acta Acad. Agric. Tech. Olst.*, 20, 173-183.
- USDA. (2016): *Ponds—Planning, design, construction (agriculture handbook 590)*. LULU COM.

- Wałęga A. (2012): Próba opracowania zależności regionalnych do obliczania parametrów syntetycznego hydrogramu jednostkowego Snydera. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2/3, 5-16.
- Wiens L.H. (2001): A surface area-volume relationship for prairie wetlands in the upper assiniboine river basin. Saskatchewan. *Can. Water Res. J.*, 26(4), 503-513.
- Young R.A., Huntrods T., Anderson W. (1980): Effectiveness of vegetated buffer strips in controlling pollution from feedlot runoff. *J. Environ. Quality*, 9(3), 483-487.

Charakterystyka materiałów budowlanych stosowanych w budowie i remontach urządzeń melioracji wodnych

Anna Szymczak-Graczyk

Wfazie budowy, odbudowy, modernizacji czy remontach urządzeń służących gospodarowaniu wodą w przestrzeni rolniczej mają zastosowanie różnorodne materiały i wyroby budowlane. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku Prawo budowlane w artykule 10 definiuje wyroby budowlane jako: „Wyroby wytworzone w celu zastosowania w obiekcie budowlanym w sposób trwały o właściwościach użytkowych umożliwiających prawidłowo zaprojektowanym i wykonanym obiektom budowlanym spełnienie podstawowych wymagań. Można stosować przy wykonywaniu robót budowlanych wyłącznie, jeżeli wyroby te zostały wprowadzone do obrotu lub udostępnione na rynku krajowym zgodnie z przepisami odrębnymi, a w przypadku wyrobów budowlanych – również zgodnie z zamierzonym zastosowaniem” (Ustawa Prawo budowlane).

Aby materiały budowlane spełniały swoją funkcję, muszą posiadać odpowiednie cechy fizyczne, fizykochemiczne, mechaniczne, chemiczne, higieniczne i technologiczne. Cechy te określane są parametrami technicznymi i badane przed dopuszczeniem materiałów na rynek. Dzięki określonym właściwościom materiałów obiekt budowlany spełnia tzw. podstawowe wymagania, o których mówi ustawa Prawo budowlane (1994) w artykule 5.1, dotyczące:

- nośności i stateczności konstrukcji
- bezpieczeństwa pożarowego
- higieny, zdrowia i środowiska



- bezpieczeństwa użytkowania i dostępności obiektów
- ochrony przed hałasem
- oszczędności energii i izolacyjności cieplnej
- zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych.

Materiały podlegają kontroli podczas produkcji i odbioru na budowie w zakresie możliwym do sprawdzenia, na przykład wymiary dostarczonych wyrobów (błoczki, pustaki), data przydatności do stosowania (cement). Stosowanie materiałów odpowiedniej jakości jest jednym z warunków wykonania trwałego obiektu budowlanego, odpornego na różne warunki atmosferyczne czy też pożarowe. Zastosowanie niewłaściwych materiałów może skrócić okres eksploatacji budynku lub budowli. Na przykład użycie niewłaściwych cegieł może powodować wykwyty na ścianach powstające na skutek wykrystalizowania się pewnych soli zawartych w cegle. Nadmierna nasiąkliwość materiałów może spowodować, że w warunkach zimowych wskutek zamarzania wody wystąpi rozsadzanie materiału. Zawilgocenie materiału, na przykład wełny mineralnej, zmienia jego właściwości cieplne, powoduje zwiększenie przewodności cieplnej, a tym samym zmniejszenie walorów termoizolacyjności. Jest również cała grupa materiałów budowlanych, których zastosowanie po upływie daty ważności lub wbudowanie uszkodzonych nie jest możliwe, na przykład zamoknięta wełna mineralna lub przeterminowany cement (Żeńczykowski 1992).

Klasyfikację materiałów budowlanych można przeprowadzić za pomocą kilku kryteriów, ze względu na:

- pochodzenie
 - naturalne, na przykład kamień, drewno, żwir
 - z przeróbki surowców budowlanych, na przykład ceramika, szkło, metale, spoiwa, kruszywa, betony, zaprawy
 - syntetyczne, na przykład tworzywa sztuczne
 - z odpadów przemysłowych,
- właściwości techniczne
 - konstrukcyjne (przeznaczone do przenoszenia obciążeń), na przykład beton, żelbet, stal
 - niekonstrukcyjne (nieprzeznaczone do przenoszenia obciążeń)
 - termoizolacyjne (chroniące przed czynnikami atmosferycznymi), na przykład styropian, wełna mineralna, wełna szklana, pianka poliuretanowa, papa
 - hydroizolacyjne (chroniące przed wilgocią lub wodą), na przykład wyprawy, gładzie, papa, lepik, folia
 - dźwiękoizolacyjne (chroniące przed hałasem), na przykład wełna mineralna,

- przeznaczenie
 - elementy murowe, na przykład bloczek, cegła, pustak ścienny, płyta gipso-wo-kartonowa
 - elementy stropowe, na przykład pustak stropowy, płyta kanałowa, belka stropowa
 - pokrycia dachowe, na przykład dachówka, blacha trapezowa, blacha falista
 - izolacyjne, na przykład styropian, wełna mineralna, pianka poliuretanowa
 - wyroby do ochrony przed korozją, na przykład farby
 - wyroby instalacyjne, na przykład stal, tworzywa sztuczne, ceramika
 - wyroby wykończeniowe, na przykład farby, gładzie, tynki.

Materiały budowlane stosowane w budowie, modernizacji i remontach budowli służących gospodarowaniu wodą to głównie ceramika, beton, stal, drewno i tworzywa sztuczne. Poniżej przeprowadzono ich krótką charakterystykę.

Ceramika

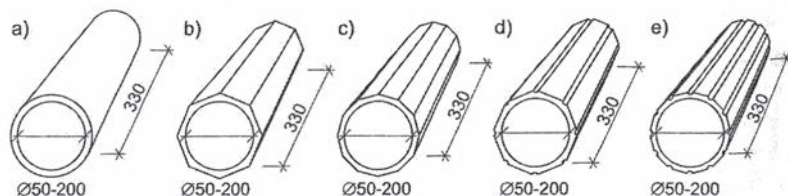
Ceramika obejmuje wyroby uformowane z glin naturalnych, a następnie wysuszone i wypalone, dzięki czemu uzyskują stałą twardość i odporność mechaniczną.

Ceramika czerwona produkowana jest z niskotopliwych glin żelazistych i wapnistych. Po wypaleniu w temperaturze około 900°C otrzymuje się porowate wyroby o zabarwieniu od kremowego do ciemnoczerwonego. Do wyrobów o czerepie porowatym, o porowatości do 22% zalicza się między innymi rurki drenarskie. Rury i kształtki kamionkowe to wyroby o strukturze spieczonej i nasiąkliwości około 6% do maksymalnie 12% (Stefańczyk i in. 2010).

Ceramiczne rurki drenarskie były stosowane w pracach melioracyjnych, w szczególności do odwadniania i nawadniania użytków rolnych. Są to elementy o kształcie walca lub graniastosłupa prostego o przekroju poprzecznym kołowym lub w kształcie wielokąta foremnego. Otwór w rurce powinien być owalny i znajdować się centrycznie. Rurki drenarskie ceramiczne są produkowane w długości standaryzowanej, wynoszącej 330 ± 8 mm. Polska norma PN-B-12000:2012 podaje podział rurek na odmiany i typy.

W zależności od kształtu przekroju poprzecznego rozróżnia następujące odmiany rurek drenarskich (ryc. 60):

- C – cylindryczną
- 6 – sześciokątną
- 8 – ośmiokątną
- 12 – dwunastokątną.



Ryc. 60. Rurki drenarskie: a – odmiana C, b – odmiana 8, c – odmiana 12, d – odmiana 8 z wgłębieniami, e – odmiana 12 z wgłębieniami (Stefańczyk i in. 2010)

Stosuje się następujące średnice rurek: $\phi 50$, $\phi 62,5$, $\phi 75$, $\phi 100$, $\phi 125$, $\phi 150$, $\phi 175$ i $\phi 200$ mm. W tabeli 23 podano wymiary rurek drenarskich ceramicznych. Oznaczenie rurki drenarskiej powinno zawierać: nazwę, numer normy, symbol typu i symbol odmiany, na przykład oznaczenie rurki drenarskiej typu $\phi 50$, odmiany sześciokątnej: rurka drenarska ceramiczna PN-B-12000 f50-6.

Tabela 23

Wymiary rurek drenarskich ceramicznych (PN-B-12000:2012)

Typ	Wielkość		
	średnica otworu d (mm)	długość l (mm)	grubość ścianki s (mm)
Ø50	50±3	330±8	od 6 do 12
Ø62,5	62,5±3		od 7 do 14
Ø75	75±4		od 8 do 16
Ø100	100±5		od 9 do 18
Ø125	125±6		od 10 do 20
Ø150	150±6		od 11 do 22
Ø175	175±6		od 12 do 24
Ø200	200±6		od 13 do 26

Powierzchnie zewnętrzne rurek cylindrycznych powinny być gładkie, bez jakichkolwiek rowków czy wypustów. Rurki o przekroju w kształcie sześciokąta powinny mieć ścięte krawędzie lub półokrągłe rowki na krawędziach. Rurki o większej liczbie boków od sześciu mogą mieć na krawędziach rowki. Rurki drenarskie ceramiczne powinny być odporne na działanie siły zgniatającej nie mniejszej niż 4,0 kN i nie wykazywać uszkodzeń po 20 cyklach zamrażania i odmrażania.

Przed wbudowaniem należy zawsze sprawdzić poprawność wykonania ceramicznej rurki drenarskiej. Wszystkie elementy uszkodzone należy usunąć, bowiem nie można wbudować w sieć melioracyjną elementów uszkodzonych, gdyż mogłyby one spowodować niewłaściwe funkcjonowanie całego systemu.

Norma PN-B-12000:2012 podaje dopuszczalne wady rurek drenarskich ceramicznych (tab. 24).

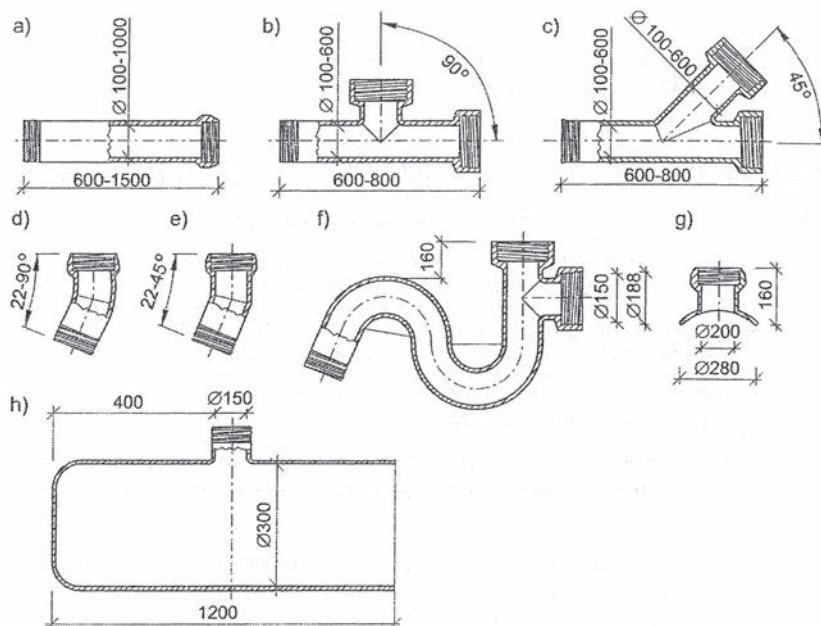
Tabela 24

Dopuszczalne wady rurek drenarskich ceramicznych (PN-B-12000:2012)

Rodzaj wady	Dopuszczalna wielkość i liczba wad							
	typ							
	Ø50	Ø62,5	Ø75	Ø100	Ø125	Ø150	Ø175	Ø200
Deformacja otworu	3	3	4	5	6	6	8	8
Różnica grubości ścianek	2	2	2	3	3	4	4	4
Wygięcie	3							
Odczylenie od kąta prostego między powierzchnią czołową a powierzchnią boczną	2	2	2	3	3	3	4	4
Szczerby i uszkodzenia zewnętrznej krawędzi powierzchni czołowej o szerokości większej niż 1/3 grubości ścianki	łącznie długość nie większa niż 1/5 długości krawędzi							
Odpryski na powierzchniach bocznych o największym wymiarze większym niż 3 mm, ale nie większym niż 20 mm i głębokości nie większej niż 3/5 grubości ścianki	liczba							
	3	3	4	4	5	5	6	6
Pęknięcia na powierzchniach bocznych nie przechodzące przez całą grubość ścianki, o długości większej niż 12 mm, ale nie większej niż 70 mm	liczba							
	2	2	2	3	3	3	4	4
Zgrubienie na krawędzi wewnętrznej otworu	1	1	1	1	1	2	2	2

Rury i kształtki kamionkowe są przeznaczone do budowy sieci drenażowych i kanalizacyjnych oraz instalacji odpornych na działanie kwasów i ługów. Na rycinie 61 przedstawiono dostępny na rynku asortyment rurek i kształtek kamionkowych.

Rury i kształtki powinny być trwałe i pozbawione wad, które miałyby negatywny wpływ podczas ich użytkowania. Norma europejska EN 295-1:2013 podaje, że dopuszcza się wady wyglądu takie jak brak szkliwa, nierówność powierzchni, zgrubienia w złączeniach rur i tulei i niewielkie pogorszenie jakości powierzchni, pod warunkiem, że nie nastąpi pogorszenie właściwości nieprzepuszczalności i stałości



Ryc. 61. Rury i kształtki kamionkowe: a – prostopadła kielichowa zwykła, b – trójnik prosty pojedynczy, c – trójnik skośny pojedynczy, d – łuk, e – kolano, f – syfon skośny z rewizją, g – wpust kanałowy górny, h – osadnik ściekowy (Stefańczyk i in. 2010)

przepływu. Rury i kształtki mogą być nieszkliwione lub szkliwione wewnątrz, uważa się je za sztywne, natomiast uszczelki za miękkie i elastyczne. Rury i kształtki kamionkowe mają dużą odporność na korozję. Są one produkowane o średnicach od 100 do 1400 mm. W tabeli 25 zestawiono dostępne średnice nominalne i wewnętrzne kształtek. Preferowane są długości rur podane w tabeli 26.

Przed wbudowaniem należy sprawdzić poprawność wykonania rury lub kształtki kamionkowej. Zgodnie z normą EN 295-1:2013 granice tolerancji długości nominalnej rur i złączek prostych deklarowane przez producenta, mierzone z dokładnością do 1 mm, powinny wynosić od -1% do +4%, z minimalną wartością ± 10 mm. Odchylenie od prostokątności mierzone w stosunku do dwóch boków przeciwległych dla średnic do DN 300 powinno być mniejsze lub równe 6 mm. Dla średnic powyżej DN 300 niedopuszczalne są odchyłki większe niż 2%. Preferuje się następujące krzywizny łuków: 11,25°, 15°, 22,5°, 30°, 45°, 90°. Dopuszczalne odchyłki wynoszą $\pm 3^\circ$ dla nominalnej wartości krzywizny łuków 11,25° i 15° i $\pm 4^\circ$ dla 22,5°, 30° oraz $\pm 4^\circ$ dla 45°, 90°.

Zalecenia dotyczące sposobu przechowywania i transportu wyrobów ceramicznych zawarte są w normie PB-B-12030:1996. Wyroby w zależności od ich wymiarów oraz wymagań dotyczących pakowania, przechowywania i transportu

podzielono na osiem grup. Grupa VII obejmuje rurki drenarskie i nakrywy kablowe, które mogą być przechowywane i transportowane w jednostkach ładunkowych, a przechowywanie powinno odbywać się w przyzmach wysokości do 2,0 m. Na rycinie 62 przedstawiono poprawne składowanie rurek drenarskich w przyzmiu.

Tabela 25

Średnice nominalne oraz minimalne średnice wewnętrzne kształtek kamionkowych (EN 295-1:2013)

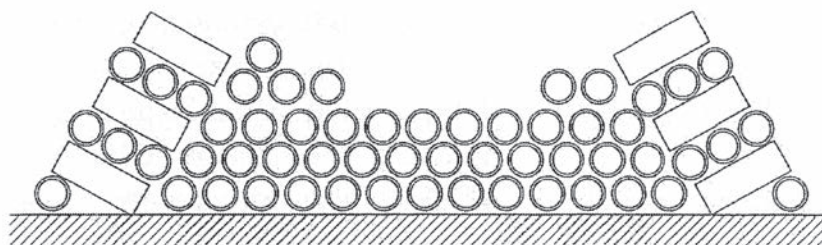
Średnica nominalna (DN)	Średnica wewnętrzna minimalna (mm)	Średnica nominalna (DN)	Średnica wewnętrzna minimalna (mm)
100	96	450	439
125	121	500	487
150	146	600	585
200	195	700	682
225	219	800	780
250	244	900	878
300	293	1000	975
350	341	1200	1170
400	390	1400	1365

Tabela 26

Preferowane długości rur (EN 295-1:2013)

Średnica nominalna (DN)	Preferowana nominalna długość (m)				
	1,5	–	2,0	2,5	–
200	1,5	–	2,0	2,5	–
225	1,5	1,75	2,0	–	–
250	1,5	–	2,0	2,5	–
300	1,5	–	2,0	2,5	–
>350	1,5	–	2,0	2,5	3,0

Długości 1,0 m, 1,6 m i 1,85 m są również dla zakresu 200 DN do 450 DN



Ryc. 62. Przyzma rurek drenarskich

Beton

Beton to sztuczny materiał podobny do kamienia. Powstaje z mieszanki betonowej składającej się z kruszywa (wypełniacza), cementu (spoiwa), wody oraz ewentualnych domieszek i dodatków. Po zmieszaniu tych składników, dobranych w odpowiednich proporcjach, zaczyn cementowy (cement związany z wodą) twardnieje w wyniku zachodzących w nim reakcji fizyczno-chemicznych, zespalając mieszankę w monolityczną całość. Beton jest materiałem kruchym, stąd przede wszystkim jest wykorzystywany do przenoszenia obciążenia ściskającego. Zależnie od rodzaju użytego kruszywa i technologii otrzymuje się beton o różnej objętości. Można rozróżnić następujące betony (Lichoła i in. 2010):

- lekkie, o gęstości objętościowej 800-2000 kg/m³
- zwykłe, o gęstości objętościowej 2000-2600 kg/m³
- ciężkie, o gęstości objętościowej większej niż 2600 kg/m³.

Klasę betonu zgodnie z normą PN-EN 206:2013 opisuje się, używając oznaczeń składających się z litery C i dwóch liczb, na przykład C25/30. Pierwsza liczba oznacza wytrzymałość charakterystyczną betonu na ściskanie określoną podczas badań na próbkach walcowych, a druga wytrzymałość gwarantowaną betonu określoną na próbkach sześciennych. Rozróżnia się następujące klasy wytrzymałości betonu: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105, C100/115.

W kompozycji jakim jest beton, najważniejszy składnik stanowi cement. Cement portlandzki to drobno zmielone spoiwo hydrauliczne, składające się z nie mniej niż 95% klinkieru i co najwyżej 5% gipsu. Cementy powszechnego użytku mają następujące klasy wytrzymałości: 32,5N, 32,5R, 42,5N, 42,5R, 52,5N, 52,5R (gdzie N oznacza cementy o normalnej wytrzymałości wczesnej, R – o wysokiej wytrzymałości wczesnej). Cementy portlandzkie CEM I 32,5N i 42,5N charakteryzują się umiarkowaną szybkością wydzielania ciepła hydratacji, a przyrost ich wytrzymałości w okresach wczesnych i późniejszych jest dość stabilny. Są to cementy przydatne do wykonywania prefabrykatów i konstrukcji monolitycznych, lecz nie masywnych. Cementy CEM I 32,5R, 42,5R, 52,5N, 52,5R o dużym cieple hydratacji i szybkim jego wydzielaniu można stosować również do konstrukcji prefabrykowanych, a także sprężonych. W typowych elementach wykonywanych monolitycznie zaleca się szczególnie do stosowania zimą. Cementy portlandzkie z dodatkami są klasyfikowane jako cementy CEM II; to cementy z dodatkami wapiennymi, krzemionkowymi i żużłowymi. Dzięki dodatkom cementy te mają zmniejszone ciepło hydratacji. Można wykonywać z nich betony monolityczne, a także prefabrykowane z obróbką termiczną. Wśród cementów CEM II cement krzemionkowy jest najbardziej przydatny do betonów wysokiej wytrzymałości. Cementy hutnicze CEM III zawierają granulowany

żużel wielkopiecowy. Cementy pucolanowe CEM IV w swoim składzie mają dodatek pucolanowy, zaś cementy wieloskładnikowe CEM V zawierają żużel wielkopiecowy oraz pucolany lub popiół lotny. Cementy CEM III, CEM IV, CEM V są przydatne do masywnych i hydrotechnicznych konstrukcji, ponieważ mają małe ciepło hydratacji, a przyrost ich wytrzymałości jest powolny lecz długo trwający. Ponadto cementy te charakteryzują się dobrą odpornością na korozję (Stefańczyk i in. 2010).

Kolejnym składnikiem betonu jest kruszywo stanowiące zbiór ziaren o wymiarach 0,063-63 mm. W skład betonu zwykłego wchodzi objętościowo 65-80% kruszywa, które znacząco decyduje o jego właściwościach. Kruszywo o uziarnieniu 2-63 mm jest nazywane grubym (żwirem lub grysem), a o uziarnieniu 0,063-2 mm lub 0,063-4 mm drobnym (piaskiem). Woda zarobowa będąca kolejnym składnikiem betonu to najczęściej woda zdatna do picia. Woda zarobowa pełni trzy funkcje: reaguje z cementem, kształtuje lepkość i ciekłość mieszanki, ułatwia formowanie i zagęszczanie oraz służy do pielęgnacji betonu, zmniejszając skurcz i wydłużając czas hydratacji betonu.

Projektowanie betonu to dobór składników i ustalenie ich proporcji w mieszance betonowej: spoiwa cementowego, wypełniacza (kruszywa) oraz wody. Projektowanie polega na dobraniu składników w takich proporcjach, aby był spełniony warunek dobrej urabialności mieszanki betonowej, a beton osiągnął właściwości techniczne zapewniające elementom lub obiektom bezpieczeństwo użytkowania i trwałość (Stefańczyk i in. 2010).

Konstrukcje betonowe to konstrukcje z betonu bez zbrojenia lub ze zbrojeniem mniejszym od przyjmowanego jako minimalne. Do tych konstrukcji można zaliczyć między innymi: fundamenty, podpory mostów, ściany oporowe masywne, zapory, nawierzchnie dróg. Konstrukcje żelbetowe składają się z betonu i ułożonych w nim prętów ze stali. Materiały te dzięki przyczepności współpracują ze sobą w konstrukcjach i stanowią monolityczną całość. Stal przejmuje naprężenia rozciągające, a beton naprężenia ściskające. Konstrukcje żelbetowe są stosowane powszechnie, we wszystkich rodzajach budownictwa takich jak: budynki mieszkalne, przemysłowe, rolnicze, zbiorniki, ściany oporowe, kominy.

Norma PN-B-03264:2002 podaje poszczególne rodzaje konstrukcji, dla których należy stosować beton klasy nie niższej niż podane w tabeli 27.

Do obiektów budownictwa wodnego, które pozostają w ciągłym lub okresowym kontakcie z wodą i zmiennymi warunkami atmosferycznymi, przeznaczony jest beton hydrotechniczny. Przy projektowaniu tego typu betonu należy uwzględnić między innymi jego trwałość, wytrzymałość, mrozoodporność, trwałość na ścieranie i odporność na związki chemiczne. Wśród konstrukcji hydrotechnicznych wyróżnia się:

- konstrukcje bardzo masywne o przekroju grubości powyżej 150 cm
- konstrukcje masywne o przekroju grubości 50 - 150 cm
- konstrukcje niemasywne o przekroju grubości poniżej 50 cm.

Tabela 27

Najniższe klasy betonu do poszczególnych rodzajów konstrukcji

Rodzaje konstrukcji	Najniższa klasa betonu
Konstrukcje betonowe	C12/15
Konstrukcje żelbetowe: Zbrojone stalą klas A-0, A-I, A-II, A-III Zbrojone stalą klasy-IIIIN	C12/15 C16/20
Konstrukcje sprężone: Kablobetonowe Strunobetonowe	C25/30 C30/37
Konstrukcje żelbetowe poddane obciążeniu wielokrotnie zmiennemu	C25/30

Dla konstrukcji wodnych bardzo masywnych, w większości monolitycznych lub zespolonych, wymagane jest stosowanie cementów o małym cieple twardnienia i w możliwie najmniejszej ilości. Akumulowane ciepło w betonie podczas reakcji cementu z wodą podnosi temperaturę i w ten sposób przyspiesza tę reakcję. Nadmierny przyrost temperatury, występujący głównie w części środkowej przekroju, wprowadza naprężenia wewnętrzne, których wartość jest tym wyższa, im większy i szybszy jest przyrost temperatury i im większa jest różnica temperatury w przekroju elementu. Brak swobody odkształceń masywnych elementów dodatkowo wzmagają wywołane naprężenia wewnętrzne, których wartość może nawet przekroczyć wytrzymałość na rozciąganie betonu znajdującego się w początkowym stadium twardnienia. Podobnie odkształcenia od skurczu, większe w warstwach zewnętrznych konstrukcji, są ograniczone przez sztywne przekroje konstrukcji wodnych, co w okresie późniejszego dojrzewania może spowodować pęcznienie i pęknięcie betonu. Warunek małego ciepła twardnienia cementu i wysokiej trwałości betonu ogranicza wybór cementu do portlandzkiego belitowego, hutniczego CEM III, pucolanowego CEM IV oraz wieloskładnikowego CEM V. Duże przekroje konstrukcji hydrotechnicznych, mały stopień zbrojenia, przewaga prętów zbrojenia o dużych średnicach i zalecana grubość otuliny nie mniejsza niż 5 cm oraz wymagana mała ilość cementu skłaniają do stosowania kruszywa o maksymalnej średnicy ziaren wynoszącej 63 mm. W warstwie wewnętrznej konstrukcji bardzo masywnych dopuszczalne jest nawet używanie kruszywa o średnicy 120 mm, a także układanie kamieni. Od kruszywa w konstrukcjach wodnych wymaga się dużej odporności mrozowej i małej przepuszczalności.

W betonach hydrotechnicznych bardzo ważne jest projektowanie ich pod kątem wodoszczelności (Stefańczyk i in. 2010). Pod pojęciem wodoszczelności rozumie się zdolność betonu do przeciwstawiania się przepływowi przez beton wody pod ciśnieniem. Stopnie wodoszczelności oznaczają się symbolem W i cyfrą, na przykład W8. Cyfra przypisana do litery W oznacza 10-krotną wielkość ciśnienia wody

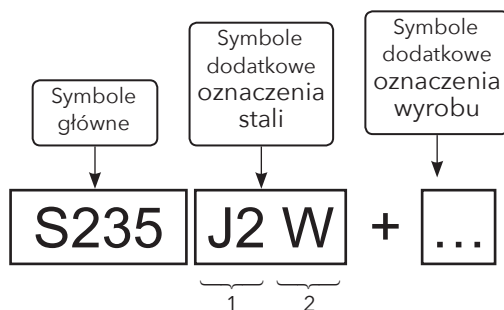
w MPa. Beton uznaje się za dostatecznie wodoszczelny w danej konstrukcji, jeżeli na zewnętrznej stronie badanej na przykład ściany nie pojawi się widoczne zawilgocenie, a tym bardziej przecieki wody. Wymagany stopień wodoszczelności zależy od wielkości parcia wody działającego na beton i od wymiarów poprzecznych elementu (Jamroz 2003). Zapewnienie wodoszczelności w obiektach masywnych najczęściej spełnia wymagania wytrzymałości, ponieważ większość obciążenia konstrukcji przenieszonego przez konstrukcje masywne pochodzi od ich masy (Stefańczyk i in. 2010).

Metale

Metale stosowane w technice, w tym również w budowlach i urządzeniach przeznaczonych do gospodarowania wodą w rolnictwie, można podzielić na dwie grupy:

- żelazo i stopy żelaza, w których głównym składnikiem jest żelazo uzyskiwane w procesach metalurgii żelaza, na przykład stal, staliwo, żeliwo
- metale i stopy metali nieżelaznych, których podstawowy składnik stanowią na przykład aluminium, miedź, cyna, uzyskiwane w procesach metalurgii metali nieżelaznych (Stefańczyk i in. 2010).

Stale używane w budownictwie nazywa się stalami konstrukcyjnymi. Ich właściwości zależą od składu chemicznego, struktury wewnętrznej, cyklu cieplnego działającego na stal w trakcie wytwarzania, a także sposobu jej przetwarzania. System oznaczania stali konstrukcyjnych według wskazań normy PN-EN 10027-1:2016 składa się z trzech pól. Na rycinie 63 pokazano budowę oznaczenia stali konstrukcyjnych.



Ryc. 63. Budowa oznaczenia stali konstrukcyjnych (Gizejowski i Ziółko 2010)

Pierwsze pole zawiera symbole główne, wskazujące na zastosowanie i podstawowe właściwości mechaniczne. Symbolem głównym jest litera S oznaczająca

stal konstrukcyjną lub litera G opisująca staliwo oraz liczba podająca minimalną granicę plastyczności, na przykład 235 N/mm². Drugie pole zawiera symbole dodatkowe oznaczenia stali podzielone na dwie grupy: 1 i 2. Grupa 1 symboli dodatkowych opisuje grupy jakościowe stali, które charakteryzuje odpowiedni poziom pracy łamania standardowych próbek w próbie udarności, w danej temperaturze, na przykład J2W oznacza pracę łamania próbki wynoszącą 27 J w temperaturze -20°C, grupa 2 zaś podaje dodatkowe cechy gatunku stali, na przykład przeznaczenie jako stal na rury (T), stal do ulepszania cieplnego (Q), stal na kształtowniki grodzicowe (P), stal odporną na korozję atmosferyczną (W). Trzecie pole w oznaczeniu stali zawiera symbole określające wymagania dodatkowe stawiane wyrobom gotowym. Ponieważ są to symbole opcjonalne i jeżeli występują w oznaczeniu, to należy je rozdzielić od poprzedzających symboli znakiem +. Należy do nich na przykład +Z15, co oznacza wyrób o podwyższonych własnościach plastycznych w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu: minimalne przewężenie = 15%.

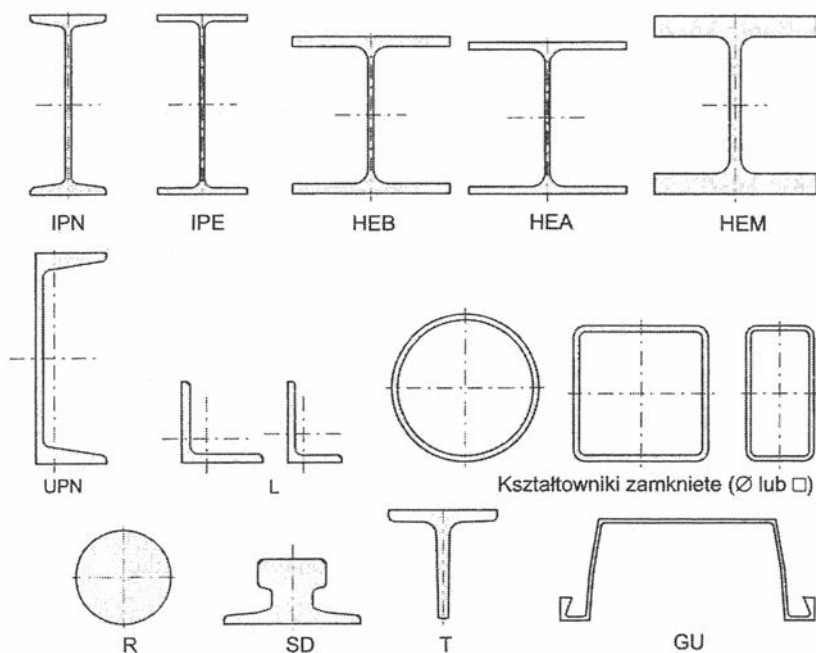
Norma PN-EN 1993-1-1:2006 podaje gatunki stali stosowane w budownictwie, z których wykonane są wyroby stalowe:

- Stale konstrukcyjne niestopowe według PN-EN 10025-2:2007. Stale takie mogą być dostarczane w gatunkach S235, S275, S355, S450. W gatunkach S235 i S275 rozróżnia się grupy jakościowe JR, JO i J2 w gatunku S355 grupy JR, JO, J2 oraz K2, natomiast w gatunku S450 grupę JO. Stale te przeznaczone są do budowy większości obiektów obciążonych w sposób statyczny
- Stale konstrukcyjne drobnoziarniste po znormalizowaniu lub walcowaniu normalizującym według PN-EN 10025-3:2007. Stale te mogą być dostarczane w gatunkach S275, S355, S420 oraz S460. Gatunki S275 i S355 to stale niestopowe, natomiast gatunki S420 i S460 to stale stopowe. Wszystkie gatunki mogą być dostarczane w grupie jakościowej N lub w grupie jakościowej NL. Stale te są przeznaczone do budowy mocno obciążonych konstrukcji pracujących w obniżonych temperaturach, na przykład mostów, zbiorników
- Stale konstrukcyjne drobnoziarniste spawalne po walcowaniu termomechanicznym według PN-EN 10025-4:2007. Stal konstrukcyjna drobnoziarnista po walcowaniu termomechanicznym jest dostarczana w gatunkach S275, S355, S420 i S460. Wszystkie gatunki mogą być w grupach jakościowych M lub ML. Wyroby walcowane termomechanicznie nie mogą podlegać późniejszemu kształtowaniu na gorąco
- Stale konstrukcyjne trudno rdzewiejące według PN-EN 10025-5:2007. Stale dostarczane są w gatunkach S235 oraz S355 i w grupach jakościowych JO, J2, K2. Gatunek S355 dostarczany jest w klasach W i WP, różniących się zawartością węgla i fosforu. Stale należące do tej grupy cechuje większa zawartość węgla, co utrudnia spawanie

- Stale o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie według PN-EN 10025- 6:2007. Stale takie dostarczane są w gatunkach S460, S500, S550, S620, S690, S890 oraz S960. Wszystkie gatunki mogą być w grupie jakościowej bez dodatkowego oznaczenia literowego, w grupie L lub w grupie jakościowej L1 Wszystkie stale są stalami uspokojonymi. Stale ulepszone cieplnie są uważane za dobrze spawalne
- Stale do kształtowników zamkniętych (rur) walcowanych na gorąco, według PN-EN 10210-1:2007. Kształtowniki zamknięte, tj. rury o przekroju okrągłym, kwadratowym, prostokątnym i eliptycznym walcowane na gorąco wykonywane są ze stali konstrukcyjnych niestopowych oraz stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych po normalizowaniu. Gatunki są zbliżone do stali opisywanych w PN-EN 10025-2 oraz PN-EN 10025-3. Jedynie w oznaczeniach umieszczona jest litera H określająca zastosowanie na rury
- Stale do kształtowników zamkniętych (rur) giętych na zimno, według PN-EN 10219-1:2007. Kształtowniki zamknięte gięte na zimno wykonywane są ze stali konstrukcyjnych niestopowych oraz stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych po normalizowaniu oraz ze stali drobnoziarnistych po walcowaniu termomechanicznym. Gatunki są zbliżone do stali opisywanych w PN-EN 10025-2, PN-EN 10025-3 oraz PN-EN 10025-4. Jedynie w oznaczeniach umieszczona jest litera H dotycząca zastosowania na rury. Kształtowniki zamknięte gięte na zimno mają grubość ścianki do 30 mm
- Stale nierdzewne, według PN-EN 10088-1:2007. Do tej grupy stali należą stale odporne na korozję, stale żaroodporne i żarowytrzymałe. Stale nierdzewne zawierają co najmniej 10,5% chromu (Cr) jako pierwiastka stopowego. Umożliwia to tworzenie się cienkiej i przezroczystej powierzchniowej pasywnej warstwy tlenków, która jest nieporowata, ściśle przylega do metalu i zabezpiecza stal przed agresją korozyjną. W wypadku uszkodzeń takich jak zarysowanie lub nacięcie warstwa taka wykazuje natychmiastową zdolność do samoregeneracji w zetknięciu z powietrzem. Jest również bardzo odporna na agresywne czynniki chemiczne. Większość stali nierdzewnych zawiera około 18% chromu i 10% niklu, a do niektórych gatunków dodaje się molibden. Stale nierdzewne są przydatne w realizacjach „estetycznych”, gdzie pierwszorzędne znaczenie ma wygląd zewnętrzny, oraz „konstrukcyjnych”, gdzie zasadniczą rolę odgrywają właściwości mechaniczne stali.

Stal na konstrukcje dobiera się pod względem gatunku (wytrzymałości), grupy jakościowej (np. odporność na kruche pękanie) oraz z uwagi na skład chemiczny (Giżejowski i Ziółko 2010). Stal w konstrukcjach budowlanych stosowana jest najczęściej w postaci wyrobów płaskich lub wyrobów długich walcowanych na gorąco. Spośród wyrobów płaskich najczęściej wykorzystuje się blachę w arkuszach o wymiarach szerokości 600 mm i większej oraz blachę uniwersalną o szerokości

powyżej 150 mm do 1250 mm. Grubość blach wynosi: 3-60 mm dla blach grubych, od 6 do 25 mm dla blach uniwersalnych oraz od 0,5 do 2,8 mm dla blach cienkich. Wśród wyrobów długich rozróżnia się pręty i kształtowniki. Szczegółowy asortyment produkowanych kształtowników z uwagi na ich bardzo dużą liczbę podany jest w katalogach producentów lub w tablicach do projektowania Boguckiego i Żybertowicza (2006). Produkowane są na przykład dwuteowniki o stopkach wąskich lub średniej szerokości (IPE, IPN), dwuteowniki szerokostopowe (HEA, HEB, HEM), ceowniki normalne (UPN) i równoległościenne, kątowniki równoramienne i nierównoramienne (L), teowniki (T), kształtowniki zamknięte (rury okrągłe, kwadratowe i prostokątne), szyny podsuwnicowe (SD), pręty okrągłe pełne (R) i grodzice (GU). Niezależnie od producenta oznaczenia tych wyrobów pozostają niezmiennie. Dwuteowniki stosowane są między innymi jako rygle dachowe, belki stropowe, słupy. Ceowniki można stosować między innymi jako płatwie, rygle ścienne, kątowniki i teowniki jako zakratowanie kratownic, tężniki, stelaże do ścian osłonowych. Przykłady różnych typów kształtowników walcowanych pokazano na rycinie 64.



Ryc. 64. Przykłady kształtowników walcowanych na gorąco (Giżejowski i Ziółko 2010)

Innym typem wyrobów stalowych są kształtowniki spawane (złożone z blach). Na rycinie 65 pokazano przykładowy asortyment niektórych typów blachownic z płaskim środkiem, zaś na rycinie 66 ze środkiem falistym. Do grupy

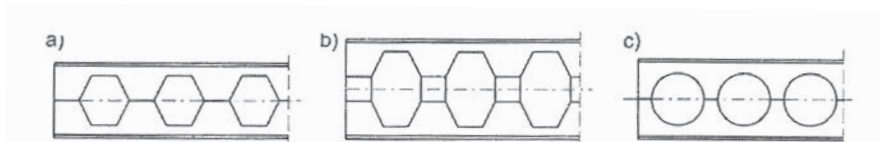
kształtowników spawanych zalicza się również kształtowniki ażurowe (ryc. 67). Blachownice spawane stosuje się jako pomosty pod znaczne obciążenia, dźwigary mostowe, podciąg i belki podsunnicowe. Belki ażurowe używane są jako belki stropowe o dużych rozpiętościach.

Schematyczny przekrój	Rodzaj	Typ	Zakres wymiarowy
	Homogeniczne	IKS	$h = 600-2000$ mm $b = 150-500$ mm $t_w = 7-14$ mm $t = 8-26$ mm
		HKS	$h = b = 300-550$ mm $t_w = 8-12$ mm $t = 14-30$ mm
		IPBS	$h = 300-700$ mm $b = 300$ mm $t_w = 11-15$ mm $t = 19-32$ mm
	Hybrydowe	IKSH	$h = 600-2000$ mm $b = 150-500$ mm $t_w = 7-14$ mm $t = 8-26$ mm

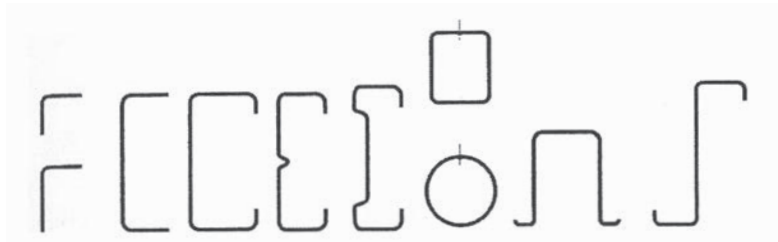
Ryc. 65. Asortyment blachownic ze średnikiem płaskim (Giżejowski i Ziółko 2010)

Schematyczny przekrój	Typ	Zakres wymiarowy
	WTA	$t_w = 2,0$ mm $h = 500, 625, 750, 1000$ mm $b = 200, 220, 250, 300, 350, 400, 430$ mm $t_f = 10, 12, 15, 20, 25$ i 30 mm (zależnie od szerokości pasa)
	WTB	$t_w = 2,5$ mm $h = 500, 625, 750, 1000, 1250, 1500$ mm $b = 200, 220, 250, 300, 350, 400, 430$ mm $t_f = 10, 12, 15, 20, 25$ i 30 mm (zależnie od szerokości pasa)
	WTC	$t_w = 3,0$ mm $h = 500, 625, 750, 1000, 1250, 1500$ mm $b = 200, 220, 250, 300, 350, 400, 430$ mm $t_f = 10, 12, 15, 20, 25$ i 30 mm (zależnie od szerokości pasa)

Ryc. 66. Asortyment blachownic ze średnikiem falistym (Giżejowski i Ziółko 2010)



Ryc. 67. Kształtowniki ażurowe: a – z otworami sześciobocznymi, b – z otworami ośmiobocznymi, c – z otworami okrągłymi (Giżejowski i Ziółko 2010)

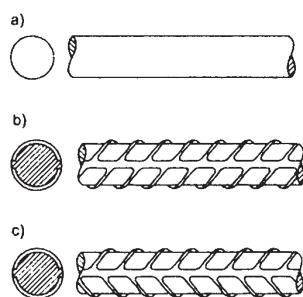


Ryc. 68. Przykłady przekrojów poprzecznych kształtowników profilowanych na zimno (Giżejowski i Ziółko 2010)

Kolejnym typem wyrobów stalowych są wyroby profilowane na zimno. Metodą gięcia na zimno można otrzymywać kształtowniki o różnych kształtach. Charakteryzują się one stałą grubością wszystkich ścianek i niewielkim wyokrągleniem naroży. Do najczęściej stosowanych należą kątowniki, ceowniki, zetowniki czy też profile zamknięte. Na rycinie 68 pokazano przykłady przekrojów poprzecznych kształtowników profilowanych na zimno (Giżejowski i Ziółko 2010).

Kształtowniki zimnogięte stosowane są jako stężenia hal (kątowniki, rury), płacie dachowe, rygle ścienne, mało obciążone konstrukcje wsporcze (ceowniki, zetowniki), elementy dźwigarów, schodów i balustrad (rury).

Konstrukcje żelbetowe zbroi się wiotkimi prętami stalowymi, najczęściej o przekroju okrągłym. W zależności od właściwości mechanicznych rozróżnia się klasy i odpowiadające im gatunki stali zbrojeniowej. Ze stali A-0 i A-I są wykonywane pręty gładkie, natomiast ze stali wyższej klasy, a tym samym wyższej wytrzymałości pręty żebrowane. Klasa A-II charakteryzuje się żebrowaniem spiralnym natomiast A-III żebrowaniem w jodełkę. Rycina 69 przedstawia typy prętów zbrojeniowych (Stefańczyk i in. 2010).



Ryc. 69. Pręty zbrojeniowe: a – gładki klasy A-0, A-I, b – żebrowany klasy A-II, c – żebrowany klasy A-III (Stefańczyk i in. 2010)

W tabeli 28 podano średnice prętów dostępnych na rynku oraz charakterystykę techniczną prętów zbrojeniowych okrągłych. Do zbrojenia konstrukcji żelbetowych używa się również drutów zbrojeniowych ciągniętych na zimno oraz siatek zgrzewanych z drutów zbrojeniowych o średnicach od 4 do 12 mm.

Tabela 28

Charakterystyka techniczna prętów zbrojeniowych okrągłych (Stefańczyk i in. 2010)

Średnica d (mm)	Przekrój (cm ²)	Masa 1 m (kg)
4,5	0,160	0,125
6	0,238	0,222
8	0,503	0,395
10	0,785	0,617
12	1,13	0,888
14	1,54	1,21
16	2,01	1,58
18	2,54	2,00
20	3,14	2,47
22	3,80	2,98
25	4,91	3,85
28	6,16	4,83
32	8,04	6,31
36	10,18	7,99
40	12,57	9,87

Drewno

Drewno jako materiał budowlany znane jest od dawna. Do najbardziej popularnych gatunków drewna stosowanego w budownictwie zaliczamy:

- sosnę pospolitą. Drewno sosny jest średnio ciężkie, ma dobre właściwości wytrzymałościowe i dzięki dużej zawartości żywicy jest stosunkowo trwałe, odporne na działanie wilgoci i dobrze zachowuje się pod wodą. Drewno sosnowe stosuje się na konstrukcje nośne (belki dachowe, stropy, ściany, słupy, ramy, kratownice)
- świerk. Drewno świerka jest lekkie, miękkie, ma średnie parametry wytrzymałościowe. Jest łupliwe i trudna jest jego obróbka mechaniczna. Drewno świerkowe to materiał trwały, gdy stosuje się je w miejscach suchych i przewiewnych lub gdy znajduje się stale pod wodą. Świerk ma zastosowania podobnie jak sosna, lecz jest gorszym od niej materiałem
- jodłę. Drewno jodły zawiera najmniej żywicy spośród wszystkich drzew iglastych. Jest miękkie, łupliwe, ma skłonności do pęknięcia i paczenia, ma średnie parametry wytrzymałościowe. Jest twardsze i trudniejsze w obróbce od świerka, ale przy tym bardzo trwałe w wodzie. Znajduje zastosowanie w budownictwie wodnym i mostowym

- modrzew. Drewno modrzewiowe jest ciężkie, żywiczne, twarde i łupliwe; trudne w obróbce i skłonne do pęknięcia. Stanowi najlepsze i najtwardsze drewno budowlane
- dąb. Drewno dębu szerokosłoiste jest twarde, trudne w obróbce, ma dużą wytrzymałość i odporność na ścieranie. Drewno wąskosłoiste jest miękkie i łatwe w obróbce. Drewno dębowe w wodzie twardnieje i z czasem czernieje, łatwo ulega pękaniu i paczeniu. Ma zastosowanie w budownictwie lądowym i wodnym. Wykonuje się z niego na przykład podkłady kolejowe, stolarkę budowlaną, posadzki, zamknięcia wodne, zastawki melioracyjne
- jesion. Drewno szerokosłoiste jest ciężkie, twarde, o dużej wytrzymałości i trudne w obróbce, natomiast drewno wąskosłoiste jest lżejsze, miękkie, o mniejszej wytrzymałości i łatwe w obróbce. Drewno jesionu jest elastyczne, łatwo się wygina. W warunkach suchych jest trwałe, a w zmiennych wilgotnych szybko ulega zniszczeniu. Stosuje się je na przykład do wyrobu stolarki budowlanej i boazerii
- buk. Drewno buka jest ciężkie, łupliwe, o dużej kurczliwości, skłonne do pęknięcia i paczenia. Trudno je konserwować, jest trwałe w warunkach suchych także wówczas, gdy stale znajduje się pod wodą. Pod wpływem zmiennych warunków atmosferycznych i wilgoci drewno staje się nietrwałe. Wykonuje się z niego na przykład stolarkę budowlaną, posadzki, schody i balustrady
- wiąz. Drewno wiązu jest ciężkie, trudno łupliwe, trudne w obróbce, trwałe na powietrzu i pod wodą, twarde i charakteryzuje się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi. Wykonuje się z niego na przykład stolarkę budowlaną, boazerię, posadzki
- olchę. Drewno olchy jest lekkie, miękkie i łupliwe, łatwo się obrabia i poleruje. Ma średnie właściwości mechaniczne. Trwałe, gdy znajduje się stale pod wodą, w zmiennych warunkach atmosferycznych jest mało odporne. Ma zastosowanie do produkcji sklejek, płyt wiórowych lub pilśniowych
- brzozę. Drewno jest średnio twarde i łupliwe, o dobrych właściwościach mechanicznych. Drewno brzozy stosowane jest do produkcji sklejek, oklein, narzędzi
- grab. Drewno grabu ma dużą gęstość, jest trudno łupliwe, bardzo twarde, charakteryzuje się korzystnymi właściwościami mechanicznymi, jest trudno ścieralne. Stosuje się je na deszczułki posadzkowe i jako drewno narzędziowe (Stefańczyk i in. 2010).

W budownictwie lądowym i wodnym używa się następujących materiałów drzewnych:

- drewno okrągłe. W zależności od średnicy i długości drewno dzieli się na następujące asortymenty: grubiznę, dłużyce, kłody, wyrzynki, żerdzie, szczapy, wałki. Drewno okrągłe ma zastosowanie do takich elementów jak: pale,

słupy, podpory, belki montażowe, stemple, słupy do rusztowań oraz jako surowiec tartaczny

- tarcicę, czyli materiał przetarty z drewna okrągłego. Sortymenty tarcicy obejmują między innymi deski, bale, łąty, krawędziaki i belki
- drewno klejone warstwowo. Jest materiałem uzyskanym w wyniku warstwowego sklejenia desek wzdłuż włókien. Można z niego formować belkowe elementy konstrukcyjne o pożądanym kształtach i wymiarach. Na elementy klejone używa się desek świerkowych lub sosnowych. W porównaniu z litym drewnem naturalnym drewno klejone ma większą wytrzymałość, większą odporność ogniową, mniejszą wrażliwość na zmiany wilgotności oraz większą odporność na korozję biologiczną
- materiały drewnopochodne. Są to materiały wytwarzane na bazie drewna przez sprasowanie rozdrobnionych jego części z dodatkiem środków wiążących. Do materiałów drewnopochodnych można zaliczyć sklejki, płyty stolarskie, płyty wiórowe, płyty pilśniowe i płyty z wełny drzewnej (Stefańczyk i in. 2010).

Wyroby drewniane narażone są na korozję biologiczną, która następuje w wyniku niszczącego działania takich czynników jak: grzyby, pleśnie, bakterii i owady. Ochrona przed korozją polega na impregnacji drewna środkami chemicznymi wykonywanej przez smarowanie, opryskiwanie, kąpiele oraz nasycanie. Ochrona drewna przed niekorzystnym działaniem wysokiej temperatury polega na pokryciu powierzchniowym preparatami pęczniejącymi. Trwałość drewna to odporność na działanie czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych powodujących jego destrukcję. Pod względem trwałości drewno dzieli się na następujące grupy:

- drewno bardzo trwałe (daglezja, dąb, cis, modrzew, cyprys, heban, eukaliptus, kasztan, orzech, wiąz)
- drewno średnio trwałe (świerk, sosna, jesion, jodła)
- drewno o małej trwałości (klon, brzoza, lipa, wierzba, topola, leszczyna, buk, jawor, osika, kasztanowiec).

Naturalna trwałość drewna zanurzonego stale w wodzie jest następująca:

- drewno bardzo trwałe, ponad 500 lat (modrzew, sosna, dąb, grab, kasztan, wiąz)
- drewno średnio trwałe, od 50 do 100 lat (świerk, jodła, buk, olcha)
- drewno o małej trwałości, poniżej 20 lat (brzoza, jawor, jesion, kasztan, lipa, topola, wierzba).

W odniesieniu do budownictwa wodno-melioracyjnego można stwierdzić, że trwałość drewna w ziemi jest różna, najlepiej konserwuje się drewno przykryte

slabo przepuszczalnymi gruntami torfowymi. Szybkiej destrukcji ulega drewno umieszczone w przewiewnych gruntach piaszczystych o dużych wahaniami temperatury i wilgoci. W wodzie morskiej trwałość drewna jest mniejsza niż w wodzie słodkiej. W wodzie słodkiej w drewnie zachodzą takie zjawiska jak: rozkład szary i rozkład hydrolityczny, mineralizacja i wypłukiwanie substancji niestrukturalnych. Woda wypełniająca komórki drewna utrzymuje ich kształt. Usunięcie wody prowadzi do zapadania się słabych ścianek komórkowych, a powtórne namoczenie drewna nie przywraca stanu pierwotnego. W wodzie morskiej dodatkowo dochodzi do przesylenia drewna związkami soli. Obecnie uważa się, że właściwości mechaniczne drewna zalegającego w wodzie morskiej do 100 lat są porównywalne z właściwościami drewna świeżego. Najbardziej niekorzystna sytuacja dla wytrzymałości elementów drewnianych to naprzemienne zanurzanie i wynurzenie z wody. Największą trwałość drewno uzyskuje w warunkach stałej temperatury i stałej wilgotności powietrza; wynosi ona od kilku lat (np. osika na wolnym powietrzu) do kilku tysięcy lat (np. dąb i modrzew do 2500 lat) (Stefańczyk i in. 2010).

Tworzywa sztuczne

Tworzywa sztuczne to materiały, których bazowym składnikiem są związki wielkocząsteczkowe zwane polimerami, otrzymywane w wyniku polireakcji związków małowcząsteczkowych, zwanych monomerami. Do podstawowych tworzyw sztucznych używanych w instalacjach budowlanych, budownictwie melioracyjnym i wodnym należą tworzywa termoplastyczne. Z tworzyw zbrojonych włóknem szklanym wykonuje się rury i przybory sanitarne (wannы, zlewy, obudowy), z tworzyw z wypełnieniem mineralnym (tzw. polimerobetonów) elementy sieci kanalizacyjnych (studzienki, osadniki, zbiorniki). Do wyrobów instalacyjnych najczęściej stosuje się następujące tworzywa termoplastyczne:

- poliwinylowe (polichlorek winylu PVC, chlorowany polichlorek winylu PVC-C)
- poliolefinowe (polietylen niskiej gęstości PE-LD, polietylen średniej gęstości PE-MD, polietylen wysokiej gęstości PE-HD, polietylen wysokiej gęstości sieciowany PE-X, polipropylen PP, homopolimer polipropylenu PP-H, kopolimer polipropylenu PP-Co, polibutylen PB).

Przyjmuje się, że trwałość rur i elementów przewodów z tworzyw sztucznych w temperaturze 20°C powinna wynosić 50 lat i należy się liczyć z tym, że wraz ze wzrostem temperatury ich trwałość maleje. Obecnie coraz częściej rury z tworzyw sztucznych są stosowane do instalacji i sieci. W tabeli 29 przedstawiono zalecany zakres stosowania podstawowych tworzyw sztucznych w instalacjach i sieciach (Stefańczyk i in. 2010).

Tabela 29

Zalecany zakres stosowania podstawowych tworzyw sztucznych w instalacjach i sieciach (Stefańczyk i in. 2010)

Przewody	Materiał					
	PVC	PVC-C	PB	PP	PE	PE-X
Przewody sieci kanalizacyjnych zewnętrznych bezciśnieniowych	+			+	+	
Przewody sieci kanalizacyjnych zewnętrznych ciśnieniowych	+				+	
Przewody sieci wodociągowych zewnętrznych	+			+	+	
Przewody sieci gazowych zewnętrznych					+	
Przewody sieci ciepłowniczych (rury przewodowe)			+			+
Przewody instalacji kanalizacji kanalizacyjnych wewnętrznych (włącznie z wewnętrznymi przewodami do odprowadzania wód deszczowych)	+	+		+	+	
Przewody zewnętrzne do odprowadzania wód deszczowych	+					
Przewody instalacji wodociągowych wody zimnej	+	+	+	+	+	+
Przewody instalacji wodociągowych wody ciepłej		+	+	+		+
Przewody instalacji centralnego ogrzewania		+	+	+		+
Przewody ogrzewania podłogowego			+	+		+

Materiałami do wykonywania na przykład drenaży są rurki drenarskie z otworami z tworzywa sztucznego. Powinny one odpowiadać wymaganiom normy PN-C-89221:2004, tj. być rurkami spiralnie karbowanymi, perforowanymi, wyprodukowanymi z polichlorku winylu i odpowiednich dodatków metodą wytłaczania. Rurki drenarskie powinny mieć powierzchnię bez pęcherzy, być obcięte prostopadle do osi w sposób umożliwiający dokładne ich łączenie. Szczeliny wlotowe (szparki podłużne) muszą znajdować się między karbami rurki i być wolne od grudek i resztek materiału oraz być tak wykonane, aby przepływająca przez nie woda nie napotykała oporów. Szczeliny powinny być równomiernie rozmieszczone na długości i obwodzie rurki. Wymagania dla rurek drenarskich z polichlorku winylu podano w tabeli 30.

Rurki drenarskie należy przechowywać na utwardzonym placu, w nienasłonecznionych miejscach. Zwoje rurek drenarskich należy układać płasko w stosy do wysokości czterech zwojów w temperaturze do 25°C, a powyżej 25°C do wysokości

Tabela 30

Wymagania dla rurek drenarskich karbowanych z nieplastyfikowanego polichlorku winylu

Właściwości i cechy	Średnica zewnętrzna nominalna (mm)				
	50	65	80	100	125
Średnica zewnętrzna (mm)	50,5	65,5	80,5	100,5	126,5
Dopuszczalna odchyłka średnicy zewnętrznej (mm)	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-2,0
Średnica wewnętrzna (mm)	43,9	58,0	71,5	91,0	115,0
Dopuszczalna odchyłka średnicy wewnętrznej (mm)	2	2	2	2	2,5
Długość rurki (m)	200	150	100	75	50
Szerokość szczelin wlotowych (mm)	0,6-1,0 lub 1,1-1,5				1,7-2
Ogólna powierzchnia szczelin wlotowych na dług. 1 m, (cm ²), co najmniej:					
Dla szerokości 0,6 - 1,0 mm	12	12	12	13	-
Dla szerokości 1,1 - 1,5 mm	16	32	32	33	-
Dla szerokości 1,7 - 2,0 mm	-	-	-	-	46
Liczba szczelin węższych na 1 m rurki (%)	20	20	20	20	20
Odporność na uderzenie wg PN-C-89221	dopuszcza się uszkodzenie najwyżej jednej próbki				
Odporność na zginanie wg PN-C-89221	próbka nie powinna załamywać się i wykazywać pęknięć				
Wytrzymałość na zerwanie wg PN-C-89221	próbka nie powinna ulec zerwaniu				
Zmiana wymiarów średnicy wg PN-C-89221 (%), nie więcej niż	12	12	12	12	12

dwóch zwojów. Rurki drenarskie zwykłe (typu Z, barwy naturalnego PVC) należy chronić przed działaniem sił mechanicznych w temperaturze poniżej 0°C, natomiast rurki o zwiększonej odporności na obniżoną temperaturę (typu O, barwy czarnej) należy chronić w temperaturze poniżej -10°C. Złączki, służące do połączenia rurek drenarskich karbowanych (przez ich skręcenie), powinny być wykonane z polietylenu wysokociśnieniowego. Wymagania dla złączki o średnicy zewnętrznej nominalnej 50 mm powinny odpowiadać normie BN-84/6366-10.

Złączki należy przechowywać w workach, pudłach kartonowych i innych pojemnikach, a przy składowaniu na odkrytych placach chronić przed oddziaływaniem promieni słonecznych. W magazynach zamkniętych temperatura otoczenia nie może przekraczać 40°C, a odległość składowania powinna być większa niż 1 m od czynnych urządzeń grzewczych. W przypadku składowania w workach zaleca się układać je w warstwach nie przekraczających wysokości 5 worków.

Przykładowe oznaczenie rury drenarskiej karbowanej według PN-C-89221:2004 o nominalnej średnicy wewnętrznej 50 mm, szerokości szczeliny 2,5 mm i nominalnej sztywności obwodowej 2 kN/m² – Rura PN-C-89221-W 50-2,5-SN 2.



Ryc. 70. Dren PVC w osłonie z geowłókniny i włókna kokosowego (Jermołowicz 2019)

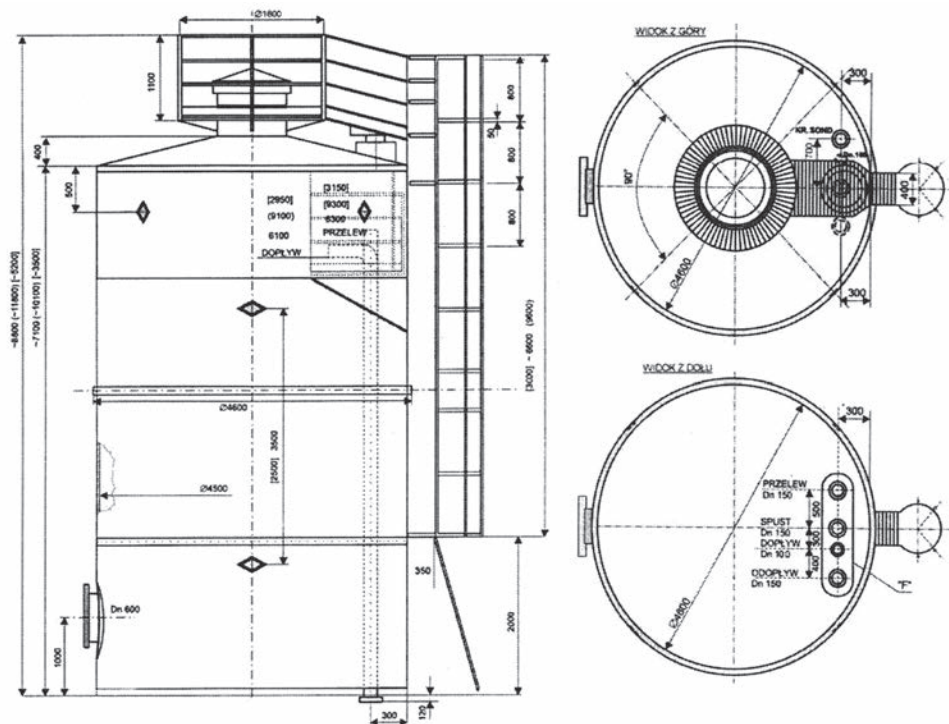
Geowłóknina powinna być materiałem odpornym na działanie wilgoci, środowiska gresywnego chemicznie i biologicznie oraz temperatury, bez rozdarć, dziur i przerw ciągłości z dobrą szepnością z gruntem. Na rycinie 70 pokazano przykład drenu PVC w osłonie z geowłókniny i włókna kokosowego.

Przykłady konstrukcji budowlanych służących gospodarowaniu wodą i zabezpieczeniu wód gruntowych przed negatywnym wpływem niewłaściwego składowania nieczystości rolniczych

Przykładami są typowe, prefabrykowane zbiorniki retencyjne na wodę zarówno na wodę pitną (zbiornik firmy Prowodrol), jak i służące do gromadzenia wody do podlewania upraw lub gromadzenia deszczówki (zbiornik firmy BIN). Na rycinie 71 pokazano zbiornik firmy Prowodrol, zaś na rycinie 72 zbiornik firmy BIN. Mają one różne pojemności, a tym samym wymiary zewnętrzne, stąd też szeroki jest zakres ich stosowania. Rolnicy, którzy chcą chronić swoje uprawy przed skutkami suszy, retencjonując wodę w zbiornikach, mogą ubiegać się o dotację na ich budowę.

Zbiorniki takie należy ustawić na płycie fundamentowej, której wykonanie leży po stronie kupującego. Przed położeniem fundamentu trzeba usunąć warstwę humusu oraz inne warstwy nienośne (np. nasyp niebudowlany w postaci gruzu, śmieci, części próchnicznych). Wykop pod fundament należy wykonać jako punktowy. Fundament wykonuje się bezpośrednio po wykonaniu wykopu, nie można bowiem dopuścić do uplastycznienia gruntu pod płytą fundamentową, co mogłoby się zdarzyć w przypadku opadów atmosferycznych. Na rycinie 73 pokazano rysunek wykonawczy fundamentu pod zbiornik pokazany na rycinie 71.

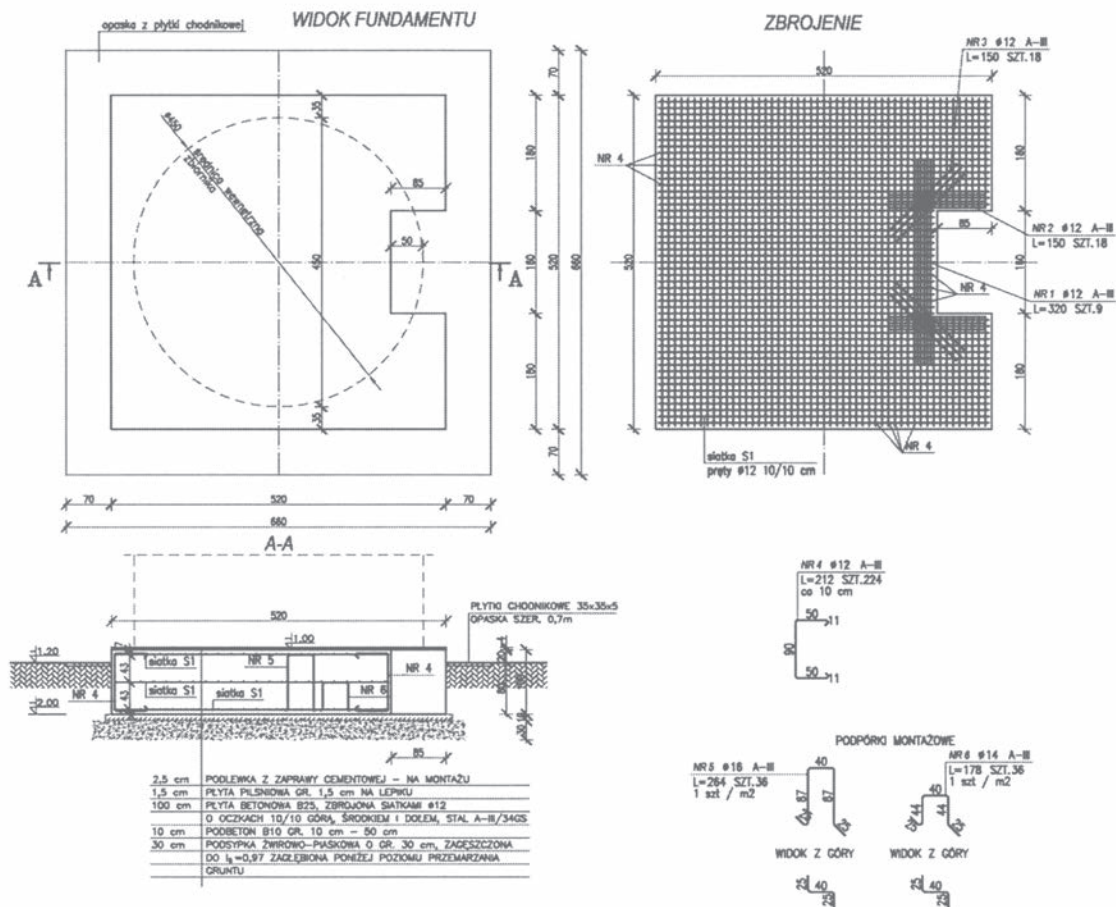
Kolejnym przykładem jest płyta na składowanie nieczystości (np. płyta obornikowa). Podobnie jak w przypadku zbiorników na wodę, rolnicy, którzy wykonują płytę obornikową lub zbiornik na gnojowicę, mogą ubiegać się o dotację na ich



Ryc. 71. Zbiornik na wodę pitną firmy Prowodrol (materiały katalogowe producenta)



Ryc. 72. Zbiornik retencyjny na wodę firmy BIN (strona internetowa producenta, www.bin.agro.pl)



Ryc. 73. Rysunek wykonawczy fundamentu pod zbiornik pokazany na rycinie 71

budowę. Płyty obornikowe są niezbędnym, wymaganym prawem wyposażeniem wszystkich gospodarstw rolnych prowadzących chów ściółkowy (ryc. 74). Podmioty, które gromadzą nawozy naturalne, powinny je przechowywać na nieprzepuszczalnych płytach zabezpieczonych w taki sposób, aby wycieki nie przedostawały się do gruntu.



Ryc. 74. Przykład zrealizowanej płyty obornikowej (fot. Michał Bartz, WODR Poznań)

Literatura

- BN-84/6366-10 Kształtki drenarskie typ 50 z polietylenu wysoko-ciśnieniowego.
- Bogucki W., Żybertowicz M. (2006): Tablice do projektowania konstrukcji metalowych. Arkady, Warszawa.
- EN 295-1:2013 Systemy rur kamionkowych w sieci drenażowej i kanalizacyjnej. Część 1: Wymagania dotyczące rur, kształtek i połączeń.
- Giżejowski M., Ziółko J. (2010): Budownictwo ogólne. Stalowe konstrukcje budynków. Projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń. T. 5. Arkady, Warszawa.
- Jamroży Z. (2003): Beton i jego wytrzymałość. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Jermolowicz P. (2019): Urządzenia wodno-melioracyjne i drenaże. Kompendium. Inżynier budownictwa, 7.
- PN-B-12030:1996 Wyroby budowlane ceramiczne i silikatowe. Pakowanie, przechowywanie i transport.
- PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-C-89221:2004 Rury z tworzyw sztucznych. Rury drenarskie karbowane z niezmiękczonego polichlorku winylu (PVC-U).
- PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-EN 10025-2:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
- PN-EN 10025-4:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 4: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych spawalnych po walcowaniu termomechanicznym.
- PN-EN 10025-3:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 3: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych spawalnych po normalizowaniu lub walcowaniu normalizującym.

- PN-EN 10025-5:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 5: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych trudnordzewiejących.
- PN-EN 10025- 6:2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 6: Warunki techniczne dostawy wyrobów płaskich o podwyższonej granicy plastyczności w stanie ulepszonym cieplnie.
- PN-EN 10210-1:2007 Kształowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnych niestopowych i drobnoziarnistych. Część 1: Warunki techniczne dostawy.
- PN-EN 10219-1:2007 Kształowniki zamknięte ze szwem wykonane na zimno ze stali konstrukcyjnych niestopowych i drobnoziarnistych. Część 1: Warunki techniczne dostawy.
- PN-EN 10088-1:2007 stale odporne na korozję. Część 1: Gatunki stali odporne na korozję.
- PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu, część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-B-12000:2012 Rurki drenarskie ceramiczne.
- PN-EN 206:2013 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 10027-1:2016 Systemy oznaczania stali. Część 1: Znaki stali.
- Stefańczyk B. i in. (2010): Budownictwo ogólne. T. 1. Materiały i wyroby budowlane. Arkady, Warszawa.
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 Prawo budowlane. Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414.
- Żeńczykowski W. (1992): Budownictwo ogólne. T. 1. Materiały i wyroby budowlane. Arkady, Warszawa.

Uwarunkowania prawne realizacji rolniczych obiektów budowlanych

Anna Szymczak-Graczyk

W celu określenia jakich procedur należy przestrzegać przy realizacji rolniczych obiektów budowlanych, w tym służących gospodarowaniu wodą, przytoczono stosowne przepisy zawarte w ustawie Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 roku z późniejszymi zmianami. Poniżej zamieszczono wyciąg z ustawy obejmujący tematyką obiekty i urządzenia rolnicze, w tym urządzenia do gospodarowania wodą.

Artykuł 29 wymienia obiekty, na które nie jest wymagane pozwolenie na budowę. Dotyczą one między innymi:

- wolno stojących budynków mieszkalnych jednorodzinnych, których obszar oddziaływania mieści się w całości na działce lub działkach, na których zostały zaprojektowane
- sieci: a) elektroenergetycznych obejmujących napięcie znamionowe nie wyższe niż 1 kV, b) wodociągowych, c) kanalizacyjnych, d) ciepłych, e) gazowych o ciśnieniu roboczym nie wyższym niż 0,5 MPa
- oczyszczalni ścieków o wydajności do 7,50 m³ na dobę
- zbiorników bezodpływowych na nieczystości ciekłe o pojemności do 10 m³
- obiektów budowlanych piętrzących wodę i upustowych o wysokości piętrzenia poniżej 1 m poza śródlądowymi drogami wodnymi i poza obszarem parków narodowych, rezerwatów przyrody i parków krajobrazowych oraz ich otulin



- wolno stojących: a) parterowych budynków gospodarczych, b) garaży, c) wiat – o powierzchni zabudowy do 35 m², przy czym łączna liczba tych obiektów na działce nie może przekraczać dwóch na każde 500 m² powierzchni działki;
- przydomowych: a) ganków, b) oranżerii (ogrodów zimowych) – o powierzchni zabudowy do 35 m², przy czym łączna liczba tych obiektów na działce nie może przekraczać dwóch na każde 500 m² powierzchni działki
- ogrodzeń o wysokości powyżej 2,20 m
- przydomowych tarasów naziemnych o powierzchni zabudowy powyżej 35 m²;
- przyłączy: a) elektroenergetycznych, b) wodociągowych, c) kanalizacyjnych, d) gazowych, e) ciepłych, f) telekomunikacyjnych
- obiektów gospodarczych związanych z produkcją rolną i uzupełniających zabudowę zagrodową w ramach istniejącej działki siedliskowej: a) płyt do składowania obornika, b) szczelnych zbiorników na gnojówkę lub gnojowicę, c) naziemnych silosów na materiały sypkie, o pojemności do 30 m³ i wysokości nie większej niż 7 m, d) silosów na kiszonkę.

Nie wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę oraz zgłoszenia budowa:

- obiektów gospodarczych związanych z produkcją rolną i uzupełniających zabudowę zagrodową w ramach istniejącej działki siedliskowej: a) parterowych budynków gospodarczych o powierzchni zabudowy do 35 m², przy rozpiętości konstrukcji nie większej niż 4,80 m, b) suszarni kontenerowych o powierzchni zabudowy do 21 m²
- wiat o powierzchni zabudowy do 50 m², usytuowanych na działce, na której znajduje się budynek mieszkalny lub przeznaczony pod budownictwo mieszkaniowe, przy czym łączna liczba tych wiat na działce nie może przekraczać dwóch na każde 1000 m² powierzchni działki
- wolno stojących altan o powierzchni zabudowy do 35 m², przy czym łączna liczba tych obiektów na działce nie może przekraczać dwóch na każde 500 m² powierzchni działki
- przepustów o przekroju wewnętrznym do 0,85 m²
- przydomowych basenów i oczek wodnych o powierzchni do 50 m²
- obiektów budowlanych będących urządzeniami melioracji wodnych
- opasek brzegowych oraz innych sztucznych, powierzchniowych lub liniowych umocnień brzegów rzek i potoków górskich oraz brzegu morskiego, brzegu morskich wód wewnętrznych, niestanowiących konstrukcji oporowych
- ogrodzeń o wysokości nieprzekraczającej 2,20 m
- obudowy ujęć wód podziemnych
- stawów i zbiorników wodnych o powierzchni nieprzekraczającej 1000 m² i głębokości nieprzekraczającej 3 m, położonych w całości na gruntach rolnych.

Nie wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę, natomiast wymaga zgłoszenia, wykonywanie robót budowlanych polegających na:

przebudowie:

- sieci: a) elektroenergetycznych obejmujących napięcie znamionowe nie wyższe niż 1 kV, b) wodociągowych, c) kanalizacyjnych, d) ciepłych, e) gazowych o ciśnieniu roboczym nie wyższym niż 0,5 MPa
- obiektów budowlanych piętrzących wodę i upustowych o wysokości piętrzenia poniżej 1 m poza śródlądowymi drogami wodnymi oraz poza obszarem parków narodowych, rezerwatów przyrody i parków krajobrazowych oraz ich otulin,

remoncie:

- budowli, których budowa wymaga uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę
- budynków, których budowa wymaga uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę (w zakresie przegród zewnętrznych albo elementów konstrukcyjnych).

Nie wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę oraz zgłoszenia wykonywanie robót budowlanych polegających na:

- utwardzaniu powierzchni gruntu na działkach budowlanych.

przebudowie:

- budynków, których budowa wymaga uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę, oraz budynków mieszkalnych jednorodzinnych, z wyłączeniem przebudowy przegród zewnętrznych oraz elementów konstrukcyjnych
- urządzeń budowlanych
- oczyszczalni ścieków o wydajności do 7,50 m³ na dobę
- zbiorników bezodpływowych na nieczystości ciekłe o pojemności do 10 m³
- wolno stojących: a) parterowych budynków gospodarczych, b) garaży, c) wiat – o powierzchni zabudowy do 35 m², przy czym łączna liczba tych obiektów na działce nie może przekraczać dwóch na każde 500 m² powierzchni działki
- przydomowych: a) ganków, b) oranżerii (ogrodów zimowych) – o powierzchni zabudowy do 35 m², przy czym łączna liczba tych obiektów na działce nie może przekraczać dwóch na każde 500 m² powierzchni działki
- ogrodzeń o wysokości powyżej 2,20 m
- przydomowych tarasów naziemnych o powierzchni zabudowy powyżej 35 m²
- przyłączy: a) elektroenergetycznych, b) wodociągowych, c) kanalizacyjnych, d) gazowych, e) ciepłych, f) telekomunikacyjnych
- obiektów gospodarczych związanych z produkcją rolną i uzupełniających zabudowę zagrodową w ramach istniejącej działki siedliskowej: a) płyt do składowania obornika, b) szczelnych zbiorników na gnojówkę lub gnojowi-

cę, c) naziemnych silosów na materiały sypkie, o pojemności do 30 m³ i wysokości nie większej niż 7 m, d) silosów na kiszonkę,

remontcie:

- obiektów budowlanych, z wyłączeniem remontu: budowli, których budowa wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę, budynków, których budowa wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę w zakresie przegród zewnętrznych albo elementów konstrukcyjnych
- urządzeń budowlanych.

Zgłoszenia budowy lub wykonywania innych robót budowlanych dokonuje się organowi administracji architektoniczno-budowlanej. W zgłoszeniu należy określić rodzaj, zakres, miejsce i sposób wykonywania robót budowlanych oraz termin ich rozpoczęcia. Do zgłoszenia należy dołączyć:

- oświadczenie o posiadaniu prawie do dysponowania nieruchomością na cele budowlane
- odpowiednie szkice lub rysunki – w zależności od potrzeb
- pozwolenia, uzgodnienia i opinie, których obowiązek dołączenia wynika z przepisów odrębnych ustaw, w szczególności decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach, zgodnie z art. 72 ust. 3 ustawy z dnia 3 października 2008 roku o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko, lub kopie tych pozwoleń, uzgodnień, opinii i innych dokumentów
- projekt zagospodarowania działki lub terenu wraz z opisem technicznym instalacji, wykonany przez projektanta posiadającego odpowiednie uprawnienia budowlane (w przypadku obiektów rolniczych wymienionych wcześniej nie dotyczy)
- projekt zagospodarowania działki lub terenu wykonany przez projektanta posiadającego wymagane uprawnienia budowlane, w przypadku budowy (w przypadku obiektów rolniczych wymienionych wcześniej nie dotyczy).

Zgłoszenia budowy lub wykonywania innych robót budowlanych dokonuje się:

- w postaci papierowej
- w formie dokumentu elektronicznego za pośrednictwem adresu elektronicznego.

Formularz zgłoszenia w formie dokumentu elektronicznego Główny Inspektor Nadzoru Budowlanego udostępnia pod adresem elektronicznym określonym w Biuletynie Informacji Publicznej na stronie podmiotowej obsługującego go urzędu.

Zgłoszenia należy dokonać przed terminem zamierzonego rozpoczęcia robót budowlanych. Organ administracji architektoniczno-budowlanej, w terminie 21 dni od dnia doręczenia zgłoszenia, może w drodze decyzji wnieść sprzeciw. Do wykonywania robót budowlanych można przystąpić, jeżeli organ administracji architektoniczno-budowlanej nie wniósł sprzeciwu w tym terminie. Organ administracji architektoniczno-budowlanej może z urzędu, przed upływem terminu, wydać zaświadczenie o braku podstaw do wniesienia sprzeciwu. W przypadku nierozpoczęcia wykonywania robót budowlanych przed upływem 3 lat od określonego w zgłoszeniu terminu ich rozpoczęcia, rozpoczęcie tych robót może nastąpić po dokonaniu ponownego zgłoszenia. W razie konieczności uzupełnienia zgłoszenia organ administracji architektoniczno-budowlanej nakłada na zgłaszającego, w drodze postanowienia, obowiązek uzupełnienia w określonym terminie brakujących dokumentów, a w przypadku ich nieuzupełnienia wnosi sprzeciw w drodze decyzji. Nałożenie obowiązku uzupełnienia przerywa bieg terminu. Organ administracji architektoniczno-budowlanej może wnieść sprzeciw do zgłoszenia w terminie 14 dni od dnia doręczenia zgłoszenia wyłącznie w przypadku, gdy wykonanie robót budowlanych lub obiektu objętego zgłoszeniem może spowodować zagrożenie bezpieczeństwa ludzi lub mienia. Za dzień wniesienia sprzeciwu uznaje się dzień nadania decyzji w placówce pocztowej operatora pocztowego albo, w przypadku doręczenia na adres do doręczeń elektronicznych, dzień wystawienia dowodu wysłania, albo w przypadku skorzystania z publicznej usługi hybrydowej dzień odebrania dokumentu elektronicznego przez operatora wyznaczonego.

Rozbiórkę można rozpocząć po uzyskaniu decyzji o pozwoleniu na rozbiórkę. Decyzję o pozwoleniu na rozbiórkę wydaje na wniosek organ administracji architektoniczno-budowlanej. Do wniosku o pozwolenie na rozbiórkę dołącza się:

- zgodę właściciela obiektu budowlanego lub jej kopię
- szkic usytuowania obiektu budowlanego
- opis zakresu i sposobu prowadzenia robót rozbiórkowych
- opis sposobu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i mienia
- pozwolenia, uzgodnienia, opinie i inne dokumenty, których obowiązek dołączenia wynika z przepisów odrębnych ustaw, lub kopie tych pozwoleń, uzgodnień, opinii i innych dokumentów – nie dotyczy to uzgodnień i opinii uzyskiwanych w ramach oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko albo oceny oddziaływania przedsięwzięcia na obszar Natura 2000
- projekt rozbiórki lub jego kopię – w zależności od potrzeb.

Wniosek o pozwolenie na rozbiórkę składa się w postaci papierowej albo formie dokumentu elektronicznego za pośrednictwem adresu elektronicznego.

Nie wymaga decyzji o pozwoleniu na rozbiórkę, ale wymaga zgłoszenia rozbiórka budynków i budowli o wysokości poniżej 8 m, jeżeli ich odległość od granicy

działki jest nie mniejsza niż połowa wysokości. Nie wymaga decyzji o pozwoleniu na rozbiórkę oraz zgłoszenia rozbiórka obiektów i urządzeń budowlanych, na budowę których nie jest wymagane pozwolenie na budowę. Zgłoszenia rozbiórki dokonuje się w postaci papierowej albo formie dokumentu elektronicznego za pośrednictwem adresu elektronicznego.

Pozwolenie na budowę dotyczy całego zamierzenia budowlanego. W przypadku zamierzenia budowlanego obejmującego więcej niż jeden obiekt pozwolenie na budowę może, na wniosek inwestora, dotyczyć wybranych obiektów lub zespołu obiektów, mogących samodzielnie funkcjonować zgodnie z przeznaczeniem. Jeżeli pozwolenie na budowę dotyczy wybranych obiektów lub zespołu obiektów inwestor jest obowiązany przedstawić projekt zagospodarowania działki lub terenu, o którym mowa dla całego zamierzenia budowlanego. Do wniosku o pozwolenie na budowę należy dołączyć:

- projekt zagospodarowania działki lub terenu oraz projekt architektoniczno-budowlany w postaci: a) papierowej – w 3 egzemplarzach albo b) elektronicznej wraz z opiniami, uzgodnieniami, pozwoleniami i innymi dokumentami, których obowiązek dołączenia wynika z przepisów odrębnych ustaw, lub kopiami tych opinii, uzgodnień, pozwoleń i innych dokumentów
- oświadczenie o posiadaniu prawa do dysponowania nieruchomością na cele budowlane
- decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, jeżeli jest ona wymagana zgodnie z przepisami o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym.

Wniosek o pozwolenie na budowę składa się w postaci papierowej albo formie dokumentu elektronicznego za pośrednictwem adresu elektronicznego.

Projekt budowlany powinien spełniać wymagania określone w decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, jeżeli jest ona wymagana zgodnie z przepisami o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym.

Projekt budowlany zawiera:

- projekt zagospodarowania działki lub terenu sporządzony na aktualnej mapie do celów projektowych lub jej kopii (poświadczonej za zgodność z oryginałem przez projektanta), obejmujący: a) określenie granic działki lub terenu, b) usytuowanie, obrys i układy istniejących i projektowanych obiektów budowlanych, w tym sieci uzbrojenia terenu oraz urządzeń budowlanych sytuowanych poza obiektem budowlanym, c) sposób odprowadzania lub oczyszczania ścieków, d) układ komunikacyjny i układ zieleni, ze wskaza-

- niem charakterystycznych elementów, wymiarów, rzędnych i wzajemnych odległości obiektów, w nawiązaniu do istniejącej i projektowanej zabudowy terenów sąsiednich, e) informację o obszarze oddziaływania obiektu
- projekt architektoniczno-budowlany obejmujący: a) układ przestrzenny oraz formę architektoniczną istniejących i projektowanych obiektów budowlanych, b) zamierzony sposób użytkowania obiektów budowlanych, w tym liczbę projektowanych do wydzielenia lokali, z wyszczególnieniem lokali mieszkalnych, c) charakterystyczne parametry techniczne obiektów budowlanych, d) opinię geotechniczną oraz informację o sposobie posadowienia obiektu budowlanego, e) projektowane rozwiązania materiałowe i techniczne mające wpływ na otoczenie, w tym środowisko, f) charakterystykę ekologiczną, g) informację o wyposażeniu technicznym budynku, w tym projektowanym źródle lub źródłach ciepła do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, h) opis dostępności dla osób niepełnosprawnych, i) informację o minimalnym udziale lokali mieszkalnych w przypadku budynków mieszkalnych wielorodzinnych, j) postanowienie udzielające zgody na odstąpienie, jeżeli zostało wydane
 - projekt techniczny obejmujący: a) projektowane rozwiązania konstrukcyjne obiektu wraz z wynikami obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, b) charakterystykę energetyczną – w przypadku budynków, c) projektowane niezbędne rozwiązania techniczne oraz materiałowe, d) w zależności od potrzeb dokumentację geologiczno-inżynierską lub geotechniczne warunki posadowienia obiektów budowlanych, e) inne opracowania projektowe

Projekt techniczny musi być zgodny z projektem zagospodarowania działki lub terenu oraz projektem architektoniczno-budowlanym. Do projektu zagospodarowania działki lub terenu, projektu architektoniczno-budowlanego oraz projektu technicznego dołącza się:

- kopię decyzji o nadaniu projektantowi lub projektantowi sprawdzającemu, jeżeli jest wymagany, uprawnień budowlanych w odpowiedniej specjalności potwierdzoną za zgodność z oryginałem przez sporządzającego projekt
- kopię zaświadczenia, o wykonywaniu samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie, aktualnego na dzień: a) opracowania projektu – w przypadku projektanta, b) sprawdzenia projektu – w przypadku projektanta sprawdzającego
- oświadczenie projektanta i projektanta sprawdzającego o sporządzeniu projektu zgodnie z obowiązującymi przepisami i zasadami wiedzy technicznej.

Projekt zagospodarowania działki lub terenu oraz projekt architektoniczno-budowlany podlegają zatwierdzeniu w decyzji o pozwoleniu na budowę. Inwestor,

spełniający warunki do uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę, może żądać wydania odrębnej decyzji o zatwierdzeniu projektu zagospodarowania działki lub terenu lub projektu architektoniczno-budowlanego poprzedzającej wydanie decyzji o pozwoleniu na budowę. Decyzja jest ważna przez czas w niej oznaczony, jednak nie dłużej niż rok.

Decyzja o pozwoleniu na budowę wygasa, jeżeli budowa nie została rozpoczęta przed upływem 3 lat od dnia, w którym decyzja ta stała się ostateczna lub budowa została przerwana na czas dłuższy niż 3 lata.

12.

Wykorzystanie dronów w rolnictwie precyzyjnym oraz we wspomaganiu decyzji nawodnieniowych

Zbigniew Walczak



W ostatnich latach obserwuje się bardzo intensywny rozwój branży związanej z bezzałogowymi statkami powietrznymi (BSP) zarówno w zakresie rozwoju technologicznego sprzętu, ale także z możliwymi aplikacjami dronów w różnych dziedzinach życia codziennego.

Początek intensywnego rozwoju dronów i systemów bezzałogowych przypada na wczesne lata XX wieku (Merkisz i Nykaza 2016), wówczas głównie wykorzystywanych do celów militarnych (Chojnacki i Pasek 2017).

Pierwszych bezzałogowych statków powietrznych szukać jednak należy już w czasach starożytnych, wtedy również ich zastosowanie miało charakter militarny. Natomiast jedna z pierwszych, dobrze udokumentowanych prób wykorzystania dronów odbyła się podczas ataku armii austriackiej na Wenecję w 1849 roku. Skorzystano wówczas z pomysłu młodego porucznika, Franza von Uchatiusa, który zaproponował wypuszczenie nad Wenecję balonów wypełnionych ładunkami wybuchowymi. Pierwsza próba była nieudana, ponieważ systemy te nie były sterowane, lecz zależały od warunków atmosferycznych, w szczególności od kierunku wiatru (Chojnacki i Pasek 2017). Drugą próbę podjęto w sierpniu tego samego roku. Wówczas wypuszczono około 200 balonów. W ostatecznym rachunku niewielka część z nich dosięgnęła celów, a niektóre raziły nawet w wojska austriackie.

Okres pierwszej i drugiej wojny światowej to również bardzo intensywny rozwój systemów bezzałogowych, począwszy od zdalnie sterowanych samolotów, których zadaniem było niszczenie niemieckich Zeppelinów czy zdalnie sterowanych



latających fortec (BQ-7 na bazie Boeing B-17 Flying Fortress) wykorzystywanych w charakterze zdalnie sterowanych latających bomb (Miller 2017). Jednym z pierwszych masowo produkowanych dronów był Radioplane OQ-2 z 1939 roku; wyprodukowano ich ponad 9400 sztuk i wykorzystywano w czasie II wojny światowej.

W okresie zimnej wojny nastąpiło znaczące przyspieszenie prac nad bezzałogowymi statkami powietrznymi. Rozwój kamer termowizyjnych, systemów nawigacji oraz elektroniki spowodował, że pojawiły się nowe możliwości wykorzystania takich systemów bezzałogowych, ale także zmniejszyła się wielkość samych BSP.

Bardzo duże znaczenie w rozwoju technologii związanych z bezzałogowymi systemami powietrznymi miała wojna w Zatoce Perskiej w 1991 roku. Wówczas amerykańskie siły zbrojne powszechnie zaczęły wykorzystywać drony w misjach wojсковych (Smaga 2017).

Obecnie drony, dzięki postępowi technologicznemu, wykorzystywane są w bardzo szerokim zakresie, będąc nieocenionym wsparciem dla człowieka w różnych dziedzinach jego działalności. Do najczęściej wymienianych należy używanie dronów do zastosowań typowo sportowych czy rekreacyjnych, ale także na potrzeby między innymi różnorodnej dokumentacji fotograficznej (Ulukavak i in. 2019), walki ze smogiem (Berner i Chojnacki 2017b, Wang 2019), inspekcji obiektów inżynierskich (Chen i in. 2019, Hallermann i Morgenthal 2013, Morgenthal i Hallermann 2014), rolnictwa precyzyjnego (Christiansen i in. 2017b, Ju i Son 2018), tworzenia różnego rodzaju map i modeli numerycznych (Christiansen i in. 2017a, Nex i Remondino 2014, Zongjian 2008), monitoringu termowizyjnego obiektów (Krawczyk i in. 2015, Noszczyk i Nowak 2017, Zefri i in. 2018) oraz zwierząt (Pagacz i Witczuk 2016). Drony znalazły także zastosowanie w leśnictwie (Chorażewicz i Filipiak 2018, Zmarz 2009) i w ratownictwie (Berner i Chojnacki 2017a, Liu i Szirányi 2021, Silvagni i in. 2017). Wykorzystywane są również przez służby mundurowe, na przykład przez policję. Zakres ten ciągle się rozszerza, pojawiają się nowe zastosowania dla BSP.

Zgodnie z Białą Księgą Rynku Bezzałogowych Statków Powietrznych¹, wydaną w lutym 2019 roku przez Ministerstwo Infrastruktury, ocenia się, że wartość globalnego rynku dronów cywilnych w latach 2017-2026 to około 73,5 mld dolarów, przy czym wartość polskiego rynku dronów cywilnych szacuje się na 3,26 mld złotych. Szacuje się również, że wpływ dronów na gospodarkę do roku 2026, według umiarkowanego scenariusza przedstawionego w Białej Księdze, to około 576 mld złotych. W związku z tym zarówno w Unii Europejskiej, jak i w Polsce trwają intensywne prace związane z legislacją oraz budową systemów zarządzania przestrzenią powietrzną (U-SPACE) z uwzględnieniem dronów i systemów bezzałogowych statków powietrznych (BSP).

¹ <https://www.gov.pl/attachment/bba34b69-36c1-48d6-9309-71852a7b1457> (dostęp 2021. 08.09).

Zagadnienia prawne związane z operacjami BSP

Od 1 stycznia 2021 roku nastąpiły istotne zmiany w ustawodawstwie związanym z wykonywaniem lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi. Wynika to z wdrożenia przepisów unijnych i rozporządzenia wykonawczego Unii Europejskiej 2019/947. Do najważniejszych zmian wprowadzonych w rozporządzeniach należą: wprowadzenie nowego podziału operacji bezzałogowych statków powietrznych oraz nowego podziału bezzałogowych statków powietrznych, uszczegółowienie przepisów oraz wprowadzenie przepisów przejściowych dla dronów. Powstał także obowiązek rejestracji dronów oraz operatorów systemów powietrznych oraz ujednolicono system certyfikacji uprawnień do wykonywania lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi.

Zniknął dotychczasowy podział na loty dronów w celach rekreacyjnych i sportowych oraz w celach innych niż rekreacyjne i sportowe. Nie ma zatem rozgraniczenia między lotami tak zwanymi „komercyjnymi” a pozostałymi. Dodatkowo w polskim prawie operacje z użyciem BSP dzieli się na operacje w zasięgu wzroku (VLOS), poza zasięgiem wzroku (BVLOS) oraz operacje jedynie z użyciem podglądu z kamery pokładowej FPV. Prawo unijne nie rezygnuje z takiego podziału, ale główny podział operacji z użyciem dronów jest nowy i bazuje raczej na kategoriach lotów związanych przede wszystkim z ryzykiem, jakie niosą ze sobą loty BSP dla osób znajdujących się na ziemi i innych użytkowników przestrzeni powietrznej.

Zgodnie z nowymi założeniami przepisów Unii Europejskiej wyróżniamy trzy podstawowe kategorie lotów:

- kategoria otwarta, niosąca za sobą niskie ryzyko, nie wymaga zgody Urzędu Lotnictwa Cywilnego (ULC). W kategorii tej można użytkować BSP o masie startowej do 25 kg, wykonywać operacje tylko w zasięgu wzroku (VLOS), a dron może znajdować się maksymalnie 120 m od najbliższego punktu powierzchni ziemi. Kategorię otwartą dodatkowo dzieli się na 3 podkategorie, tj. A1, A2 oraz A3 oparte na ograniczeniach operacyjnych i wymogach, jakim podlegają piloci bezzałogowych statków powietrznych oraz drony. W przypadku kategorii otwartej bezzałogowy statek powietrzny nie może przewozić materiałów niebezpiecznych ani zrzucić żadnych materiałów (Dz.U. L 152 z 11.6.2019, s. 45, art. 4 p.1f)²
- kategoria szczególna, w której operacje z wykorzystaniem dronów niosą za sobą średnie ryzyko w zakresie bezpieczeństwa, poszanowania prywatności, środowiska, ochrony przed hałasem lub której parametry lotu wychodzą poza kategorię otwartą. Wymagana jest zgoda lub poinformowanie Urzędu

² Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych.

Lotnictwa Cywilnego o operacji. Warunki lotów są określane na podstawie analizy ryzyka

- kategoria certyfikowana, niosąca za sobą wysokie ryzyko, musi być stosowany certyfikowany sprzęt oraz certyfikowany personel.

W przypadku użytkowania dronów o masie powyżej 250 g lub takich, które w razie uderzenia mogą przekazać człowiekowi energię powyżej 80 J, wymagana jest również rejestracja operatorów Systemów Bezzałogowych Statków Powietrznych (SBSP) w Urzędzie Lotnictwa Cywilnego³. Jeśli dron został wyposażony w czujniki zdolne do zbierania danych osobowych (np. kamery), wymagana jest rejestracja operatorów SBSP, także dla dronów o masie poniżej 250 g. Jeśli operacje dronem będą wykonywane w kategorii szczególnej, również operatorzy SBSP podlegają obowiązkowej rejestracji w ULC, bez względu na masę drona.

W kategorii otwartej wprowadzono trzy podkategorie: A1, A2, A3, w zależności od nałożonych ograniczeń operacyjnych i wymogów, jakim podlegają piloci bezzałogowych statków powietrznych i same drony. Podkategoria A1 oraz A2 dotyczy dronów niewielkich, o masie poniżej 4 kg (w przypadku kategorii A1 do 250 g lub do 900 g w klasie BSP C1), natomiast A3 dotyczy operacji dronami o masie całkowitej wraz z ładunkiem do 25 kg.

W przypadku podkategorii A3 ustawodawca wprowadził następujące ograniczenia wykonywania operacji: nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia osób, minimalna odległość pozioma od osób i zabudowy to 150 m, należy ukończyć szkolenie on-line i zaliczyć test on-line z wiedzy teoretycznej³, maksymalna odległość od powierzchni ziemi wynosi 120 m, loty tylko w zasięgu wzroku (VLOS), brak możliwości przenoszenia materiałów niebezpiecznych oraz brak możliwości zrzucania jakichkolwiek materiałów z drona. Dodatkowo, jeśli operacje wykonywane są za pomocą BSP klasy C2, a więc operacje w kategorii A2, należy uzyskać Certyfikat Kompetencji Pilota BSP (szkolenie on-line, samokształcenie praktyczne oraz zdanie egzaminu teoretycznego pod nadzorem, tab. 31). Z tabeli wynika, że na przykład dronami klasy C2 można latać w podkategorii A2 oraz A3.

Do poszczególnych kategorii lotów wprowadzono wymagane kompetencje dla pilotów BSP, zestawione w tabeli 32.

Wprowadzone zostały również nowe klasy bezzałogowych statków powietrznych od C0 do C4⁴. C0 to drony o masie poniżej 250 g i maksymalnej prędkości

³ Dokonać rejestracji oraz ukończyć wymagane szkolenie on-line można tutaj: <https://drony.ulc.gov.pl/register> (dostęp 2021-08-09).

⁴ Szczegóły klasyfikacji oraz wymogi dotyczące BSP dla poszczególnych klas można znaleźć w załączniku do Rozporządzenia delegowanego Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj (dostęp 2021-08-09).

Tabela 31

Wymagania dotyczące poszczególnych podkategorii dla kategorii otwartej

Podkategoria	Klasa BSP	Opis	MTOM*	Kompetencje pilota	Wymagania techniczne	Rejestracja BSP	Rejestracja operatora
A1	C0	loty nad ludźmi, nie nad zgrupowaniami	< 250g	-	V < 19 m/s maksymalnie 120 m nad ziemią	tak, jeśli ma czujnik zbierania danych osobowych (np. kamera)	nie
	C1	jedynie niezamierzone loty na ludźmi, nie nad zgrupowaniami	< 900 g lub < 80 J	szkolenie i test on-line	V < 19 m/s maksymalnie 120 m nad ziemią	tak	tak
A2	C2	loty minimum 30 m od ludzi	< 4 kg	szkolenie i test on-line, Certyfikat Kompetencji Pilota BSP	maksymalnie 120 m nad ziemią	tak	tak
	C3	loty z dala od ludzi, minimum 150 m od terenów zabudowanych	< 25 kg, maksymalny wymiar do 3 m	szkolenie i test on-line	maksymalnie 120 m nad ziemią	tak	tak
A3	C4		< 25 kg, brak trybów automatycznych**	szkolenie i test on-line	maksymalnie 120 m nad ziemią	tak	tak

* MTOM – maksymalna masa startowa (ang. *Maximum Take-off Mass*) oznacza maksymalną, określoną przez producenta lub konstruktora, masę BSP obejmującą obciążenie użytkowe, baterie, przy której można eksploatować BSP.

** Nie dotyczy stabilizacji lotu, która nie może bezpośrednio wpływać na trajektorię.

Tabela 32

Wymagane kompetencje dla pilotów BSP

Kategoria otwarta	A1 i A3	Szkolenie i test online
		A2
Kategoria szczegółna	–	przejęcie szkolenia oraz zdanie egzaminu prowadzonego przez podmiot szkolący
Kategoria certyfikowana	–	certyfikowany sprzęt i personel

Wykaz podmiotów szkolących dostępny jest na stronach ULC*, test on-line oraz szkolenie dostępne na stronach ULC.

* Wykaz podmiotów szkolących: <https://ulc.gov.pl/pl/drony/prowadzenie-szkolen/5358-wykaz-podmiotow-wyznaczonych> (dostęp 2021-08-09).

lotu poniżej 19 m/s z ograniczeniem wysokości lotu do 120 m. Te drony mogą latać we wszystkich podkategoriach kategorii otwartej.

Kategoria C1 to drony o masie poniżej 900 g lub takie, które podczas zderzenia z człowiekiem generują energię kinetyczną poniżej 82 J, o maksymalnej prędkości lotu poniżej 19 m/s, z podobnym ograniczeniem co do wysokości lotu do 120 m. Drony kategorii klasy C1 mogą latać we wszystkich kategoriach klasy otwartej.

Klasa C2 obejmuje drony o masie poniżej 4 kg, które mają tryb wolnego lotu oraz ograniczoną prędkość do mniej niż 3 m/s w poziomie z ograniczeniem wysokości lotu maksymalnie do 120 m. Drony te mogą latać w podkategoriach A2 oraz A3 z dala od ludzi w kategorii otwartej. Tutaj można klasyfikować mniejsze drony wykorzystywane na przykład do inspekcji upraw.

Drony kategorii C3 to drony o masie do 25 kg, których maksymalny, typowy wymiar nie przekracza 3 m; mogą latać w różnych trybach automatycznych i mają ograniczenia wysokości lotu do 120 m. Drony klasy C3 dopuszczone są tylko w kategorii A3 – to znaczy z dala od ludzi. Jednak w przypadku wykorzystania drona do nawodnienia lub nawożenia punktowego/precyzyjnego operacja musi być wykonywana w kategorii szczególnej.

Ostatnia kategoria C4 dotyczy dronów o masie poniżej 25 kg, nie wyposażonych w opcję trybów automatycznych z wyjątkiem stabilizacji lotu, która nie może bezpośrednio wpływać na trajektorię.

Ponieważ w dniu wprowadzenia nowych regulacji prawnych dotyczących BSP brak jest dronów zgodnych z wprowadzonymi kategoriami, stosuje się przepisy przejściowe dla BSP, które obecnie nie spełniają wymogów dla poszczególnych klas dronów w rozumieniu rozporządzenia delegowanego (UE) 2019/945. Dopuszcza się użytkowanie BSP w okresie przejściowym, trwającym do lipca 2022 roku, z następującymi zastrzeżeniami:

- bezzałogowy statek powietrzny MTOM < 500 g jest eksploatowany w granicach wymogów operacyjnych określonych dla BSP klasy C1 (kat. otwarta, A1) przez pilotów bezzałogowych statków powietrznych posiadających poziom kompetencji określony przez dane państwo członkowskie
- bezzałogowy statek powietrzny MTOM < 2 kg jest eksploatowany w taki sposób, że zachowuje się minimalną odległość 50 m w poziomie od osób, a piloci bezzałogowych statków powietrznych posiadają poziom kompetencji co najmniej równorzędny poziomowi określonemu dla kategorii A2
- bezzałogowy statek powietrzny o MTOM > 2 kg i mniejszej niż 25 kg jest eksploatowany w granicach wymagań operacyjnych określonych dla kategorii A3 (150 m w poziomie od terenów mieszkaniowych, użytkowych, przemysłowych lub rekreacyjnych).

Z praktycznego punktu widzenia w zastosowaniach rolniczych najczęściej wykorzystywane są drony kategorii C2 oraz C3 w operacjach kategorii otwartej A3 lub większe drony, powyżej 25 kg w kategorii szczególnej, jeśli dotyczyć to będzie na przykład nawodnienia lub nawożenia punktowego (zrzut materiałów).

W przypadku operacji w kategorii szczególnej, a więc operacji o zwiększonym ryzyku w zakresie bezpieczeństwa, poszanowania prywatności, środowiska, ochrony przed hałasem lub której parametry lotu wychodzą poza kategorię otwartą, na przykład w związku ze zrzutem materiałów (woda, nawozy) lub masą BSP, wykonanie operacji wymaga weryfikacji i zgody ULC. W zależności od scenariusza operacji dostępne są trzy możliwe opcje uzyskania takiej zgody, z których dwie są istotne i mają zastosowanie z punktu widzenia wykorzystania dronów w rolnictwie. Jeśli operacja wykonywana jest zgodnie ze standardowymi scenariuszami, opublikowanymi w stosownych Dziennikach Urzędowych ULC⁵, wówczas wystarczy złożyć do ULC tylko oświadczenie o operacji zgodnej ze standardowym scenariuszem. W przeciwnym przypadku wymagane jest złożenie wniosku o zezwolenie na operację do ULC. Krajowe scenariusze standardowe (NSTS) określają warunki wykonania operacji, łącznie z określeniem stopnia ich ryzyka, i obowiązywać będą do 2 lat od chwili wejścia do stosowania przepisów (1 lipiec 2022). W myśl przepisów europejskich, od 2 grudnia 2021 roku obowiązywać będą scenariusze standardowe opublikowane przez Europejską Agencję Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA). Na przykład Krajowy Scenariusz Standardowy NSTS-02 wykonuje się w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS), z użyciem bezzałogowego statku powietrznego kategorii wielowirnikowiec (MR), o masie startowej mniejszej niż 25 kg.

W sytuacji, gdy system BSP waży powyżej 25 kg, lot może być wykonywany w ramach kategorii szczególnej, jednak wykracza poza ramy scenariuszy standardowych

⁵ Standardowe scenariusze operacji dla BSP można znaleźć na stronach ULC: <http://edziennik.ulc.gov.pl/keywordbrowse/81> (dostęp 2021-08-09).

właśnie ze względu na masę (lub ewentualny zrzut materiałów). Wiąże się to najczęściej ze wzrostem ryzyka wykonywanej operacji. Lot musi być poprzedzony uzyskaniem zgody prezesa ULC. Odpowiednia zgoda wydawana jest na podstawie wniosku załącznikiem, do którego jest między innymi analiza ryzyka. Analiza ryzyka wymaga od operatora umiejętności sporządzania dokumentacji według metodologii SORA⁶ (ang. *specific operations risk assessment*). Można wnioskować o zgodę nie tylko na jeden lot, lecz także na szereg operacji, które na przykład odpowiadają charakterowi działań danego użytkownika (inspekcji linii energetycznych, większe obszary nalotu itp.).

Strefy geograficzne oraz zgłaszanie lotów

Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 roku w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych, nakłada na państwa członkowskie obowiązek wyznaczenia stref geograficznych dla BSP, które ułatwiają, ograniczają lub wykluczają prowadzenie operacji bezzałogowych statków powietrznych. Wytyczne Nr 24 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 30 grudnia 2020 roku w sprawie stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych (Dz.Ur. 2020.78), wskazują Polską Agencję Żeglugi Powietrznej (PAŻP) jako instytucję uprawnioną do wyznaczania stref geograficznych w ramach funkcjonowania systemu zarządzania operacjami BSP/PansaUTM.

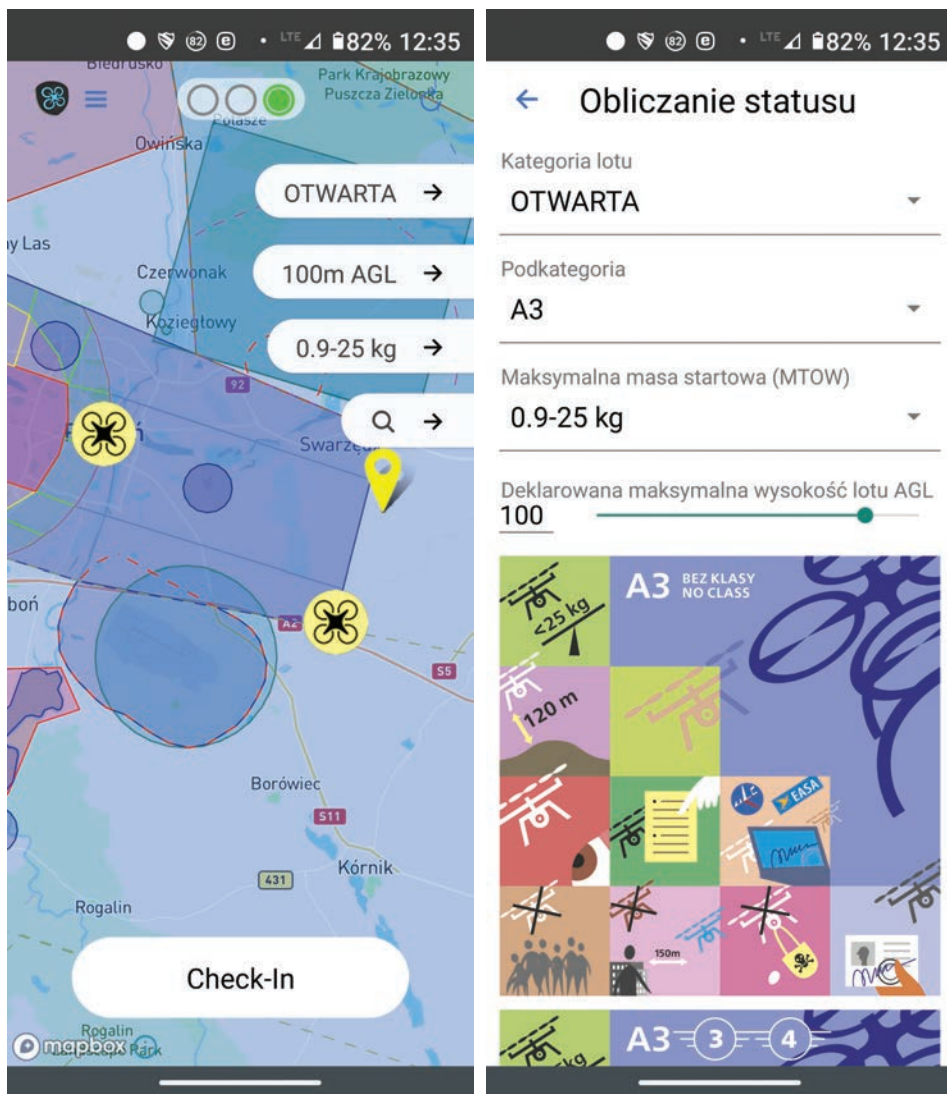
Wytyczne określają poszczególne rodzaje stref geograficznych, wyznaczanych przez Agencję, oraz zasady wykonywania w nich lotów. Szczegóły można znaleźć na stronach Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej⁷.

Niezależnie od strefy oraz zasad i wymogów wykonywania w niej operacji każdy lot BSP w polskiej przestrzeni powietrznej powinien być zgłoszony w PAŻP za pośrednictwem systemu teleinformatycznego określonego przez Agencję. Oznacza to, że każdy lot BSP należy poprzedzić wykonaniem procedury CHECK-in w aplikacji DroneRadar⁸ (ryc. 75). Aplikacja jest dostępna bezpłatnie w systemach Android oraz iOS i informuje o możliwości wykonania legalnego lotu w danym miejscu i czasie. Została zintegrowana z systemem PansaUTM umożliwiającym elektroniczną koordynację lotów BSP oraz cyfrowe zarządzanie wnioskami i zgodami na loty w przestrzeni powietrznej. Wykonanie procedury CHECK-in w aplikacji DroneRadar nie jest jednoznaczne z uzyskaniem stosownej, wymaganej na niektórych obszarach, zgody na wykonywanie operacji za pomocą BSP.

⁶ <https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulation-eu> (dostęp 2021-08-24).

⁷ https://www.pansa.pl/uas_geozones/ (dostęp 2021-08-24).

⁸ <https://droneradar.eu/> (dostęp 2021-08-24).



Ryc. 75. Wykonywanie procedury CHECK-in w aplikacji DroneRadar

Operator SBSPP jest w pełni odpowiedzialny za operację dronem i przed jej wykonaniem musi sprawdzić za pomocą aplikacji DroneRadar lub strony PAŻP dostępność przestrzeni powietrznej (podając parametry planowanego lotu). W niektórych przypadkach może być wymagana zgoda zarządzającego daną przestrzenią powietrzną (lub miejscem).

Wykorzystanie dronów w rolnictwie

Stosowane sensory oraz indeksy wegetacji

Bezzałogowe statki powietrzne coraz częściej, i to z powodzeniem, wykorzystywane są w rolnictwie precyzyjnym do wielu celów, między innymi do inwentaryzacji i monitoringu upraw oraz precyzyjnego ich nawadniania i nawożenia (Kowalska i in. 2019). Do podejmowania optymalnych decyzji związanych z uprawami wymagane jest posiadanie wiarygodnych i aktualnych danych dotyczących stanu gleby i roślin. Dane takie można pozyskać, wykorzystując także drony oraz techniki tele-detekcji. Dane pozyskane z dronów i techniki fotogrametryczne stosowane w rolnictwie do oceny różnych indeksów wegetacji stanowią szybki, niezawodny i opłacalny sposób oceny upraw dla zastosowań w rolnictwie precyzyjnym (Candiago i in. 2015). Bezzałogowe statki powietrzne są wyposażone w różnego rodzaju zestawy sensorów, które w razie potrzeb mogą być wymieniane na inne, umożliwiające zebranie różnych informacji. Krótkie zestawienie sensorów i możliwych do pozyskania danych oraz ich aplikacji przedstawiono w tabeli 33.

Tabela 33

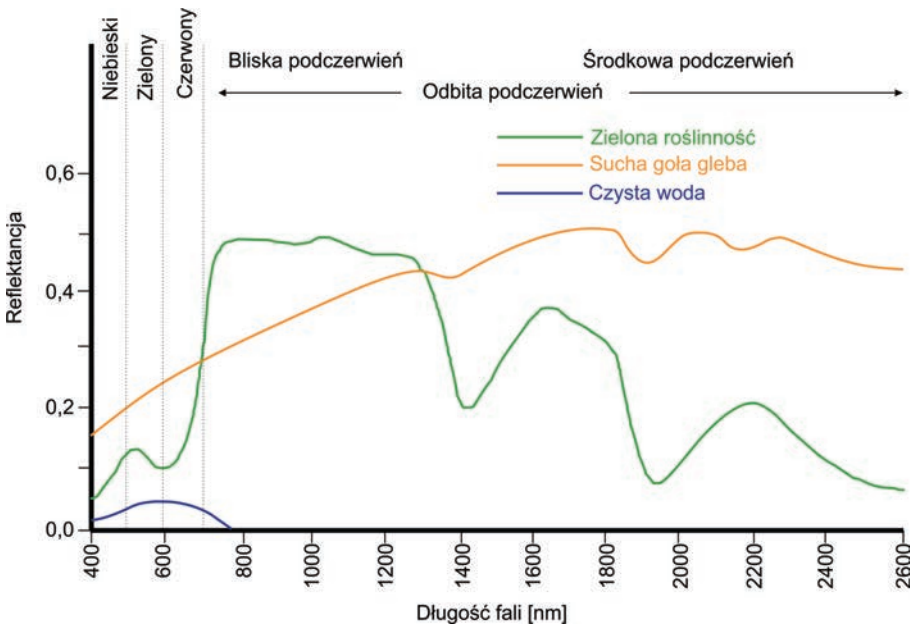
Sensory najczęściej wykorzystywane w operacjach dronami na potrzeby rolnictwa precyzyjnego oraz ich możliwych aplikacji

Rodzaj sensora	Opis	Możliwe zastosowania
Kamera RGB	tylko zakres widzialny promieniowania elektromagnetycznego	<ul style="list-style-type: none"> • monitoring upraw, wykrywanie uszkodzeń/zniszczeń • szacowanie, na podstawie różnych wskaźników, stanu wegetacji roślin • tworzenie modeli terenu • szacowanie wysokości roślinności
Kamera multispektralna	5 kanałów, rejestrowane są pasma fal zielonych, czerwonych, Red-Edge i bliskiej podczerwieni, aby uchwycić zarówno widzialne, jak i niewidzialne obrazy upraw i roślinności	<ul style="list-style-type: none"> • monitoring upraw, wykrywanie uszkodzeń/zniszczeń • szacowanie, na podstawie różnych wskaźników, stanu wegetacji roślin • szacowanie potrzeb nawożenia i nawadniania • wykrywanie chorób roślin
Kamera hiperspektralna	powyżej 5 kanałów składowych jest rejestrowanych (może nawet sięgać 2000)	<ul style="list-style-type: none"> • j.w. + gatunków roślin, nawet o podobnych sygnaturach spektralnych
Kamera termowizyjna	rejestrowanie z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego, obrazów ciepła	<ul style="list-style-type: none"> • ocena stresu wodnego oraz równomierności nawodnienia • obliczanie wskaźników wegetacji
Sensor LIDAR	wykorzystanie technik skaningu laserowego	<ul style="list-style-type: none"> • tworzenie wysokiej jakości numerycznych modeli terenu

Najczęściej do zbierania danych wykorzystywane są kamery multispektralne rejestrujące oprócz światła widzialnego także pasma Red-Edge i bliskiej podczerwieni. Dzięki analizie multispektralnej światła odbitego od roślinności można oszacować takie cechy roślin jak: morfologia, taksonomia, układ łanu, masa liści, rodzaj i orientacja liści, a także dojrzałość, wybarwienie. Można także dokonać oceny deficytu składników pokarmowych i deficytu wody, występowania agrofagów oraz pozyskać niektóre informacje o zasobności i właściwościach powietrznych gleby (Berner i Chojnacki 2016).

Roślinność charakteryzuje się zdolnością do odbijania i pochłaniania światła o różnej długości fali. Współczynnik odbicia światła rośliny, czyli refleksja, zależy będzie od wielu czynników, między innymi od barwników zawartych w roślinach oraz od struktury komórkowej i zawartości wody (Mazur i Chojnacki 2017). W roślinach zielonych chlorofil silnie absorbuje promieniowanie w zakresie światła widzialnego, o długości od około 400 do około 700 nm (Govender i in. 2007). Przykładowe krzywe spektralne dla roślin oraz gleby zostały zilustrowane na rycinie 76.

W analizie obrazów multispektralnych pozyskanych na potrzeby oceny upraw stosuje się wiele kryteriów, indeksów bazujących na pomiarze odbić poszczególnych pasm światła od roślin. Szerokie zestawienie można znaleźć na przykład w pracach Xue i Su (2017) oraz Wójtowicza i in. (2016). Jednym z najpowszechniej stosowanym, najprostszym kryterium oceny wegetacji na danym obszarze, jest



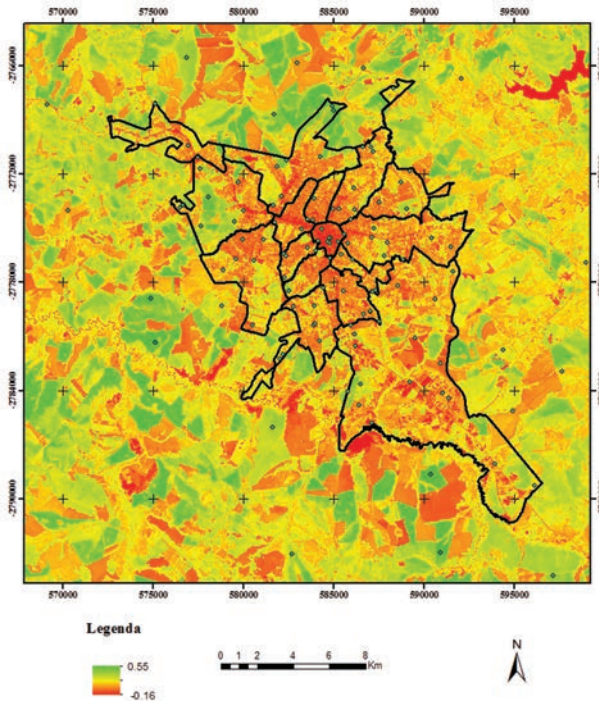
Ryc. 76. Przykładowe krzywe spektralne

znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI (Difference Vegetation Index), obliczany jako:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

gdzie: *VIS* – odbicie w paśmie czerwieni,
NIR – odbicie w paśmie podczerwieni.

Wartość indeksu NDVI może się wahać w zakresie od -1,0 do 1,0, gdzie wartości dodatnie odpowiadają wyższemu odbiciu w zakresie podczerwieni i mniejszemu w zakresie czerwieni, co jest charakterystyczne na przykład dla roślinności. Wysoka wartość NDVI odpowiadać będzie terenom zielonym, bujnie porośniętym roślinnością o dobrej kondycji. Wartości ujemne wskazują na obszary niepokryte roślinnością, takie jak woda, obszary jałowe, lód, śnieg lub chmury (ryc. 77). Zakres indeksu NDVI dla zielonej roślinności wynosi 0,2-0,9, przy czym dla krzewów i użytków zielonych przyjmuje wartości mniejsze, oscylujące w granicach 0,2-0,3, natomiast większe wartości, z zakresu 0,4-0,9, oznaczają lasy i uprawy (Candiago i in. 2015, Pettorelli i in. 2005).



Ryc. 77. Przykład zastosowania indeksu NDVI (Kauan Mateus Kubaski and Gilson Campos Ferreira da Cruz using Landsat data from the U.S. Geological Survey na licencji Creative Commons)

Wskaźnik Green Normalized Difference Vegetation Index (*GNDVI*) użyteczny jest w średnim i zaawansowanym stadium rozwoju roślin:

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

gdzie: *Green* – wartości współczynnika odbicia światła w zakresie pasma zieleni.

Indeks *GNDVI* przyjmować może również wartości od -1 do 1 i jest liniowo skorelowany ze wskaźnikiem powierzchni liścia (*LAI*) i objętości biomasy. Wykazuje większą wrażliwość na stężenie chlorofilu.

Trzecim, najczęściej stosowanym wskaźnikiem jest Soil Adjusted Vegetation Index (*SAVI*) (Huete 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)}$$

gdzie: *L* – współczynnik pokrycia gleby, w przedziale od 0 do 1 , (0 – całkowite pokrycie roślinnością, wówczas *SAVI* jest równoznaczny z *NDVI*, a dokładniej $SAVI = NDVI$, 1 – brak pokrycia roślinnością).

Indeks również może przyjmować wartości od $-1,0$ do $1,0$. Stosowany jest w sytuacjach, gdy występuje relatywnie duża powierzchnia odkrytej gleby i umożliwia wyeliminowanie wpływu zmienności barwy oraz jasności gleby na wynik.

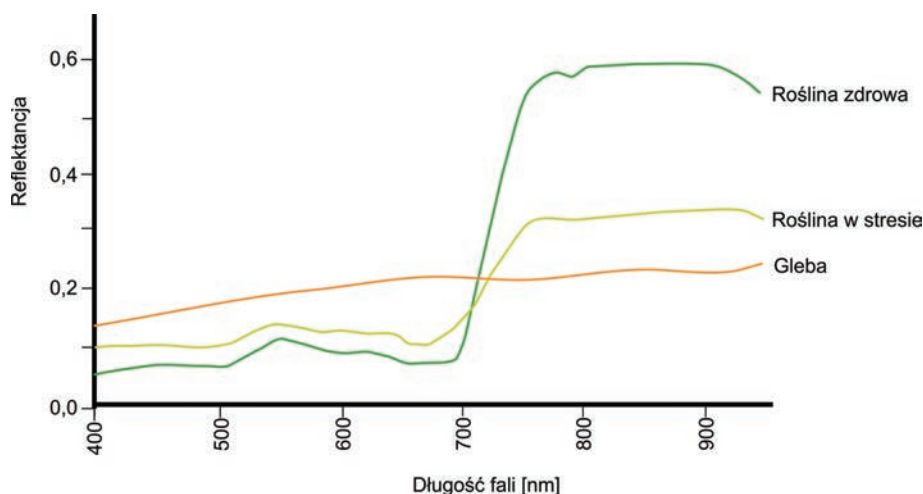
Należy pamiętać, że nie zawsze z pojedynczego nalotu za pomocą *NVDI* lub innych indeksów można znaleźć odpowiedź na wszystkie pytania. Wiele informacji o przyczynach zmian intensywności wzrostu roślin można uzyskać, gdy zostanie zastosowana korelacja w czasie. Powtarzając co jakiś czas naloty dronami nad analizowanym polem lub korzystając z danych archiwalnych, można zaobserwować również zmiany w czasie w stosunku do upraw, na przykład oszacować wielkość strat spowodowanych plagą szkodników.

Mapowanie i inwentaryzacja upraw

Jednym z najpowszechniejszych i zarazem najprostszych sposobów wykorzystania *BSP* jest bieżący monitoring i inwentaryzacja upraw. Naloty dronami mogą pomóc w planowaniu oraz inwentaryzacji produkcji roślinnej. Proces ten jest niezbędny dla rolnika zainteresowanego zastosowaniem rolnictwa precyzyjnego. Aktualne mapy produkcji mogą być następnie konsolidowane z mapami terenu i innymi danymi, takimi jak na przykład dane z teledetekcji i informacje meteorologiczne w celu wdrożenia ogólnego i wydajnego systemu uprawy, rolnictwa precyzyjnego (Radoglou-Grammatikis i in. 2020).

Szacowanie stresu wodnego roślin oraz potrzeb nawadniania

W zależności od stanu samej rośliny można zaobserwować znaczące różnice w poziomie refleksyjności (ryc. 78). Kiedy roślina jest poddawana stresowi, który utrudnia normalny wzrost i produkcję chlorofilu, występuje mniejsza refleksyjność w paśmie światła bliskiej podczerwieni oraz podczerwieni (Smith 2012).



Ryc. 78. Przykładowe krzywe spektralne rośliny zdrowej oraz w stresie

Wczesne wykrycie stresu rośliny za pomocą metod teledetekcji może pomóc identyfikować status stresu w większych skalach czasowych i przestrzennych, zanim uszkodzenia będą widoczne, dzięki czemu możliwe jest wcześniejsze podjęcie odpowiednich kroków niwelujących zagrożenie i obniżenie lub wyeliminowanie ewentualnych strat (Berni i in. 2009, Chan i in. 2021, Cheng i in. 2006, Quebrajo i in. 2018, Zarco i in. 2002, Zhang i Zhou 2019). Zdjęcia kamerą multispektralną oraz termowizyjną umożliwiają oszacowanie podstawowych wskaźników roślinności, między innymi NDVI oraz wskaźnika stresu wodnego w uprawie CWSI (Crop Water Stress Index) (Jones 1999; Leinonen i Jones 2004):

$$CWSI = \frac{(T_p - T_w)}{(T_s - T_w)}$$

gdzie: T_p – średnia temperatura powierzchni liści rośliny doświadczalnej,
 T_w – średnia temperatura powierzchni liści rośliny mokrej,
 T_s – średnia temperatura powierzchni liści rośliny suchej.

Wartości indeksu CWSI powinny zawierać się w przedziale 0,0-1,0, gdzie zero oznacza brak stresu rośliny, natomiast większe wartości odpowiadają większemu stresowi wodnemu rośliny. Jak wskazują badania (Kacira i in. 2002), technika oparta na wyznaczeniu indeksu CWSI była w stanie wykryć stres wodny rośliny na jeden do dwóch dni przed wykryciem stresu przez obserwację wizualną. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w odpowiednie typy czujników umożliwia identyfikację części upraw, które potrzebują więcej wody (Tsouros i in. 2019). Wykrywanie obszarów, na których potrzeby wodne są większe i konieczne jest dodatkowe nawadnianie, może pomóc rolnikom zaoszczędzić czas i zasoby wodne, na przykład przez stosowanie precyzyjnego, punktowego nawadniania tylko w miejscach, które tego wymagają. W przypadku nawadniania klasycznego, deszczowego może być podstawą optymalizacji pracy systemu. Jednocześnie takie techniki rolnictwa precyzyjnego mogą prowadzić do zwiększenia wydajności i jakości upraw.

Drony jako systemy natryskowe w precyzyjnym rolnictwie

Jednym ze sposobów wykorzystania systemów BSP jest zastosowanie dronów do precyzyjnego nawadniania, oprysku, siewu czy siewu uzupełniającego. Są to zazwyczaj systemy ciężkie, powyżej 25 kg, niejednokrotnie powyżej 50 kg. Wiąże się to oczywiście z koniecznością transportu materiałów, na przykład środków ochrony roślin, nawozów czy też wody do punktowych nawodnień.

Drony w takiej konfiguracji (z zamontowanym systemem natryskowym) mogą być wykorzystywane na wiele sposobów. Dzięki zastosowaniu BSP możliwe jest precyzyjne i odpowiednie, w zależności od potrzeb, zróżnicowane dodatkowo przestrzennie, nawodnienie, dawkowanie pestycydów i nawozów, wykorzystywane do zwiększania efektywności upraw i łagodzenia ewentualnych chorób roślin, a także do zwalczania chwastów i szkodników (Esposito i in. 2021, Huang i in. 2018, Torres-Sánchez i in. 2013). Sam system oprysku może być dodatkowo optymalizowany i dynamicznie sterowany w zależności od warunków pogodowych (Faiçal i in. 2014) z uwzględnieniem takich elementów jak zmiana prędkości i kierunku wiatru (Faiçal i in. 2017). Dzięki takiemu podejściu możliwe jest wyeliminowanie niekorzystnego wpływu stosowania pestycydów, związanego na przykład z nieprecyzyjnym opryskiem w wyniku działania wiatru (nieopryskanie pewnych obszarów lub nakładanie się dawki pestycydów na innych obszarach). Kolejnym plusem stosowania BSP jest możliwość ograniczenia stosowania środków ochrony roślin. Zastosowanie BSP do nawadniania czy też oprysków, oprócz wyżej wymienionych zalet, może również okazać się tańsze niż konwencjonalne rozwiązania (Martinez-Guanter i in. 2020) i niejednokrotnie szybsze w aplikacji (Kim i in. 2019, Luck i in. 2010). Jak wykazali Heisel i in. (1999), zastosowanie

odpowiedniej technologii rozpylania oraz systemów decyzji do precyzyjnego użycia herbicydów daje potencjalne oszczędności herbicydów w granicach od 30% do 75%.

Drony mogą być również wykorzystane do precyzyjnego siewu (Berner i Chojnacki 2016, 2018) lub ponownego wysiewu, czyli powrotu na zasiane pole i ponownego obsiewania miejsc, w których nie nastąpiło kiełkowanie czy wschody lub rośliny zostały uszkodzone przez zwierzęta, zalanie itp. (Pedersen i in. 2017). Ponowny wysiew zwykle nie jest możliwy przy zastosowaniu klasycznej technologii, ponieważ ciągniki wyrządziłyby zbyt duże szkody istniejącym uprawom. Uzupełniający siew może być stosowany, jeśli obszary upraw zostały uszkodzone, a istniejąca uprawa nie jest jeszcze zbyt dojrzała, aby umożliwić ponowne zasiewy.

Podsumowanie

Wykorzystanie dronów w rolnictwie precyzyjnym niesie za sobą wiele zalet. Bezzałogowe statki powietrzne mogą być stosowane w zarządzaniu uprawami, poczynając od rejestrowania obrazów o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej oraz monitoringu upraw aż do wyspecjalizowanych zabiegów, takich jak precyzyjne i punktowe nawadnianie. Co ważne, jest też techniką bezinwazyjną, niepowodującą jak w przypadku wykorzystania ciągnika rolniczego dodatkowych uszkodzeń roślin uprawnych, a także niegenerujących kosztów związanych z jego stosowaniem. Niewątpliwą zaletą systemów BSP jest również niski koszt ich eksploatacji. Systemy BSP umożliwiają pozyskiwanie kluczowych informacji (np. stan stresu wodnego) o uprawie z dużą częstotliwością czasową (ponowna wizyta 1-3 dni) i w wysokiej rozdzielczości przestrzennej (skala centymetrowa).

Oprócz niewątpliwych zalet platformy BSP mają również pewne wady. Głównymi ograniczeniami dla tej platformy były i są: czas pracy (około 20 min) i mała prędkość lotu, a co za tym idzie, ograniczenie wydajności oraz możliwości stosowania zabiegów na ograniczonym obszarze w ramach jednego przelotu (Berni i in. 2009).

Zastosowanie dronów do identyfikacji stresu wodnego roślin uprawnych przynosi jednak wymierne korzyści dzięki możliwości optymalizacji systemu nawadniania. Dopasowanie poziomu wilgotności gleby do potrzeb rośliny uprawnej powoduje, że rośliny rozwijają się w optymalnych warunkach, co prowadzi do maksymalizacji plonu i wzrostu odporności na choroby. Odpowiednie oszacowanie przestrzenne zapotrzebowania roślin na wodę umożliwia również przestrzenne zróżnicowanie nawodnienia ograniczane do tylko tych obszarów, na których rośliny wskazują stres wodny. Monitoring upraw za pomocą BSP umożliwia również wczesne wykrycie stresu wodnego rośliny, na jeden do dwóch dni przed wykryciem stresu przez obserwację wizualną, a zatem znacznie wcześniejszą reakcją. Zastosowanie precyzyjnego, punktowego nawadniania za pomocą

BSP dodatkowo ogranicza liczbę zabiegów i ewentualnych szkód wynikających na przykład z przejazdów ciągnikiem rolniczym w celu oprysków lub modyfikacji systemu nawadniania.

Dynamiczny rozwój BSP umożliwi coraz szersze ich wykorzystanie w wielu różnych aplikacjach w rolnictwie precyzyjnym. Można oczekiwać, że zarówno liczba możliwych zastosowań, jak i samo wykorzystanie BSP w rolnictwie będzie w najbliższych latach wzrastać.

Literatura

- Berner B., Chojnacki J. (2016): Wykorzystanie dronów w rolnictwie precyzyjnym. *Tech. Roln. Ogrodn. Leś.*, 3, 19-21.
- Berner B., Chojnacki J. (2017a): Conception of UAV use in the road rescue. *Autobusy: Tech., Eksp. Syst. Transp.*, 18(7-8), 53-56.
- Berner B., Chojnacki J. (2017b): Monitorowanie zanieczyszczeń środowiska za pomocą dronów. *Autobusy: Tech. Eksp. Syst. Transp.*, 18(7-8), 57-60.
- Berner B., Chojnacki J. (2018): Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych do nawożenia, siewu i sadzenia. *Tech. Roln. Ogrodn. Leś.*, 2, 17-19.
- Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suárez L., Fereres E. (2009): Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47(3), 722-738.
- Candiago S., Remondino F., Giglio M. de, Dubbini M., Gattelli M. (2015): Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sens.*, 7(4), 4026-4047.
- Chan C., Nelson P.R., Hayes D.J., Zhang Y.J., Hall B. (2021): Predicting water stress in wild blueberry fields using airborne visible and near infrared imaging spectroscopy. *Remote Sens.*, 13(1425), 1-17.
- Chen S., Laefer D.F., Mangina E., Zolanvari S.I., Byrne J. (2019): UAV bridge inspection through evaluated 3D reconstructions. *J. Bridge Eng.*, 24(4), 1-39.
- Cheng Y.B., Zarco-Tejada P.J., Riaño D., Rueda C.A., Ustin S.L. (2006): Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sens. Environ.*, 105(4), 354-366.
- Chojnacki J., Pasek D. (2017): Historia wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych. *Rocz. Bezp. Międzyn.*, 11(1), 174-189.
- Chorażewicz J., Filipiak A. (2018): Dane przestrzenne pozyskiwane przy pomocy BSL i ich zastosowanie w leśnictwie. *Przeł. Geod.*, 90(10), 13-14.
- Christiansen M.P., Laursen M.S., Jørgensen R.N., Skovsen S., Gislum R. (2017): Designing and testing a UAV mapping system for agricultural field surveying. *Sensors*, 17(2073), 1-19.
- Esposito M., Crimaldi M., Cirillo V., Sarghini F., Maggio A. (2021): Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 8(1), 1-11.
- Faiçal B.S., Freitas H., Gomes P.H., Mano L.Y., Pessin G., Carvalho A.C. de, Krishnamachari B., Ueyama J. (2017): An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Comp. Electr. Agric.*, 138, 210-223.
- Faiçal B.S., Pessin G., Geraldo Filho P.R., Carvalho A.C., Furquim G., Ueyama J. (2014): Fine-tuning of UAV control rules for spraying pesticides on crop fields. 26th Int. Conf. Tools with Artificial Intelligence. *IEEE*, 527-533.

- Govender M., Chetty K., Bulcock H. (2007): A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water Sa*, 33(2), 145-151.
- Hallermann N., Morgenthal G. (2013): Unmanned aerial vehicles (UAV) for the assessment of existing structures. IABSE Symposium Report. Int. Assoc. for Bridge Struct. Eng., 14(101), 1-8.
- Heisel T., Christensen S., Walter A.M. (1999): Whole-field experiments with site-specific weed management. Precision agriculture'99, Part 1 and Part 2. Papers presented at the 2nd European Conf. on Precision Agriculture, Odense, Denmark, 11-15 July 1999. Sheffield Academic Press, 759-768.
- Huang Y., Reddy K.N., Fletcher R.S., Pennington D. (2018): UAV low-altitude remote sensing for precision weed management. *Weed Technol.*, 32(1), 2-6.
- Huete A. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25(3), 295-309.
- Jones H.G. (1999): Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agric. Forest Meteorol.*, 95(3), 139-149.
- Ju C., Son H.I. (2018): Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation. *Electronics*, 7(9), 162.
- Kacira M., Ling P.P., Short T.H. (2002): Establishing Crop Water Stress Index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE*, 45(3), 775-780.
- Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I. (2019): Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*, 7, 105100-105115.
- Kowalska J., Jakubowska M., Wójtowicz A., Drożdżyński D. (2019): The application of unmanned aerial vehicle in agriculture. *Progr. Plant Protect.*, 59(3), 157-163.
- Krawczyk J.M., Mazur A.M., Sasin T., Stokłosa A.W. (2015): Infrared building inspection with unmanned aerial vehicles. *Pr. Inst. Lotn.*, 3(240), 32-48.
- Leinonen I., Jones H.G. (2004): Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *J. Experiment. Bot.*, 55(401), 1423-1431.
- Liu C., Szirányi T. (2021): Real-time human detection and gesture recognition for on-board UAV Rescue. *Sensors*, 21(6:2180), 1-21.
- Luck J.D., Pitla S.K., Shearer S.A., Mueller T.G., Dillon C.R., Fulton J.P., Higgins S.F. (2010): Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles. *Comp. Electr. Agric.*, 70(1), 19-26.
- Martinez-Guanter J., Agüera P., Agüera J., Pérez-Ruiz M. (2020): Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards. *Precision Agric.*, 21(1), 226-243.
- Mazur P., Chojnacki J. (2017): Wykorzystanie dronów do teledetekcji multispektralnej w rolnictwie precyzyjnym. *Tech. Rol. Ogrod. Leś.*, 1, 25-28.
- Merkisz J., Nykaza A. (2016): Perspektywy rozwoju i wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w służbach ratowniczych. *Autobusy: Tech., Ekspł., Syst. Transp.*, 17(6), 291-296.
- Miller, Donald L. (2017): Władcy przestworzy Amerykańscy lotnicy w walce z nazistowskimi Niemcami. Wydawnictwo Replika, Poznań.
- Morgenthal G., Hallermann N. (2014): Quality assessment of unmanned aerial vehicle (UAV) based visual inspection of structures. *Adv. Struct. Eng.*, 17(3), 289-302.
- Nex F., Remondino F. (2014): UAV for 3D mapping applications: a review. *Appl. Geomatics*, 6(1), 1-15.
- Noszczyk P., Nowak H. (2017): Zastosowanie dronów do termowizyjnych badań obiektów budowlanych. *Mater. Bud.*, 11, 27-28.
- Pagacz S., Witczuk J. (2016): Wykorzystanie samolotów bezzałogowych i termowizji do nocnej inwentaryzacji kopytnych. *Stud. Mater. Centr. Ed. Przyr.-Leś.*, 18(49A/4), 50-57.
- Pedersen S.M., Fountas S., Sørensen C. G., van Evert F. K., Blackmore B. S. (2017): Robotic seeding: Economic perspectives, w: Precision agriculture: Technology and economic perspectives. Springer, 167-179.

- Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker C.J., Stenseth N.C. (2005): Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol. Evol.*, 20(9), 503-510.
- Quebrajo L., Perez-Ruiz M., Pérez-Urrestarazu L., Martínez G., Egea G. (2018): Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation management of sugar beet. *Biosyst. Eng.*, 165, 77-87.
- Radoglou-Grammatikis P., Sarigiannidis P., Lagkas T., Moscholios I. (2020): A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Comp. Networks*, 172(107148).
- Silvagni M., Tonoli A., Zenerino E., Chiaberge M. (2017): Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events. *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, 8(1), 18-33.
- Smaga D. (2017): Bezzałogowe systemy powietrzne w konfliktach zbrojnych. *Wiedza Obron.*, 3-4, 15-34.
- Smith R.B. (2012): Introduction to remote sensing of the environment (RSE). <https://www.micromages.com/documentation/Tutorials/intro.pdf>, data dostępu 2021-08-17.
- Torres-Sánchez J., López-Granados F., Castro A.I. de, Peña-Barragán J.M. (2013): Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS one*, 8(3/e58210), 1-15.
- Tsouros D.C., Bibi S., Sarigiannidis P.G. (2019): A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- Ulukavak M., Memduhoğlu A., Şenol H.İ., Polat N. (2019): The use of UAV and photogrammetry in digital documentation. *Mersin Photogram. J.*, 1(1), 17-22.
- Wang Q. (2019): Real-time atmospheric monitoring of urban air pollution using unmanned aerial vehicles. *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 1, 79-88.
- Wójtowicz M., Wójtowicz A., Piekarczyk J. (2016): Application of remote sensing methods in agriculture. *Comm. Biom. Crop Sci.*, 11(1), 31-50.
- Xue J., Su B. (2017): Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J. Sens.*, 2017, 1-17.
- Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Mohammed G.H., Noland T.L., Sampson P.H. (2002): Vegetation stress detection through chlorophyll a+ b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. *J. Environ. Qual.*, 31(5), 1433-1441.
- Zefri Y., El Kettani A., Sebari I., Ait Lamallam S. (2018): Thermal infrared and visual inspection of photovoltaic installations by UAV photogrammetry-application case: Morocco. *Drones*, 2(41), 1-24.
- Zhang F., Zhou G. (2019): Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecol.*, 19(1), 1-12.
- Zmarz A. (2009): Application of UAV in polish forestry to acquire image data. *Rocz. Geomat.*, 7(2), 143-146.
- Zongjian L.I. (2008): UAV for mapping—low altitude photogrammetric survey. *Int. Archiv. Photogramm. Remote Sens.*, 37(B1), 1183-1186.

