

INNOWACJE

w ROLNICTWIE, ENERGETYCE I ZARZĄDZANIU ODPADAMI

perspektywy i wyzwania

Tom 2



Redakcja: Kinga Kalbarczyk, Alicja Danielewska

Lublin 2025

**Innowacje w rolnictwie, energetyce
i zarządzaniu odpadami –
perspektywy i wyzwania. Tom 2**

Innowacje w rolnictwie, energetyce i zarządzaniu odpadami – perspektywy i wyzwania. Tom 2

Redakcja:
Kinga Kalbarczyk
Alicja Danielewska

Lublin 2025

**Wydawnictwo Naukowe TYGIEL składa serdeczne podziękowania
zespołowi Recenzentów za zaangażowanie w dokonane recenzje
oraz merytoryczne wskazówki dla Autorów.**

Recenzentami niniejszej monografii byli:

- prof. dr hab. inż. Wojciech Dobicki
- prof. dr hab. inż. Marian Kuczaj
- prof. dr hab. inż. Paweł Parzuchowski
- prof. dr hab. inż. Grzegorz Wielgosiński
- dr hab. inż. Lidia Felska-Błaszczyk, prof. ZUT
- dr hab. Beata Krawczyk
- dr hab. Barbara Łata
- dr hab. Agnieszka Kuźniar
- dr hab. Agnieszka Richert, prof. UMK
- dr inż. Bernadetta Bienia
- dr n. o zdr. Mariola Janiszewska
- dr inż. Katarzyna Łuczak
- dr inż. Katarzyna Midor

Wszystkie opublikowane rozdziały otrzymały pozytywne recenzje.

Skład i łamanie:
Monika Maciąg

Projekt okładki:
Marcin Szklarczyk

Korekta:
Wiktoria Paul

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

ISBN 978-83-67881-93-7

Wydawca:
Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.
ul. Głowackiego 35/341, 20-060 Lublin
www.wydawnictwo-tygiel.pl

Spis treści

Ilona Kulus, Aneta Adamczuk, Iwona Ciereszko Przeciwdziałanie negatywnym skutkom deficytu fosforu we współczesnym rolnictwie	7
Karolina Gromek, Anna Szafranek-Nakonieczna Biotyczne możliwości degradacji tworzyw sztucznych – aktualny stan wiedzy	19
Bożena Karbowska, Jarosław Bartoszewicz, Edyta Janeba-Bartoszewicz, Patryk Heleniak Właściwości paliwowe odpadu ziemniaczanego pod kątem przydatności do termicznego unieszkodliwienia na drodze spalania, zgazowania lub pirolizy	38
Edyta Janeba-Bartoszewicz, Bożena Karbowska Metodyka optymalnego zarządzania odpadami zakaźnymi	52
Monika Koziel Taksonomia, charakterystyka i wpływ preparatów mikrobiologicznych na bazie bakterii symbiotycznych roślin bobowatych na wzrost i rozwój roślin	61
Ryszard Gąsiorowski, Danuta Matykiewicz, Dominika Janiszewska-Latterini Zastosowanie biomasy z sorgo jako surowca do wywarzania materiałów ze źródeł zrównoważonych	72
Joanna Wojtas, Joanna Kisała, Natalia Matłok Wykorzystanie nanocząstek w nowoczesnym rolnictwie	82
Sylwia Andrzejczak-Grządko, Michalina Gniewosz, Leszek Jerzak Szop prac – zagrożenie dla bioróżnorodności oraz zdrowia ludzi i zwierząt	91
Magdalena Mysłək-Bęben, Joanna Guziałowska-Tic Analiza strumienia odpadów poprodukcyjnych a realizacja celów zrównoważonego rozwoju w przemyśle kosmetycznym	98
Grzegorz Strozik Problemy rewitalizacji terenów pogórnich, ochrony środowiska i transformacji gmin pogórnich na przykładzie miasta Piekary Śląskie	107
Katarzyna Targońska Potencjał akwakultury w świetle współczesnych wyzwań ekologicznych	133

Małgorzata Woźniak	
Preparaty mikrobiologiczne – składniki i bioformulacja	152
Ewa Posz	
Czy wiedza jest gwarantem postawy? – analiza kształtowania się postaw proekologicznych wśród uczniów klas „ochrony środowiska” Technikum nr 1 w Tychach.....	161
Karolina Furtak, Karolina Gawryjolek, Emilia Grzęda	
Zasolenie gleb rolniczych – przyczyny, skutki, perspektywy	174
Indeks Autorów.....	190

Zasolenie gleb rolniczych – przyczyny, skutki, perspektywy

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych zadań rolnictwa jest produkcja wystarczającej ilości żywności dla ciągle rosnącej populacji ludzi na Ziemi. Gleba, a zwłaszcza jej żyzność i produktywność, odgrywają w tym procesie ogromną rolę [1, 2]. Spośród wszystkich środków wykorzystywanych w produkcji rolniczej gleba jest jedynym, który jest w pełni odnawialny. Gleba to biologicznie czynna powierzchniowa warstwa skorupy ziemskiej, która magazynuje, filtruje i przekształca substancje niezbędne dla rozwoju roślin [3]. Stanowi fundament wzrostu roślin, siedlisko dla wielu organizmów, rezerwuár bioróżnorodności oraz magazyn węgla [2, 4]. Obecnie około 40% powierzchni lądowej jest przeznaczona na produkcję żywności i pasz, jednak stan gleb ulega pogorszeniu zarówno w wyniku postępujących zmian klimatu, jak i działalności człowieka [2, 5].

Zawartość materii organicznej oraz skład i liczebność mikroorganizmów glebowych to jedne z najważniejszych czynników wpływających na rozwój roślin [6, 7]. Na środowisko glebowe oraz procesy w nim zachodzące, w tym aktywność enzymatyczną, ma wpływ wiele czynników środowiskowych – naturalnych i antropogenicznych (rys. 1).

Jednym z czynników wpływających na jakość środowiska glebowego i procesy w nim zachodzące jest zasolenie [9]. Odczyn gleby i jej zasobność w sole stanowią istotny czynnik regulujący mikrobiom glebowy oraz obieg składników pokarmowych, jednakże nadmiar soli jest szkodliwy dla ekosystemu glebowego.

Celem niniejszej pracy jest omówienie problemu zasolenia gleb rolniczych ze szczególnym uwzględnieniem metod rewitalizacji takich terenów.

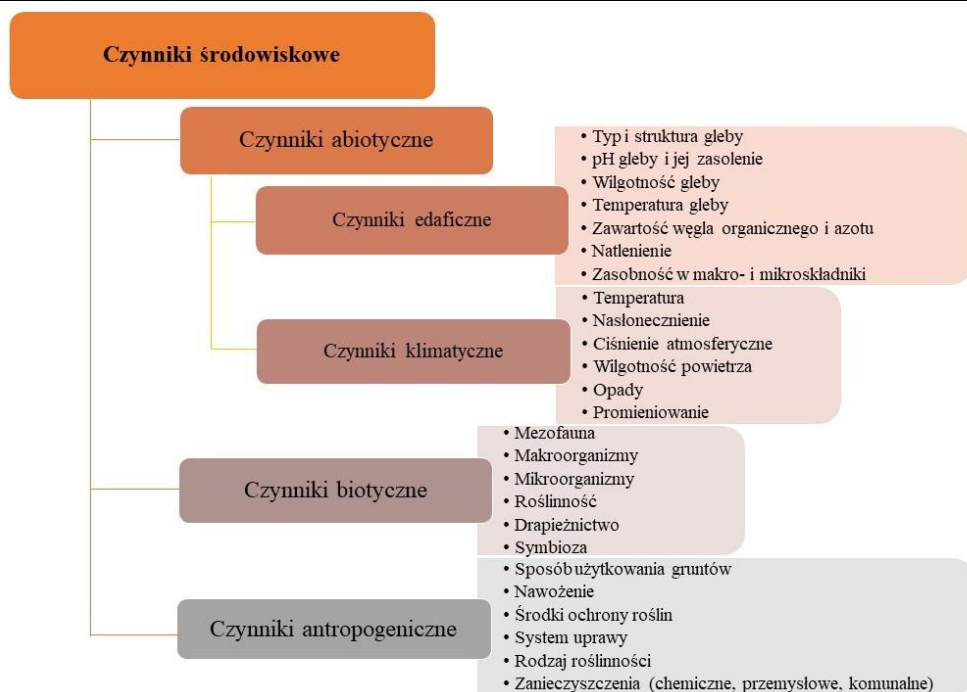
2. Zasolenie gleb

Zasolenie gleby spowodowane jest nadmiernym nagromadzeniem łatwo rozpuszczalnych soli nieorganicznych w roztworze glebowym, głównie Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ oraz NO_3^- , SO_3^{2-} , Cl^- , i określa się je w gramach soli na litr wody bądź gleby [9, 10]. Sole mineralne są naturalnie obecne w glebie, ale nadmierne ilości soli rozpuszczalnych mogą powodować zaburzenia w metabolizmie mikroorganizmów glebowych i negatywnie wpływać na plony roślin.

¹ kfrutak@iung.pulawy.pl, Zakład Mikrobiologii, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, <https://www.iung.pl/>.

² kgaw@iung.pulawy.pl, Zakład Mikrobiologii, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, <https://www.iung.pl/>.

³ egrzed@iung.pulawy.pl, Zakład Mikrobiologii, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, <https://www.iung.pl/>.



Rysunek 1. Czynniki wpływające na środowisko glebowe, opracowanie własne na podstawie [3, 8]

2.1. Przyczyny zasolenia

Gleba może być zasolona w sposób naturalny, pierwotny oraz w sposób wtórny, jako konsekwencja działalności człowieka (tab. 1).

Tabela 1. Przyczyny zasolenia gleb

Naturalne	Antropogeniczne
Akumulacja soli z zasolonego materiału macierzystego lub podciąg kapilarny z zasolonych gleb gruntowych [11]	Nadmierne, nieadekwatne do potrzeb nawożenie gleb i żywienie roślin [14]
Zbyt niska ilość opadów atmosferycznych, zwiększona ewaporacja i wysokie temperatury [12]	Stosowanie soli drogowej [15]
Zalewanie wodą morską terenów nadmorskich w wyniku wezbrań [13]	Działalność górnicza i hutnicza [16]
	Nawadnianie wodą morską [17]

2.1.1. Tereny naturalnie zasolone

Gleba może być zasolona w sposób naturalny, pierwotny [14]. Dotyczy to gleb, w których materiał macierzysty jest bogaty w sole rozpuszczalne. Fizyczne lub chemiczne wietrzenie minerałów oraz wdzieranie się na ląd wody morskiej jest kolejną naturalną przyczyną zasolenia gleby [18]. Obniżający się poziom wód lądowych oraz wzmożone parowanie będące skutkiem suszy i wysokich temperatur powietrza również przyczynia się do wzrostu zasolenia gleb.

Zgodnie z klasyfikacją WRB (ang. *World Reference Base for Soil Resources*) z roku 2006 na świecie wyróżnia się dwa typy gleb słonych, które zawierają minimum 2% soli rozpuszczalnych w wodzie w swoim profilu: sołońce (ang. *Solonetz*) i sołonzaki

(ang. *Solonchaks*) [11]. Sołonce są silnie alkaliczne ($\text{pH} > 8,5$) i zawierają w profilu węglan sodu (Na_2CO_3). Ich występowanie obejmuje przede wszystkim płaskie tereny i strefy przybrzeżne w gorącej strefie klimatycznej. Sołonzaki występują natomiast w strefach suchych i półsuchych oraz na terenach przybrzeżnych. Charakteryzują się wysokim stężeniem soli rozpuszczalnych w wodzie w określonych okresach roku.

Według Systematyki Gleb Polski z 1989 roku w Polsce wyróżniano naturalne gleby słone w obszarze nadmorskim oraz w rejonach oddziaływania złóż solankowych i wyróżnia się ich trzy typy: sołonzaki, gleby sołonzakowate oraz sołonce [19]. W wydaniu z 2019 roku zasolenie gleb jest określone jako efekt wtórnego wzbogacenia w sole łatwiej rozpuszczalne w zimnej wodzie niż gips [20]. Naturalne występowanie tego zjawiska dotyczy miedzi w strefie wybrzeża Morza Bałtyckiego, zaś wtórne obserwuje się w przypadku urbisoli.

2.1.2. Antropogeniczne źródła zasolenia gleb

Zasolenie wtórne gleb to konsekwencja działalności człowieka. Związane jest ze złym nawadnianiem i odwadnianiem gleby, zanieczyszczeniami chemicznymi, nieprawidłowym nawożeniem nawozami mineralnymi, a w niektórych rejonach także z nawadnianiem wodą morską.

Przemysł stanowi istotną przyczynę zasolenia gleb [21]. Powszechnym problemem jest nieodpowiednie składowanie odpadów przemysłowych pochodzących z przemysłu sodowego [22]. Składowanie ich w osadnikach, które nie są odpowiednio zabezpieczone powoduje przedostawanie się soli do wód gruntowych, co skutkuje zasoleniem żyznych gleb na terenach sąsiadujących. Jednocześnie zachodzi rozpylanie przez wiatr wysuszonych odpadów z powierzchni osadnika oraz emisja pyłu w czasie procesu produkcji [23].

Kolejną gałęzią przemysłu przyczyniającą się do zasolenia gleb jest proces wydobywania soli kamiennej i węgla kamiennego [24]. Powstające w wyniku tych prac hałdy odpadów stanowią źródło jonów chlorkowych (Cl^-), które przedostają się do gleby oraz są wymywane do wód gruntowych [23]. Dodatkowym zagrożeniem są nieszczelne zbiorniki retencyjne, w których magazynowana jest woda kopalniana.

Solanka należy do jednych z ważniejszych substancji wykorzystywanych w przemyśle chemicznym i jest ona transportowana za pomocą sieci rurociągów [25]. Awaryjne sieci powodują niekontrolowane wycieki solanki, które przyczyniają się do zanieczyszczenia gleb oraz wód gruntowych. Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku zasolonych ścieków przemysłowych [26].

Mniej oczywistym źródłem zasolenia gleb są pyły pochodzące z przemysłu cementowego, energetycznego oraz górniczego, które mogą zawierać znaczne ilości tlenków: CaO , MgO , K_2O i Na_2O [27]. Nawiewane na gleby przyczyniają się do wzrostu pH , a w niektórych przypadkach powodują nawet silną alkalizację [21].

Stosowanie soli drogowej w okresie zimowym powoduje transfer soli do gleb przydrożnych i miejskich [28]. W celu zapobiegania oblodzeniu chodników i jezdni używa się mieszanek piaskowo-solnych, roztworów solankowych oraz drobnej soli kamiennej. Występowanie w Polsce niewielkich opadów w okresie wiosennym potęguje ten efekt, ponieważ sól nie jest wtedy wymywana, tylko akumulowana w glebie. Badania prowadzone w Łodzi potwierdziły wzrost zasolenia gleb wzdłuż jezdni w miesiącach zimowych [29]. Bardzo niebezpiecznym pomysłem, który pojawił się w roku 2022, było zastoso-

wanie soli w celu ochrony dróg przed wysokimi temperaturami. Taki eksperyment przeprowadzili Holendrzy, którzy wykazali, że takie postępowanie umożliwia nieznaczne schłodzenie nawierzchni, co ma chronić ją przed deformacjami. Najnowsze badania przeprowadzone przez Szklarek i wsp. w 2023 r. wykazały, że praktycznie wszystkie dostępne na rynku sole drogowe wpływają toksycznie na zooplankton [30].

Mniej oczywistym, ale również wartym do omówienia źródłem zasolenia gleb mogą być teżnie solankowe zlokalizowane w miastach. Ostatnie badania wykazały, że gleby w Ciechocinku znajdujące się między tężniami oraz w ich bezpośrednim sąsiedztwie wykazują średni poziom zasolenia [10].

Na glebach uprawianych rolniczo główną przyczyną zasolenia jest nadmierne stosowanie nawozów mineralnych [31]. Niewykorzystana przez organizmy sól zwiększa pulę minerałów w roztworze glebowym. Problem ten jest potęgowany przez nieodpowiednie techniki nawadniania i odwadniania gleb. Zwiększona zawartość wody w glebie ułatwia transfer soli, jednak przy występujących okresach suszy i nieodpowiedniej melioracji sól jest akumulowana w glebie [32]. W rolnictwie dodatkowym zagrożeniem jest nawadnianie upraw wodą pochodzącą z zasolonych zbiorników, a nawet bezpośrednio wodą morską [33]. Badania wykazały, że również trwałe nawadnianie z wykorzystaniem wody z recyklingu (czyli oczyszczonymi ściekami) prowadzi do gromadzenia się soli w głębszych warstwach gleby [34].

2.1.3. Zasolenie gleb – lokalny i globalny problem

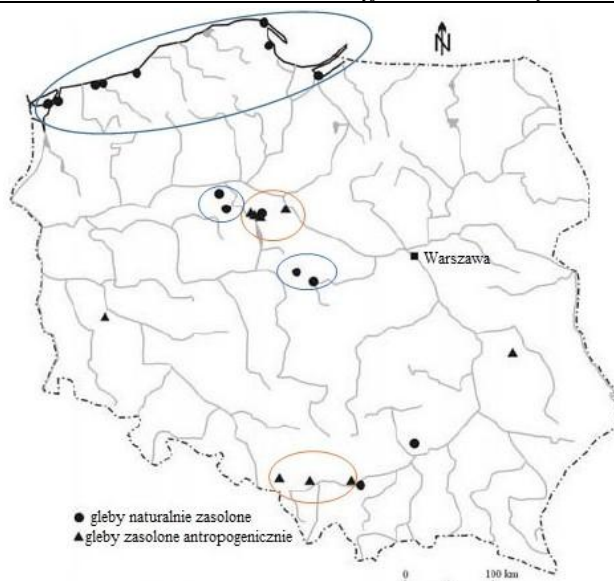
Naturalne tereny zasolone w Polsce występują w strefie brzegowej Morza Bałtyckiego, gdzie gleba jest zasalana poprzez przypyływy, zalewanie oraz przesiąkanie wody morskiej do gleby [20].

Innym naturalnym źródłem zasolenia gleb w Polsce jest występowanie płytkich pokładów soli. Takie zjawisko występuje na obszarze Kujaw, gdzie dochodzi do wysięków słonych wód towarzyszących cechsztyńskim pokładom soli [10].

Głównym źródłem zasolenia gleb w Polsce jest jednak działalność człowieka, a przede wszystkim – przemysł hutniczy i sodowy. Przykładem zasolenia gleb jako rezultatu działalności przemysłu sodowego są Zakłady Sodowe Solvay w Krakowie (województwo małopolskie), gdzie obserwuje się zanikanie traw szlachetnych i pojawianie roślinności halofilnej [35].

W rezultacie złe eksploatowanych kopalni soli dochodzi do zasolenia gleb w wyniku wypływu solanki na powierzchnię przez zaciskające się komory poeksploatacyjne. Przykładem takich nieprawidłowości jest Otworowa Kopalnia Soli „Łęzkowice” w Łęzkowicach (woj. małopolskie) [36]. Z działaniem kopalni soli w Polsce wiąże się również zasolenie terenów w Wieliczce, Sidzinie, Baryczy czy Krzyszkowicach, gdzie dochodziło do rozlewania solanki z rurociągu [35].

Szacuje się, że w Polsce ok. 5 500 ha gruntów jest zasolonych, w szczególności na terenie województwa kujawsko-pomorskiego i śląskiego (rys. 2). W latach 1995-2015 za sprawą Monitoringu Chemizmu Gleb Ornych Polski obserwowano w Polsce wzrost udziału gleb zasolonych [37]. W Polsce około 0,4% gleb użytków rolnych ma odczyn zasadowy ($\text{pH} > 7,2$) [38]. Największy odsetek gleb o odczynie zasadowym występuje na terenie województw: kujawsko-pomorskiego, zachodniopomorskiego, świętokrzyskiego i lubelskiego [38].



Rysunek 2. Obszary o zwiększonym zasoleniu gleb w Polsce, na podstawie [39]

Na świecie problem zasolenia gleb wg różnych szacunków dotyczy od 831 do 932 mln ha [40]. Około 9% gleb na świecie jest dotkniętych zasoleniem lub sodyfikacją, z czego ponad dwie trzecie gleb dotkniętych zasoleniem znajduje się w suchych i półsuchych strefach klimatycznych. Tereny zasolone znajdują się przede wszystkim w Afryce, Azji oraz Ameryce.

Zasolenie oddziałuje na ok. 1 mld ha na całym świecie, w tym na 20% wszystkich gruntów uprawnych i 33% nawadnianych gruntów [41]. W ciągu ostatnich dziesięcioleci zasolenie dotknęło systemów nawadniania na całym świecie, w szczególności w Azji, co powoduje regionalne rozprzestrzenianie się zasolenia gleb [40]. Roczne straty związane z zasoleniem gleb są szacowane na ok. 27,3 mld dolarów. Rocznie przybywa ok. 10% zasolonych obszarów [41], a prognozy wskazują, że zasolenie może być odpowiedzialne za utratę 30% powierzchni ziemi w ciągu najbliższych 25 lat, a w ciągu 35 lat – nawet 50% [42]. Wg szacunków Jamil i wsp. z 2011 r. do 2050 roku ponad 50% globalnych gruntów ornych będzie dotkniętych zasoleniem [43].

2.2. Metody oznaczania zasolenia gleb

Ocena stopnia zasolenia gleb może się odbywać na podstawie zawartości soli zdysocjowanych w glebie (%), wysycenia kompleksu sorpcyjnego sodem (%) bądź na podstawie przewodnictwa elektrolitycznego (EC, 25°C (mS m^{-1})) [20].

Metody analityczne stosowane do określenia stopnia zasolenia gleb obejmują:

- pomiar przewodnictwa elektrycznego (EC) roztworu glebowego z wykorzystaniem sondy TDR (ang. *time domain reflectometer*) [44];
- pomiar przewodnictwa elektrycznego roztworu glebowego z użyciem konduktometrów [45];
- metodę wagową – określenie procentowej zawartości soli w suchej masie utworów [46].

Przewodnictwo elektryczne określa zawartość jonów w roztworze i wyrażane jest w mS cm^{-1} . Według Polskiej Normy 11265 przyjmuje się, że $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ odpowiada 2,23 g NaCl w 1 kg gleby.

Na podstawie EC gleby klasyfikuje się zgodnie z poniższym zestawieniem (tab. 2).

Tabela 2. Podział gleb w zależności od stopnia zasolenia (EC)

EC (dS m^{-1})	Opis	Wpływ na roślinę
<0,75	gleba niezasolona	brak wpływu na roślinę
0,75-2,00	gleba bardzo słabo zasolona	brak wpływu na roślinę
2,00-4,00	gleba umiarkowanie zasolona	niższy plon roślin wrażliwych na zasolenie
4,00-8,00	gleba zasolona	niższy plon wielu roślin uprawnych
8,00-15,00	gleba bardzo zasolona	średni plon tylko roślin tolerujących zasolenie
>15,00	gleba ekstremalnie zasolona	wzrost i plon wyłącznie roślin halofilnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [47].

2.3. Skutki zasolenia

Susza i zasolenie są jednymi z największych problemów rolnictwa powodującymi znaczące zmiany w mikrobiomie i duże straty w uprawach [5].

2.3.1. Wpływ zasolenia na jakość gleby

W kontekście jakości gleby wysokie zasolenie powoduje [48-51]:

- wzrost zawartości Na^+ ;
- alkalizację gleby;
- wyparcie z gleby potasu, wapnia i magnezu;
- zahamowanie II etapu nitryfikacji, akumulację azotynów;
- zmniejszenie przyswajalności fosforu i potasu;
- zmniejszenie zawartości węgla organicznego (SOC);
- powstawanie węglanu sodu, który powoduje niszczenie koloidów glebowych.

2.3.2. Wpływ zasolenia na mikroorganizmy glebowe

Zasolenie powoduje powstawanie w glebie stresu osmotycznego, który oddziałuje negatywnie na wszystkie organizmy żywe w ekosystemie glebowym [50, 51]. Stres osmotyczny to nagła zmiana stężenia substancji rozpuszczonych wewnątrz komórek [52]. Powoduje on uszkodzenie struktur komórkowych i nieregularną pracę komórek (kurczenie i pęcznienie komórek), a nawet ich lizę. W wyniku stresu osmotycznego zmniejsza się zawartość biomasy mikroorganizmów oraz ich aktywność w glebie [54, 55].

2.3.3. Wpływ zasolenia na rośliny

Zjawisko nadmiernego stężenia soli w glebie zakłóca rozwój roślin, ograniczając pobieranie składników pokarmowych i wody [50, 52].

Zasolenie gleby oddziałuje bezpośrednio na rośliny, powodując akumulację jonów chlorkowych i sodowych w komórkach, co prowadzi do szoku osmotycznego i obniżenia aktywności enzymatycznej [56]. Stres osmotyczny powstaje, gdy ciśnienie płynów komórkowych roślin zostaje przewyższone przez ciśnienie roztworu glebowego. W efekcie tego następuje przemieszczanie się wody z komórek do roztworu glebowego w celu wyrównania różnicy ciśnień. W następstwie maleje turgor komórek, dochodzi do zahamowania ich wzrostu, a następnie do uszkodzenia i śmierci [57].

Pośrednie oddziaływanie zasolenia na rośliny to ograniczenie pobierania wody. W wyniku niedoboru wody dochodzi do zmniejszenia aktywności procesów fizjologicznych (respiracji, fotosyntezy) oraz ograniczenia prawidłowego funkcjonowania aparatów szparkowych roślin [58]. Wzrost i rozwój roślin zostają ograniczone, a przy długotrwałym oddziaływaniu – stres prowadzi do obumierania organów i całych roślin [59].

Podwyższona zawartość soli w glebie w pierwszej kolejności jest widoczna w redukcji systemu korzeniowego. Następnie dochodzi do zahamowania wzrostu części zielonej rośliny. Widoczne jest brunatnienie, żółknięcie, zasychanie i opadanie liści [60].

3. Metody minimalizowania wpływu zasolenia na uprawy

Zasoleniu należy przede wszystkim przeciwdziałać, jednakże rozwój agrobiotechnologii oraz metod rekultywacji umożliwia regenerację gleb zasolonych.

3.1. Zapobieganie zasoleniu

Zasoleniu należy przeciwdziałać poprzez ograniczenie stosowania nawozów mineralnych oraz słonych wód do nawadniania pól.

Równie istotne jest zapobieganie i ograniczanie przedostawania się do środowiska soli z działalności przemysłowej. Może ono obejmować takie działania jak [61-63]:

- zabezpieczanie składowisk;
- zabezpieczanie zbiorników solankowych;
- prawidłowa konstrukcja i zabezpieczenie rurociągów solankowych;
- prawidłowa eksploatacja kopalni;
- oczyszczanie odcieków;
- prawidłowa gospodarka opakowaniami po nawozach, środkach chemicznych itp.;
- ograniczenie stosowania soli do oczyszczania dróg zimą.

3.2. Rekultywacja zasolonych gleb

Regeneracja gleb zasolonych wymaga zwiększenia przepuszczalności i agregacji gleby [64]. Rekultywacja takich obszarów polega przede wszystkim na zastosowaniu wapnia, wapienia, gipsu lub dolomitu [65]. Jony wapnia powodują wypieranie wymiennego sodu [66].

W celu wymycia nadmiaru soli z gleby można zastosować deszczowanie i nawadnianie wodą dobrej jakości wraz z drenażem [67]. Pozwala to na utrzymanie przepływu grawitacyjnego, a w konsekwencji – wypłukanie soli ze stref korzeniowych roślin. Niestety wypłukiwanie soli wiąże się również z utratą niektórych składników odżywczych dostępnych dla roślin [68].

Z zabiegów agrotechnicznych ważne jest wprowadzenie technik rozluźniających strukturę gleby, czyli rozdrobnienia w celu poprawy warunków hydrologicznych [40].

Kolejnym zabiegiem jest stosowanie siarki bądź substancji fizjologicznie kwaśnych (kwasy humusowe, obornik) w celu obniżenia zasadowego pH gleby [69, 70]. Badania wykazały, że zastosowanie kwasów humusowych w glebach zasolonych zwiększa zawartość wapnia, magnezu i pierwiastków śladowych oraz obniża pH gleby [71]. Dodatkowo kwasy humusowe i nawożenie obornikiem wpływają na zwiększenie zawartości węgla w glebie zasolonej oraz wpływają pozytywnie na mikroorganizmy glebowe [72]. Obiecującym zabiegiem jest również połączenie nawadniania z nawożeniem mineralnym (NPK), który skutkował poprawą wymywania soli i zapobiegał gromadzeniu się

soli w glebie w delcie rzeki Huang He w Chinach [73]. Badania wykazały również, że wysokie dawki potasu (tj. 144 kg ha^{-1}) wpływają pozytywnie na wzrost buraka cukrowego w warunkach wysokiego zasolenia gleby ($9,28 \text{ ds. m}^{-1}$) [74]. Ekstremalna metoda rekultywacji gleb silnie zasolonych polega na zastosowaniu rozcieńczonego kwasu siarkowego, który rozpuszcza węglan wapnia w glebie. Uwolnione jony wapnia powodują wypieranie wymiennego sodu, który następnie tworzy łatwo wypłukiwany z gleby siarczan sodu.

W rolnictwie można również próbować zwiększyć odporność roślin na zasolenie poprzez moczenie nasion roślin przed siewem w roztworze soli [75].

3.3. Fitoremediacja

Fitoremediacja to proces usuwania zanieczyszczeń ze środowiska z zastosowaniem roślin wyższych [76]. Niektóre rośliny mają zdolność nie tylko do wzrostu na zdegradowanych glebach, ale również gromadzenia związków chemicznych w swoich tkankach [77]. W przypadku zasolenia udział roślin w rekultywacji gleby obejmuje: wpływ korzeni na agregację, porowatość i przepuszczalność gleby, oddychanie korzeni (powstawanie CO_2), produkcję H_2CO_3 i rozpuszczanie CaCO_3 , co skutkuje uwalnianiem jonów Ca^{2+} , które wypierają jony Na^{2+} [78, 79].

Regenerację terenów zasolonych można rozpocząć od zasadzenia roślin odpornych na zasolenie i czekać na poprawę pH oraz przepuszczalności gleby [79]. W tym celu można wykonać zalesianie – drzewa są bardziej tolerancyjne na stres solny niż rośliny zielne, a niektóre z nich (np. *Betulaceae*) są sadzone w celu remediacji terenów dotkniętych zasoleniem [80]. Na terenach zasolonych może być również stosowana wierzba krzewiasta (*Salix* sp.), która posiada zdolność do usuwania licznych zanieczyszczeń. Agroleśnictwo z wykorzystaniem halofilnych gatunków drzew jest bardzo skuteczną metodą rekultywacji gleb [81]. Badania wykazały, że rośliny z rodziny komosowatych (*Chenopodiaceae*), np. soliród (*Salicornia europaea*), są nie tylko odporne na zasolenie (rosną nawet przy $\text{EC} = 10 \text{ dS m}^{-1}$), ale również pozytywnie wpływają na redukcję zasolenia w glebie [82]. Innym halofitem zdolnym do akumulacji soli w swoich organach jest tamaryszek (*Tamarix* sp.) [83].

3.4. Potencjał mikroorganizmów

Niektóre mikroorganizmy mają zdolność adaptacji lub tolerancji zasolenia w glebie [84]. Mikroorganizmy zwane halofitami są szczególnie przystosowane do wysokich stężeń soli w glebie i wytwarzają enzymy odporne na działanie soli oraz gromadzą w swoich komórkach sól w ilościach odpowiadających w przybliżeniu stężeniom pozakomórkowym [85]. Wśród cech mikroorganizmów istotnych w kontekście zasolenia należy wymienić ich zdolność do produkcji osmoprotektantów bądź egzopolimerów, które chronią komórki przed stresem osmotycznym [86]. Substancje te, wydzielane na zewnątrz komórek drobnoustrojów, tworzą biofilm, który wiąże cząstki glebowe, chroni inne mikroorganizmy i korzenie roślin przed stresem solnym oraz ułatwia wymianę składników odżywczych [87].

Osmoprotektanty to cząsteczki, które wyrównują różnicę osmotyczną między organizmem zewnątrz- i wewnątrzkomórkowym, nie zakłócając przy tym funkcji enzymatycznych białek ani innych biomolekuł [88]. Najbardziej znanymi z produkcji osmoprotektantów bakteriami są halofilne i halotolerancyjne. Badania wykazały, że osmoprotektanty

bakteryjne są w stanie zwiększyć odporność roślin na stres osmotyczny [89]. Zastosowanie bakterii zdolnych do produkcji osmoprotektantów, jako bioinokulatów, może pomóc roślinom wrażliwym na stresy abiotyczne [90].

Egzopolimery (EPS) to polimery złożone głównie z polisacharydów, białek strukturalnych, enzymów, kwasów nukleinowych i lipidów wydzielane przez mikroorganizmy na zewnątrz komórek [91]. Większość funkcji, jakie przypisuje się EPS-om jest związana z ochroną produkujących je mikroorganizmów, co potwierdza wzmożona produkcja tych związków w odpowiedzi na stresy środowiskowe (np. suszę, wysoką temperaturę, zasolenie) [92]. Jedną z poznanych funkcji EPS jest zdolność do agregacji cząstek glebowych, co wpływa bezpośrednio na strukturę gleby [93].

Badanie mikroorganizmów odpornych na sól i ich wykorzystanie jako PGPB (ang. *plant growth promoting bacteria*) stanowi szansę na sprostanie wyzwaniom związanych z zasoleniem gleby i poprawę wzrostu upraw na obszarach dotkniętych zasoleniem [85, 86, 94]. W ostatnich latach nastąpił rozwój rolnictwa ekologicznego oraz stosowania metod biologicznych w uprawach. Wśród tych praktyk można wymienić stosowanie preparatów zawierających pożyteczne mikroorganizmy [95]. Preparaty mikrobiologiczne mogą mieć różne metody aplikacji oraz mechanizmy działania. Możemy wśród nich wyróżnić przede wszystkim preparaty do ograniczania rozwoju patogenów i szkodników oraz biostymulatory potęgujące wzrost i plonowanie niektórych roślin uprawnych [96, 97]. Badania wykazały, że stosowanie nawożenia mikrobiologicznego zwiększyło wilgotność nasyconą, pojemność wodną gleby, wilgotność kapilarną oraz współczynnik wędnięcia w zasolonej glebie przybrzeżnej, co przyczyniło się do złagodzenia negatywnego wpływu zasolenia na rośliny [98]. Wśród mikroorganizmów wykorzystywanych do remediacji zasolonych gleb można wymienić bakterie z rodzaju *Bacillus*, *Halomonas* czy *Salinivibrio* [87, 99]. Najnowsze doświadczenia wskazują, że łączone zabiegi biologiczne są w stanie wspomóc remediację nawet gleby solno-alkalicznej skażonej wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi [100]. Badacze wykorzystali biowęgiel wzbogacony *Martelella* sp. oraz *Suaeda salsa* L. Efektem było nie tylko usunięcie fenantrenu z gleby, ale również obniżenie pH i EC gleby.

4. Podsumowanie

Zasolenie gleb rolniczych stanowi globalny problem, którego zasięg będzie się zwiększał w nadchodzących latach. Ze względu na wzrost populacji ludzi – a co za tym idzie zwiększone zapotrzebowanie na produkcję roślinną – dbałość o gleby i ich jakość jest niezwykle istotna. Głównymi przyczynami wzrostu zawartości łatwo rozpuszczalnych soli w środowisku glebowym jest działalność przemysłowa, głównie wydobywcza, ale również niewłaściwe nawożenie i nawadnianie gruntów rolnych. Wśród naturalnych oddziaływań należy wymienić wzrost temperatury powietrza oraz zmiany w rozkładzie i ilości opadów atmosferycznych, które skutkują zatężaniem roztworu glebowego.

Ze względu na skalę oddziaływania niezwykle ważne jest zapobieganie antropogenicznym zanieczyszczeniom gleby. W celu ograniczenia przedostawania się soli do środowiska szczególnie istotna jest prawidłowa eksploatacja złóż i kopalni oraz zabezpieczanie zbiorników czy magazynów. Kompleksowe działania zapobiegawcze w przemyśle mogą znacząco ograniczyć transfer soli do środowiska naturalnego. Zrównoważona gospodarka nawozowa oraz stosowanie do nawodnień wody o odpowiednich parametrach także pozwala na zmniejszenie ryzyka zasolenia gleb.

Dzięki odpowiednim technikom agrotechnicznym (wypłukiwanie, drenaż) oraz zastosowaniu roślin o potencjale fitoremediacyjnym rolnicy mogą oczyszczać glebę z namiaru soli, a następnie wprowadzać uprawy właściwe. Ponadto wzrost roślin na obszarach zasolonych można wspomagać poprzez stosowanie preparatów mikrobiologicznych zawierających organizmy halofilne produkujące metabolity wtórne o charakterze osmoprotekcyjnym. Gleby zdegradowane na terenach przemysłowych można rekultywować z wykorzystaniem kwaśnych nawozów oraz techniki agroleśnictwa.

W obliczu wzrastającego globalnie zasięgu terenów zasolonych poszukiwanie nowych rozwiązań agrobiotechnologicznych do regeneracji gleb stanowi obszar licznych badań i wyzwanie dla nauki.

Finansowanie

Opracowanie powstało w ramach realizacji projektu nr LIDER14/0250/2023 pt. „Opracowanie innowacyjnego preparatu mikrobiologicznego o charakterze osmoprotekcyjnym do wspomagania oraz ochrony roślin uprawnych w warunkach stresu osmotycznego wywołanego zmienną wilgotnością gleby i zasoleniem” (OSMO- PROTECT) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR).

Literatura

1. Bagnall D.K., Shanahan J.F., Flanders A., Morgan C.L.S., Honeycutt C.W., *Soil health considerations for global food security*, Agronomy Journal, 113(6), 2021, s. 4581-4589.
2. Silver W.L., Perez T., Mayer A., Jones A.R., *The role of soil in the contribution of food and feed*, Philosophical Transactions Of The Royal Society B, 376(1834), 2021, 20200181.
3. Gałązka A., Łyszcz M., Abramczyk B., Furtak K., Grządziel J., Czaban J., Pikulicka A., *Bioróżnorodność środowiska glebowego – Przegląd parametrów i metod w analizach różnorodności biologicznej gleby*, Monografie i Rozprawy Naukowe IUNG-PIB, 49, Puławy 2016.
4. Bhattacharyya S.S., Ros G.H., Furtak K., Iqbal H.M.N., Parra-Saldivar R., *Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics*, Science of the Total Environment, 2022, 152928.
5. Furtak K., Wolińska A., *The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – a review*, CATENA, 231, 2023, 107378.
6. Moinet G.Y.K., Hijbeek R., van Vuuren D.P., Giller K.E., *Carbon for soils, not soils for carbon*, Global Change Biology, 29(9), 2023, s. 2384-2398.
7. Ortiz A., Sansinenea E., *The role of beneficial microorganisms in soil quality and plant health*, Sustainability, 14(9), 2022, 5358.
8. Furtak K., Gałązka A., *Edaphic factors and their influence on microbiological biodiversity of the soil environment*, Advancements of Microbiology – Postępy Mikrobiologii, 58(4), 2019, s. 375-384.
9. Butcher K., Wick, A.F., DeSutter T., Chatterjee A., Harmon J., *Soil salinity: a threat to global food security*, Agronomy Journal, 108(6), 2016, s. 2189-2200.
10. Tołoczko W., Szmidt A., Fijałkowski R., *Wpływ tężni solankowych na właściwości gleb miasta Ciechocinek*, Acta Universitatis Lodzinsis Folia Geographica Physica, 22, 2023, s. 85-100.
11. Gliniak M., Sobczyk W., *Antropogeniczne procesy zasolenia gleb*, Czasopismo Uniwersytetu Rzeszowskiego, 7, 2013, s. 271-277.

12. Khamidov M., Ishchanov J., Hamidov A., Donmez C., Djumaboev K., *Assessment of soil salinity changes under the climate change in the Khorezm Region, Uzbekistan*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(14), 2022, 8794.
13. Venâncio C., Ribeiro R., Lopes I., *Seawater intrusion: an appraisal of taxa at most risk and safe salinity levels*, Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 97, 2022, s. 361-382.
14. Singh A., *Soil salinity: A global threat to sustainable development*, Soil Use and Management, 38, 2022, s. 39-67.
15. Łuczak K., Czerniawska-Kusza I., Rosik-Dulewska C., Kusza G., *Effect of NaCl road salt on the ionic composition of soils and Aesculus hippocastanum L. foliage and leaf damage intensity*, Scientific Reports, 11, 2021, 5309.
16. Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M., Shatkay R.R., Shelton S.A., Grant S.B., Utz R.M., Yaculak A.M., Maas C.M., Reimer J.E., Bhide S.V., Malin J.T., Rippey M.A., *The anthropogenic salt cycle*, Nature Reviews Earth & Environment, 4, 2023, s. 770-784.
17. Mohanavelu A., Naganna S.R., Al-Ansari N., *Irrigation induced salinity and sodicity hazards on soil and groundwater: an overview of its causes, impacts and mitigation strategies*, Agriculture, 11(10), 2021, 983.
18. Ramos T.B., Castanheira N., Oliveira A.R., Paz A.M., Darouich H., Simionesei L., Farzamian M., Gonçalves M.C., *Soil salinity assessment using vegetation indices derived from Sentinel-2 multispectral data. application to Lezíria Grande, Portugal*, Agricultural Water Management, 214, 2020, 106387.
19. Trzciński W. (red.), *Systematyka Gleb Polski*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
20. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Komisja Genezy Klasyfikacji i Kartografii Gleb, *Sytematyka gleb Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Wrocław–Warszawa 2019.
21. Shokri N., Hassani A., Sahimi M., *Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review*, Reviews of Geophysics, 62, 2024, e2023RG000804.
22. Singh B.J., Chakraborty A., Sehgal R., *A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers*, Journal of Environmental Management, 348, 2023, 119230.
23. Hulisz P., *Wybrane aspekty badań gleb zasolonych w Polsce*, Stowarzyszenie Oświatowców Polskich, Toruń 2007.
24. Lu Z., Wang H., Wang Z., Liu J., Li Y., Xia L., Song S., *Critical steps in the restoration of coal mine soils: Microbial-accelerated soil reconstruction*, Journal of Environmental Management, 368, 2024, 122200.
25. Sharkh B.A., Al-Amoudi A.A., Farooque M., Fellows C.M., Ihm S., Lee S., Li S., Voutchkov N., *Seawater desalination concentrate - a new frontier for sustainable mining of valuable minerals*, npj Clean Water 5(9), 2022.
26. Kalwasińska A., Hulisz P., Szabo A., Kumar S.B., Michalski A., Solarczyk A., Wojciechowska A., Piernik A., *Technogenic soil salinisation, vegetation, and management shape microbial abundance, diversity, and activity*, Science of the Total Environment, 905, 2023, 167380.
27. Mlitan A.B., *Cement dust pollution and environment*, [w:] Ahmad M.I., Mahamood M., Javed M., Alhewairini S.S. (red.), *Toxicology and human health*, Springer, Singapore 2023.
28. Baraza T., Hasenmueller E.A., *Road salt retention and transport through vadose zone soils to shallow groundwater*, Science of the Total Environment, 755(1), 2021, 142240.
29. Tołoczko W., Niewiadomski A., Trawczyńska A., *Influence of salinity on the sorptive features in soils of Lodz city centre*, Ecological Chemistry and Engineering A, 16, 2009, s.465-474.

30. Szklarek S., Górecka A., Witczak R., Drobniewska A., Nałęcz-Jawecki G., Mankiewicz-Boczek J., Jurczak T., Mazur-Marzec H., Wojtal-Frankiewicz A., *Zastosowanie biotestów do oceny ekotoksyczności wód narażonych na zasolenie*, [w:] *Krajowa Konferencja EkoBioTox – Znaczenie ekotoksykologii, bioindykacji, biodegradacji w identyfikacji i rozwiązywaniu problemów środowiskowych w dobie antropocenu i zmiany klimatu od skali molekularnej do krajobrazowej. Księga abstraktów. Łódź 19–21.05.2023*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2023, s. 79–81.
31. Pahalvi H.N., Rafiya L., Rashid S., Nisar B., Kamili A.N., *Chemical fertilizers and their impact on soil health*, [w:] Dar G.H., Bhat R.A., Mehmood M.A., Hakeem K.R. (red.), *Microbiota and biofertilizers*, 2, Springer, Cham 2021.
32. Telesiński A., *Wpływ zasolenia na wybrane biochemiczne wskaźniki żyzności gleby*, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 12(37), 2012, s. 209–217.
33. Peña A., Delgado-Moreno L., Rodríguez-Liébana J.A., *A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: Effect of some soil and solution properties*, *Science of The Total Environment*, 718, 2020, 134468.
34. Rahman M.M., Shahrivar A.A., Hagare D., Maheshwari B., *Impact of Recycled Water Irrigation on Soil Salinity and Its Remediation*, *Soil Systems*, 6(1), 2021, s. 13.
35. Trzcińska-Tacik H., *Aktualne zagrożenia dla populacji halofitów nad dolną Nidą i na Pogórzu Karpackim*, Konferencja Rzadkie, ginące i reliktowe gatunki roślin i grzybów. Problemy zagrożenia i ochrony różnorodności flory, Instytut Botaniki PAN, Wydział Leśny AR w Krakowie, Kraków 2006.
36. Maciak F., *Ochrona i rekultywacja środowiska*, Wydawnictwo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa 1999.
37. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB, *Monitoring chemizmu gleb ornych Polski*, https://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/ [data dostępu: 28.03.2025].
38. Filipiak K., *Uwarunkowania produkcji rolniczej na obszarach gleb silnie zakwaszonych*, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 12, 2008, s. 113–122.
39. Hulisz P., *Propozycje systematyki gleb zasolonych występujących w Polsce*, *Roczniki Gleboznawcze*, 58(1-2), 2007, s. 121–129.
40. Osman K.T., *Saline and sodic soils*, [w:] Osman K.T. (red.), *Management of soil problems*, Springer, Cham 2018, s. 255–298.
41. Shrivastava P., Kumar R., *Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation*, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 2015, s. 123–131.
42. Chandrasekaran M., Boughattas S., Hu S., Oh S.H., Sa T., *A meta-analysis of arbuscular mycorrhizal effects on plants grown under salt stress*, *Mycorrhiza*, 3, 2014, s. 611–625.
43. Jamil A., Riaz S., Ashraf M., Foolad M.R., *Gene expression profiling of plants under salt stress*, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(5), 2011, s. 435–458.
44. Leciejewski P., *Wykorzystanie metody TDR do ciągłego pomiaru zmian warunków wilgotnościowych i termicznych w profilu glebowym*, *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 2(21), 2009, s. 235–246.
45. Horváth J., Kátai L., Szabó I., Korzenszky P., *An electrical conductivity sensor for the selective determination of soil salinity*, *Sensors*, 24(11), 2024, 3296.
46. Bado S., Forster B.P., Ghanim A.M.A., Jankowicz-Cieslak J., Berthold G., Luxiang L., *Protocol for measuring soil salinity*, [w:] *Protocols for pre-field screening of mutants for salt tolerance in rice, wheat and barley*, Springer, Cham 2016.
47. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Guidelines for soil description*, 4th Edition, Rzym 2006, s. 97.
48. Akhtar M., Hussain F., Ashraf M.Y., Qureshi T.M., Akhter J., Awan, A.R., *Influence of salinity on nitrogen transformations in soil*, *Communications in Soil Science and Plant*

- Analysis, 43(12), 2012, s. 1674-1683, DOI:
<https://doi.org/10.1080/00103624.2012.681738>.
49. Setia R., Gottschalk P., Smith P., Marschner P., Baldock J., Setia D., Smith J., *Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks*, Science of The Total Environment, 465, 2013, s. 267-272.
50. Bidalia A., Vikram K., Yamal G., Rao K.S., *Effect of salinity on soil nutrients and plant health*, [w:] Akhtar M. (red.), *Salt stress, microbes, and plant interactions: causes and solution*, Springer, Singapore 2019.
51. Pan J., Xue X., Huang CH., You QG., Guo L., Yang R.Q., Da F.W., Duan Z.W., Peng Z., *Effect of salinization on soil properties and mechanisms beneficial to microorganisms in salinized soil remediation – a review*, Research in Cold and Arid Regions, 16(3), 2024, s. 121-128.
52. Yang C., Chen Y., Sun W., Zhang Q., Diao M., Sun J., *Extreme soil salinity reduces N and P metabolism and related microbial network complexity and community immigration rate*, Environmental Research, 264(1), 2025, 120361.
53. Carillo P., Annunziata M.G., Pontecorvo G., Fuggi A., Woodrow P., *Salinity stress and salt tolerance*, [w:] Shanker A., Venkateswarlu B. (red.), *Abiotic stress in plants – mechanisms and adaptations*, InTechOpen, Londyn 2011, 21-38.
54. Andronov E.E., Petrova S.N., Pinaev A.G., Pershina E.V., Rakhgimgalieva S.Zh., Akhmedenov K.M., Gorobets A.V., Sergaliev N.Kh., *Analysis of the structure of the microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques*, Eurasian Soil Science, 45, 2012, s. 147-156.
55. Rietz D.N., Haynes R.J., *Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity*, Soil Biology and Biochemistry, 35, 2003, s. 845-854.
56. Läuchli A., Grattan S., *Plant growth and development under salinity stress*, [w:] Jenks M.A., Hasegawa P.M., Jain S.M. (red.), *Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops*, Springer, Dordrecht 2017.
57. Fedoreyeva L.I., Lazareva E.M., Shelepova O.V., Baranova E.N., Kononenko N.V., *Salt-induced autophagy and programmed cell death in wheat*, Agronomy, 12(8), 2022, 1909.
58. Saeedi R., Seyedi A., Esmailizadeh M., Seyedi N., Zahedi S.M., Malekzadeh M.R., *Improving the performance of the photosynthetic apparatus of Citrus sinensis with the use of chitosan-selenium nanocomposite (CS + Se NPs) under salinity stress*, BMC Plant Biology, 24, 2024, 745.
59. Koźmińska A., Kamińska I., Hanus-Fajerska E., *Rola osmolitów w tolerancji roślin na stres zasolenia*, [w:] Bajguz A., Ciereszko I. (red.), *Różnorodność biologiczna – od komórki do ekosystemu. Rośliny i grzyby – badania środowiskowe i laboratoryjne*, Agencja Wydawnicza EkoPress, Białystok 2016, s. 113-126.
60. Siuta J., *Gleba: diagnozowanie stanu i zagrożenia*, Dział Informacji i Wydawnictw Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa 1995.
61. Machado R.M.A., Serralheiro R.P., *Soil Salinity: Effect on vegetable crop growth. management practices to prevent and mitigate soil salinization*, Horticulturae, 3(2), 2017, 30.
62. Mustafa G., Akhtar M.S., *Crops and methods to control soil salinity*, [w:] Akhtar M. (red.), *Salt stress, microbes, and plant interactions: mechanisms and molecular approaches*, Springer, Singapore 2019, s. 237-251.
63. Paz A.M., Amezketa E., Canfora L., Castanheira N., Falsone G., Goncalves M.C., Gould I., Hristov B., Mastroilli M., Ramos T., Thompson R., Costantini E.A.C., *Salt-affected soils: field-scale strategies for prevention, mitigation, and adaptation to salt accumulation*, Italian Journal of Agronomy, 18(2), 2023, 2166.
64. Elmeknassi M., Elghali A., de Carvalho H.W.P., Laamrani A., Benzaazoua M., *A review of organic and inorganic amendments to treat saline-sodic soils: Emphasis on waste*

- valorization for a circular economy approach, *Science of the Total Environment*, 291, 2024, 171087.
65. Alcívar M., Zurita-Silva A., Sandoval M., Muñoz C., Schoebitz M., *Reclamation of saline-sodic soils with combined amendments: impact on quinoa performance and biological soil quality*, *Sustainability*, 10(9), 2018, 3083.
66. Khan M., Azom M., Sultan M., Mandal S., Islam M., Khatun R., Billah S., Ali A., *Amelioration of saline soil by the application of gypsum, calcium chloride, rice husk and cow dung*, *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 8, 2019, s. 78-91.
67. Poulouse T., Kumar S., Ganjegunte G.K., *Robust crop water simulation using system dynamic approach for participatory modeling*, *Environmental Modelling & Software*, 135, 2021, 1048899.
68. Laudicina V.A., Hurtado M.D., Badalucco L., Delgado A., Palazzolo E., Panno M., *Soil chemical and biochemical properties of a salt-marsh alluvial Spanish area after long-term reclamation*, *Biology and Fertility of Soils*, 45, 2009, s. 691-700.
69. Belal E.E., El Sowfy D.M., Rady M.M., *Integrative soil application of humic acid and sulfur improves saline calcareous soil properties and barley plant performance*, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(15), 2019, s. 1919-1930.
70. Liu J., Xie W., Yang J., Yao R., Wang X., Li W., *Effect of different fertilization measures on soil salinity and nutrients in salt-affected soils*, *Water*, 15(18), 2023, 3274.
71. Zhang C., Qiao Y., Song Q., *Practice of improving saline-alkali soil with bio-humic acid*, *Processes*, 12(6), 2024, 1250.
72. Song J., Zhang H., Chang F., Yu R., Zhang X., Wang X., Wang W., Liu J., Zhou J., Li Y., *Humic acid plus manure increases the soil carbon pool by inhibiting salinity and alleviating the microbial resource limitation in saline soils*, *CATENA*, 233, 2023, 107527.
73. Chen H., Ren A., Hu Z., Jia C., Wang J., *Effects of irrigation and fertilization on soil salt migration, yield, and water use efficiency of winter wheat in the Yellow River Delta*, *Crop Science*, 62(4), 2022, s. 1584-1602.
74. El-Mageed T.A.A., Mekdad A.A.A., Rady M.O.A., Abdelbaky A.S., Saady H.S., Shaaban A., *Physio-biochemical and agronomic changes of two sugar beet cultivars grown in saline soil as influenced by potassium fertilizer*, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 2022, s. 3636-3654.
75. Gołda T., *Rekultywacja*, Uczelnianie Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
76. Wójcik M., *Fitoremediacja - sposób oczyszczania środowiska*, *KOSMOS Problemy Nauk Biologicznych*, 49(1-2), 2000, s. 135-147.
77. Bonaventure P., Guentas L., Burtet-Sarramegna V., Amir H., *Potential of halophytes-associated microbes for the phytoremediation of metal-polluted saline soils*, *Applied Sciences*, 13(7), 2023, 4228.
78. Qadir M., Oster J.D., Schubert S., Noble A.D., Sahrawat K.L., *Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils*, *Advances in Agronomy*, 96, 2007, s. 197-247.
79. Shah S.H.H., Wang J., Hao X., Thomas B.W., *Modelling soil salinity effects on salt water uptake and crop growth using a modified denitrification-decomposition model: A phytoremediation approach*, *Journal of Environmental Management*, 301, 2022, 113820.
80. Diagne N., Arumugam K., Ngom M., Nambiar-Veetil M., Franche C., Narayanan K.K., Laplace L., *Use of Frankia and actinorhizal plants for degraded lands reclamation*, *BioMed Research International*, 2013, 948258.
81. Mathur M., Mathur P., *Restoration of saline and sodic soil through using halophytes as agroforestry components*, [w:] Chakravarty S., Vineeta I., Bhrat J.A., Kumar M., Shukla G. (red.), *Sustainable management and conservation of environmental resources in India*, Apple Academic Press, New York 2024, s. 44.

82. Farzi A., Borghesi S.M., Vossoughi M., *The use of halophytic plants for salt phytoremediation in constructed wetlands*, International Journal of Phytoremediation, 19(7), 2017, s. 643-650.
83. Nouri H., Borujeni S.C., Nirola R., Hassanli A., Beecham S., Alaghmand S., Saint C., Mulcahy D., *Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation*, Process Safety and Environmental Protection, 107, 2017, s. 94-107.
84. Wang J., Liu Y., Ma Y., Wang X., Zhang B., Zhang G., Bahadur A., Chen T., Liu G., Zhang W., Zhao Y., *Research progress regarding the role of halophilic and halotolerant microorganisms in the eco-environmental sustainability and conservation*, Journal of Cleaner Production, 418, 2023, 138054.
85. Oren A., *Novel insights into the diversity of halophilic microorganisms and their functioning in hypersaline ecosystems*, npj Biodiversity, 3(18), 2024.
86. Dutta B., Bandopadhyay R., *Biotechnological potentials of halophilic microorganisms and their impact on mankind*, Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 11(75), 2022.
87. Goswami S.K., Kashyap A.S., Kumar R., Gujjar R.S., Singh A., Manzar N., *Harnessing rhizospheric microbes for eco-friendly and sustainable crop production in saline environments*, Current Microbiology, 81(14), 2024.
88. Omara A.M.A., Sharaf A.E.M.M., El-Hela A.A., Shahin A.A.M., El-Bialy H.E.A., El-Fouly M.Z., *Optimizing ectoine biosynthesis using response surface methodology and osmoprotectant applications*, Biotechnology Letters, 42, 2020, s. 1003-1017.
89. Morcillo R.J.L., Vilchez J.I., Zhang S., Kaushal R., He D., Zi H., Liu R., Niehaus K., Handa A.K., Zhang H., *Plant transcriptome reprogramming and bacterial extracellular metabolites underlying tomato drought resistance triggered by a beneficial soil bacteria*, Metabolites, 11(6), 2021, 369.
90. Fouda A., Eid A.M., Elsaied A., El-Belely E.F., Barghoth M.G., Azab E., Gobouri A.A., Hassan S.E-D., *Plant growth-promoting endophytic bacterial community inhabiting the leaves of Pulicaria incisa (Lam.) DC inherent to arid regions*, Plants, 10(1), 2021, 76.
91. Wingender J., Neu T.R., Flemming H-C., *What are bacterial extracellular polymeric substances?*, [w:] Wingender J., Neu T.R., Flemming H-C. (red.), *Microbial Extracellular Polymeric Substances*, Springer, Berlin 1999, s. 1-19.
92. Sandhya V., Ali S.Z., *The production of exopolysaccharide by Pseudomonas putida GAP-P45 under various abiotic stress conditions and its role in soil aggregation*, Microbiology, 84, 2015, s. 512-519.
93. Costa O.Y.A., Raaijmakers J.M., Kuramae E.E., *Microbial extracellular polymeric substances: ecological function and impact on soil aggregation*, Frontiers in Microbiology, 9, 2018, 1636.
94. Zhang G., Bai J., Zhai Y., Jia J., Zhao Q., Wang W., Hu X., *Microbial diversity and functions in saline soils: A review from a biogeochemical perspective*, Journal of Advanced Research, 59, 2024, s. 129-140.
95. Castiglione A.M., Mannino G., Contartese V., Berteau C.M., Ertani A., *Microbial biostimulants as response to modern agriculture needs: composition, role and application of these innovative products*, Plants, 10(8), 2021, 1533.
96. Martyniuk S., *Skuteczne i nieskuteczne preparaty mikrobiologiczne stosowane w ochronie i uprawie roślin oraz rzetelne i nierzetelne metody ich oceny*, Postępy Mikrobiologii, 50(4), 2011, s. 321-328.
97. Gałązka A., Podleśny J. (red.), *Preparaty mikrobiologiczne w rolnictwie i ochronie środowiska*, Wydawnictwo IUNG-PIB, Puławy 2024.
98. Yang X., Zhang K., Chang T., Shaghaleh H., Qi Z., Zhang J., Ye H., Hamoud Y.A., *Interactive effects of microbial fertilizer and soil salinity on the hydraulic properties of salt-affected soil*, Plants, 13(4), 2024, 473.

99. Pan L., Cai B., *Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects*, Microorganisms, 11(12), 2023, 2904.
100. Cui C., Shen J., Zhu Y., Chen X., Liu S., Yang J., *Bioremediation of phenanthrene in saline-alkali soil by biochar – immobilized moderately halophilic bacteria combined with Suaeda salsa L*, Science of the Total Environment, 880, 2023, 163279.

Zasolenie gleb rolniczych – przyczyny, skutki, perspektywy

Streszczenie

Stres osmotyczny związany z zasoleniem jest jednym z głównych stresów abiotycznych oraz bezpośrednio wpływa na wzrost i plonowanie roślin. W rolnictwie obserwuje się nadmierne stosowanie nawozów mineralnych w formie soli, a w przemyśle – nieprawidłowe magazynowanie odpadów. W rezultacie zjawisko stresu osmotycznego występuje coraz częściej jako bezpośredni skutek zasolenia gleb. Wpływa to na jakość gleby, mikroorganizmy glebowe oraz rośliny uprawne. Niniejszy rozdział poświęcony jest omówieniu źródeł nadmiaru soli w środowisku, skutków zasolenia gleb, a także metod rekultywacji zdegradowanych siedlisk. Słowa kluczowe: akumulacja soli, remediacja, mikrobiologia, środowisko glebowe

Salinisation of agricultural soils – causes, implications, prospects

Abstract

Salinity-induced osmotic stress is one of the most important abiotic stresses that has a direct impact on plant growth and yield. In agriculture, excessive use of mineral fertilisers in the form of salts is observed, and in industry – inappropriate storage of waste. As a result, the phenomenon of osmotic stress, a direct consequence of soil salinity, is becoming increasingly common. This affects soil quality, soil micro-organisms and crops. This chapter discusses the sources of excess salt in the environment, the effects of salinised soils and methods of restoring degraded habitats.

Keywords: salt accumulation, remediation, microbiology, soil environment