

**METODY OGRANICZENIA
WPŁYWU SKAŻEŃ ŚRODOWISKOWYCH
NA PRODUKTY SPOŻYWCZE
WYTWARZANE W REGIONIE MAŁOPOLSKI**



**Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin PIB
Zakład Doświadczalny Grodkowice**

**METODY OGRANICZENIA
WPŁYWU SKAŻEŃ ŚRODOWISKOWYCH
NA PRODUKTY SPOŻYWCZE
WYTWARZANE W REGIONIE MAŁOPOLSKI**

Grzegorz Żurek

**METODY OGRANICZENIA
WPŁYWU SKAŻEŃ ŚRODOWISKOWYCH
NA PRODUKTY SPOŻYWCZE
WYTWARZANE W REGIONIE MAŁOPOLSKI**

Grzegorz Żurek

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin PIB
Radzików, 05 – 870 Błonie
Radzików 2021

Fotografie: M. Starzycki (ryc. 3); Z. Bodzon (ryc. 4);
D. Martyniak (rys. 8, 12); G. Żurek (ryc. 8, 9, 11)

Fotografie na okładce: <https://www.rynek-rolny.pl> (górne lewe), <https://www.czystapromocjalg.pl/jak-uprzyc-slonecznik-poznaj-sposob-na-smaczny-prazon-slonecznik/> (górne prawe), M. Starzycki (dolne lewe), Z. Bodzon (dolne prawe)

Opracowanie redakcyjne i korekta: Dorota Kowalewska

Opracowanie graficzne i skład: Wydawnictwo BioDar

Wydawca:

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin
Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Doświadczalny Grodkowice
Grodkowice 1, 32-015 Kłaj

Wydawnictwo BioDar
Konarzyce, ul. Łomżyńska 210, 18-400 Łomża
www.biodar.com.pl/wydawnictwo.php

ISBN: 978-83-935777-8-1

Kraków 2021

Wydanie: I

Nakład: 500 egzemplarzy

Druk:

PBMedia sp. z o.o.
al. J. Piłsudskiego 73, 10-449 Olsztyn

© Copyright by Województwo Małopolskie

Publikację wydano dzięki pomocy finansowej Województwa Małopolskiego

Spis treści

1. Tereny uprawne a skażenia gleb	7
1.1. Zanieczyszczenie gleb województwa małopolskiego metalami ciężkimi	13
2. Metody ograniczenia transmisji substancji szkodliwych zawartych w glebach do roślin uprawnych	18
2.1. Wapnowanie – ograniczanie poziomu kwasowości gleb	20
2.1.1. Nawozy wapniowe tlenkowe	20
2.1.2. Nawozy wapniowe węglanowe (wapniak mielony, kreda)	21
2.1.3. Nawozy wapniowo-magnezowe	21
2.2. Stosowanie sorbentów mineralnych i organicznych	22
2.2.1. Tlenki żelaza, manganu i glinu	22
2.2.2. Naturalne i syntetyczne glinokrzemiany	24
2.2.3. Popioły lotne	26
2.2.4. Związki fosforu	27
2.2.5. Materia organiczna	28
2.3. Wykorzystanie mikroorganizmów do biologicznej utylizacji skażeń – biosorpcja	31
3. Fitoremediacja – wykorzystanie roślin w procesie biologicznego oczyszczania gleb uprawnych	33
3.1. Charakterystyka gatunków roślin do uprawy na terenach o podwyższonej zawartości metali ciężkich	41
3.1.1. Gatunki uprawne	41
Gorzycza sarepska	41
Rzepak ozimy	43
Lucerna siewna	47
Słonecznik zwyczajny	52
Len zwyczajny	54
Konopie siewne	57
3.1.2. Trawy	61
Perz wydłużony (wydmuchrzyca wydłużona)	61
Kostrzewa trzcinowata	65
3.1.3. Gatunki dedykowane na cele energetyczne	69
Wierzba	69
Ślazier pensylwański	72
Rożnik przerośnięty	77

3.2. Możliwości w zakresie utylizacji roślin wzbogaconych o substancje szkodliwe	80
4. Gatunki poplonowe	82
Facelia wrotczolistna	82
Łubin wąskolistny	85
Gorzycza biała	87
5. Katalog dobrych praktyk rolniczych dla ograniczenia wpływu skażeń środowiskowych zdeponowanych w glebach uprawnych na produkty spożywcze wytwarzane w regionie	91
Literatura	95
Indeks nazw polskich i łacińskich	98

1. Tereny uprawne a skażenia gleb

Rozwój rolnictwa oraz wzrost jego efektywności jest ściśle uzależniony od dostępu do gruntów wysokiej jakości. Jakość gleb w Polsce nie należy do najwyższych. Dominują gleby średnio urodzajne i słabe. Najbardziej urodzajne gleby – czarnoziemy, czarne ziemie i mady stanowią niewielki odsetek użytków rolnych w Małopolsce, na Lubelszczyźnie, Opolszczyźnie, Dolnym Śląsku, Nizinie Szczecińskiej i Żuławach Wiślanych. Z kolei udział gleb lekkich, odznaczających się wysoką zawartością piasku, wynosi ok. 61% powierzchni gruntów rolniczych, co stanowi dwukrotnie większą wartość w porównaniu do średniej dla Unii Europejskiej (32%). W Polsce stosunkowo dużą powierzchnię zajmują gleby nieprzydatne do efektywnej produkcji roślinnej, stanowiąc ok. 10% ogólnej powierzchni gruntów rolnych w kraju. Część z tych terenów podlega procesowi ugorowania i odłogowania, co w sposób oczywisty niekorzystnie wpływa na całokształt kondycji finansowej ich dysponentów. Gleby słabe i zdegradowane wymagają poprawy zarówno potencjału sorpcyjnego, jak i zawartości składników pokarmowych, aby mogły stanowić wartościowe podłoże do wegetacji roślin. Wynika to zarówno z ich niekorzystnego (w kontekście rozwoju roślin) składu mechanicznego, jak i bardzo często dodatkowych utrudnień natury chemicznej, na przykład nadmiernego zasolenia lub skażenia metalami ciężkimi.

Ogólna zawartość zanieczyszczeń chemicznych (metali i związków organicznych) w glebach użytkowanych rolniczo w Polsce nie odbiega od poziomu notowanego w są-

siednich krajach europejskich (Maliszewska-Kordybach i in. 2013). Efektem dynamicznego rozwoju przemysłu, motoryzacji i chemizacji rolnictwa jest przedostawanie się do gleb, a następnie do roślin, coraz to większych ilości metali ciężkich, takich jak ołów (Pb), kadm (Cd), cynk (Zn), nikiel (Ni), miedź (Cu).

Niektóre z tych pierwiastków są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych (np. miedź i cynk), inne zaś – jak kadm, ołów czy arsen (As) – są przyczyną wielu chorób. Skutki zdrowotne systematycznego spożywania produktów zawierających niewielkie ilości metali ciężkich mogą ujawnić się dopiero po wielu latach, co jest efektem ich zdolności do kumulacji w organizmie. Metale ciężkie wpływają na metabolizm wapnia zwiększając łamliwość kości, mogą również zaburzać funkcjonowanie układu nerwowego powodując otępienie, upośledzenie umysłowe, zaburzenia wzroku i koordynacji ruchów, uszkodzenia wątroby i nerek, wywołują również zmiany nowotworowe. W glebach metale ciężkie występują powszechnie na skutek uwalniania się ze skał macierzystych w procesach glebotwórczych oraz podczas wybuchów wulkanów. Ich naturalny poziom nie stanowi zagrożenia dla ekosystemów. Średnie zawartości metali ciężkich w glebach użytków rolnych Polski są nieduże i przykładowo wynoszą: kadm – 0,21 mg/kg, miedź – 6,5 mg/kg, nikiel – 6,2 mg/kg, ołów – 13,6 mg/kg, cynk – 32,4 mg/kg (Woch 2007). Wartości dopuszczalne w glebach użytkowanych rolniczo, według aktualnie obowiązujących przepisów, podano w tabeli 1.

Ponad 96% gleb ornych charakteryzuje się naturalną lub nieco podwyższoną zawartością metali ciężkich, co pozwala zaklasyfikować je jako gleby o wysokiej jakości, na których mogą być uprawiane wszystkie rośliny, ewentualnie z ograniczeniem (przy podwyższonej zawartości metali ciężkich) uprawy warzyw na przetwory i do bezpośredniej konsumpcji dla dzieci (GIOŚ 2014). Z powyższego wynika równocześnie, że ponad 3% gleb jest zanieczyszczonych metalami ciężkimi w stopniu wykluczającym uprawę na cele konsumpcyjne. Kationowe formy metali ciężkich zatrzymywane są w powierzchniowej warstwie gleby a ich migracja w głąb profilu glebowego jest stosunkowo wolna. Jest to jedną z głównych przyczyn degradacji chemicznej gleby (Kabata-Pendias i Pendias 1993). Tego typu zagrożenie dla produkcji roślinnej występuje głównie na terenach uprzemysłowionych oraz w pobliżu dróg, gdzie wraz ze spalinami, ściekami lub pyłami przemysłowymi metale ciężkie pobierane są przez rośliny i włączane do łańcucha pokarmowego.

Do nadmiernego nagromadzenia metali ciężkich w glebach i roślinach doprowadził rozwój przemysłu i komunikacji, nieracjonalne stosowanie w rolnictwie środków ochrony roślin, nawozów mineralnych i organicznych (np. wytwarzane z odpadów komunalnych komposty i osady ściekowe). Intensywne użytkowanie szlaków komunikacyjnych emituje duże ilości substancji szkodliwych do środowiska. Głównymi komponentami zanieczyszczeń komunikacyjnych są tlenki azotu, tlenki siarki, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne oraz metale ciężkie, takie jak

Tabela 1. Dopuszczalne zawartości metali ciężkich w glebach według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. (wartości wyrażone w mg/kg suchej gleby w warstwie przypowierzchniowej 0–0,2 m)

Metal	Kategorie (grupy) gruntów*					
	I	II			III	IV
		II-1	II-2	II-3		
Arsen (As)	25	10	20	50	50	100
Bar (Ba)	400	200	400	600	1 000	1 500
Chrom (Cr)	200	150	300	500	500	1 000
Cynk (Zn)	500	300	500	1 000	1 000	2 000
Kadm (Cd)	2	2	3	5	10	15
Kobalt (Co)	50	20	30	50	100	200
Miedź (Cu)	200	100	150	300	300	600
Molibden (Mo)	50	10	25	50	100	250
Nikiel (Ni)	150	100	150	300	300	500
Ołów (Pb)	200	100	250	500	500	600
Rtęć (Hg)	0,5	2	4	5	10	30

(*) Grupy gruntów (wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016, Dz. U. z 5 września 2016, poz. 1395):

Grupa gruntów I:

- a) tereny mieszkaniowe,
- b) inne tereny zabudowane,
- c) zurbanizowane tereny niezabudowane lub w trakcie zabudowy, oznaczone symbolem Bp,
- d) grunty rolne zabudowane,
- e) tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, w tym: tereny ośrodków wypoczynkowych, tereny zabaw dziecięcych, plaże, urządzone parki, skwery, zieleńce (poza pasami ulic), tereny sportowe, takie jak: stadiony, boiska sportowe, skocznie narciarskie, tory saneczkowe, strzelnice sportowe, kąpieliska, pola golfowe, tereny spełniające funkcje rozrywkowe, takie jak: lunaparki i wesołe miasteczka, ogrody zoologiczne i botaniczne.



► Grupa gruntów II:

- a) grunty orne oraz tereny rodzinnych ogrodów działkowych urządzonych na gruntach ornym,
- b) sady, łąki i pastwiska trwałe,
- c) grunty pod stawami oraz pod rowami,
- d) tereny rodzinnych ogrodów działkowych urządzonych na terenach rekreacyjno-wypoczynkowych.

W grupie tej wydziela się dodatkowo podgrupy w zależności od struktury i odczynu (pH) gleby:

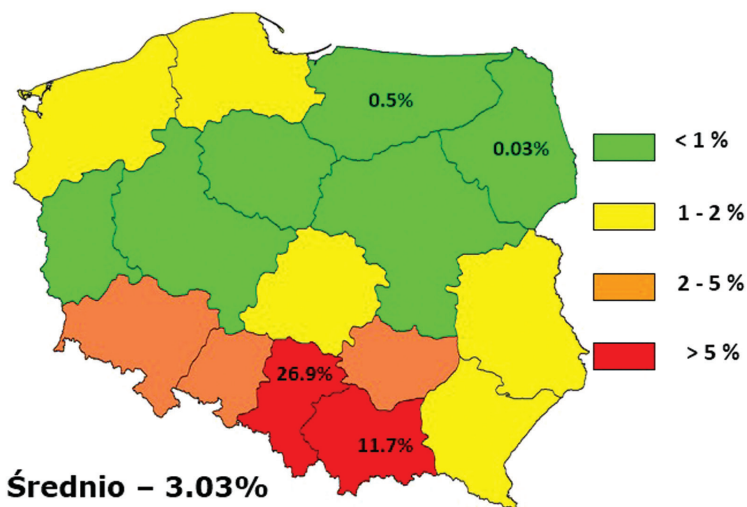
- podgrupa II-1: gleby mineralne bardzo lekkie i lekkie, o wartości pH_{KCl} mniejszej lub równej 6,5,
- podgrupa gruntów II-2: gleby mineralne lekkie, pH_{KCl} powyżej 6,5,
- gleby mineralne średnie i ciężkie, pH_{KCl} mniej lub równe 5,5,
- gleby mineralno-organiczne, o zawartości C org. 3,5–6%, niezależnie od wartości pH_{KCl} ,
- podgrupa gruntów II-3: gleby mineralne średnie i ciężkie pH_{KCl} wyższej niż 5,5, gleby mineralno-organiczne i organiczne, o zawartości węgla organicznego ponad 6%, niezależnie od odczynu.

Grupa gruntów III:

- a) lasy, grunty zadrzewione i zakrzewione również na użytkach rolnych, nieużytki,
- b) tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, w tym: tereny o charakterze zabytkowym, takie jak: ruiny zamków, grodziska, kurhany, pomniki przyrody, tereny zieleni nieurządzonej niezaliczone do lasów oraz gruntów zadrzewionych i zakrzewionych,
- c) użytki ekologiczne i tereny różne.

Grupa gruntów IV:

- a) tereny przemysłowe,
- b) użytki kopalne,
- c) tereny komunikacyjne, w tym: drogi, tereny kolejowe, inne tereny komunikacyjne, grunty przeznaczone pod budowę dróg publicznych lub linii kolejowych.



Ryc. 1. Skażenie gleb rolniczych w Polsce metalami ciężkimi. Kolorami wskazano udział procentowy (%) gleb użytkowanych rolniczo, zanieczyszczonych metalami ciężkimi (łączna zawartość kadmu, ołowiu, miedzi, niklu i cynku) w stopniu co najmniej podwyższonym.

Źródło: Woch (2007), zmienione.

ołów, chrom i kadm (Bezak-Mazur 2001). Źródłem pochodzenia ołowiu może być benzyna, kadmu – komponenty konstrukcyjne pojazdów, opony czy środki nawilżające. Chrom z kolei może pochodzić z korodujących części metalowych pojazdów (Christoforidis i Stamatidis 2009). Ponad 90% ogólnej zawartości kadmu, miedzi, cynku i ołowiu w glebach oraz osadach rzek i innych zbiorników wodnych pochodzi z zanieczyszczeń antropogenicznych (Kyzioł 1994). Szczególnie wysoką zawartość metali ciężkich w glebie stwierdzono w rejonach sąsiadujących z hutami (Kabała i Singh 2001) i kopalniami (Roszyk i Szerszeń 1988;

Pasieczna 2002). Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi ma zatem w Polsce charakter lokalny i dotyczy głównie obszaru Polski południowej ze szczególnym uwzględnieniem Śląska oraz Małopolski.

W poprzednich latach głównymi nośnikami metali ciężkich w rolnictwie były zwłaszcza pestycydy, które wchodziły w skład substancji czynnej (np. związki arsenu, miedzi, rtęci, cynku lub ołowiu; Terelak i in. 2000). Obecnie zastąpiono je różnego rodzaju połączeniami organicznymi. W odniesieniu do zawartości metali ciężkich w środowisku glebowym często używany jest termin tzw. tła (Bezak-Mazur 2001). Wartości wyższe od tła uważane są za dowód na zanieczyszczenie środowiska. Przykładowo dla zawartości ołowiu w glebie wartości tła wahają się pomiędzy 20 a 40 mg/kg, dla kadmu 0,05–0,70 mg/kg, a dla chromu 15–60 mg/kg (Bezak-Mazur 2001).

1.1. Zanieczyszczenie gleb województwa małopolskiego metalami ciężkimi

Powierzchnia gleb użytkowanych rolniczo w województwie małopolskim to łącznie ponad 272 tys. ha, z czego gleby o najniższej przydatności rolniczej (najgorsze) stanowią ok. 30%. Efektywne gospodarowanie na dostępnych do tego celu gruntach jest wypadkową między innymi warunków klimatycznych, jakości gleby oraz ilości wody na danym obszarze. Na tak zdefiniowane determinanty produktywności rolnictwa nakładają się ograniczenia organizacyjno-ekonomiczne, jak na przykład rozdrobnienie obszarów uprawnych. Sto-

pień natężenia poszczególnych czynników ograniczających ich kumulowanie się na jednym obszarze posłużył do wyodrębnienia obszarów problemowych rolnictwa (dalej: OPR) w Polsce (Jadczyzyn i in. 2010).

W poszczególnych regionach kraju wyodrębniono, w oparciu o wskaźnik waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej, obszary o niekorzystnych warunkach gospodarowania (dalej: ONW). Z kolei w obrębie obszarów ONW wyróżniono trzy kategorie:

- 1) obszary górskie, charakteryzujące się znacznymi ograniczeniami możliwości użytkowania ziemi i wysokimi kosztami pracy (trudne warunki klimatyczne, skrócony sezon wegetacyjny, duże spadki wysokości terenu); obszary te kwalifikowane są wyłącznie według kryterium wysokości położenia użytków rolnych powyżej 500 m n.p.m.;
- 2) obszary o specyficznych utrudnieniach położone w strefie podgórskiej, w której również występują ograniczenia klimatyczne i utrudniona jest organizacja produkcji z uwagi na ukształtowanie terenu, zagrożenie erozją wodną, a także z przyczyn ekonomicznych: powyżej 25% wszystkich gospodarstw zaprzestało produkcji rolnej, a udział trwałych użytków zielonych (dalej: TUZ) wynosi ponad 40% w strukturze użytkowania gruntów rolnych, ponadto występuje rozdrobnienie struktury agrarnej (średnia powierzchnia gospodarstwa < 7,5 ha); do strefy o specyficznych utrudnieniach kwalifikowano

gminy, w których co najmniej 50% użytków rolnych położonych jest w strefie 350–500 m n.p.m.;

- 3) obszary nizinne z wyodrębnioną strefą nizinną I i strefą nizinną II.

Podstawowym kryterium delimitacji obszarów ONW na terenach nizinnych w Polsce były ograniczenia produktywności rolnictwa związane z niską jakością gleb, niekorzystnym agroklimatem i warunkami wodnymi, niesprzyjającą rzeźbą terenu oraz wskaźnikiem demograficznym i udziałem ludności związanej z rolnictwem. Jednak zasięg przestrzenny ONW, wyznaczony zgodnie z Rozporządzeniem Rady WE 1257/99, nie uwzględnia innych istotnych ograniczeń dla produkcji rolnej powodowanych warunkami przyrodniczymi, antropogenicznymi i organizacyjno-przestrzennymi (Jadczyzyn i in. 2010). W związku z tym dokonano uszczegółowienia kryteriów dla wytypowania obszarów poza ONW, na których również istnieją utrudnienia dla prowadzenia gospodarstw, czyli tak zwane obszary OPR. Do wyznaczenia tych obszarów, oprócz czynników zdefiniowanych w ramach ONW wytyczających obszary zaliczone do strefy ONW nizinnej II (określonych jako skrajnie niekorzystne dla rolnictwa) oraz strefy górskiej i specyficznej (obszary ONW bez strefy nizinnej I), dołączono pięć dodatkowych kryteriów:

- 1) zawartość próchnicy w glebie $< 1,3\%$,
- 2) odczyn gleb $\text{pH} < 4,5$,

- 3) zagrożenie erozją wodną w stopniu średnim i silnym,
- 4) zanieczyszczenie metalami ciężkimi (zgodnie z kryteriami Rozporządzenia Ministra Środowiska z 9 września 2002 r.),
- 5) rozdrobnienie struktury przestrzennej gospodarstw (średnia powierzchnia gospodarstwa w gminie 1–10 ha, liczba działek większa od 4, a średnia powierzchnia działki mniejsza od 2,5 ha).

Na podstawie tabeli 2 widać, że udział obszarów problemowych dla rolnictwa w przypadku województwa małopolskiego stanowi aż 75% ogólnej powierzchni i jest największy w skali całego kraju.

Województwo małopolskie charakteryzuje się dużą zmiennością zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi (Gawroński 2002; IUNG 2017). Obszary o dominującej funkcji rolniczej, położone w północno-wschodniej części badanego regionu, odznaczają się niskim poziomem zanieczyszczenia gleb tymi związkami chemicznymi. Pozytywnym zjawiskiem jest to, że na terenach o szczególnych walorach przyrodniczych dla rolnictwa, występuje niski poziom metali ciężkich w glebach. Niski ich poziom zanotowano także na terenach o szczególnych walorach przyrodniczych dla rozwoju turystyki i rekreacji. Użytki rolnicze, na których stwierdzono podwyższone zawartości metali ciężkich, powinny być wyłączone z upraw na cele konsumpcyjne. Należy zaproponować alternatywny charakter uprawy, który nie prowadziłby do degradacji gleby (np. na skutek ero-

Tabela 2. Zestawienie danych dotyczących jakości gleb wraz z udziałem OPR w powierzchni poszczególnych województw

Województwo	Gleby najgorszej jakości		Udział OPR ogólnej powierzchni (%)
	ha	%	
POLSKA	6 312 108,00	34,1	38,0
Małopolskie	272 374	30,4	75,0
Świętokrzyskie	264 409	35,6	65,0
Podkarpackie	260 600	27,5	61,0
Podlaskie	568 255	47,1	52,0
Mazowieckie	1 083 169	45,0	50,0
Lubelskie	138 794	8,0	44,0
Łódzkie	587 053	46,2	44,0
Śląskie	229 796	35,9	42,0
Pomorskie	315 172	34,6	33,0
Dolnośląskie	251 917	21,7	23,0
Wielkopolskie	794 545	41,8	20,0
Opolskie	127 505	21,8	10,0
Warmińsko-mazurskie	334 953	25,5	10,0
Kujawsko-pomorskie	285 187	24,6	9,0
Lubuskie	235 964	42,8	9,0
Zachodniopomorskie	303 721	27,1	4,0

Źródło: *Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2020* (2021) oraz Jadczyzyn i in. (2010).

zji) oraz umożliwił systematyczne wiązanie szkodliwych pierwiastków. Z kolei gleby położone na obszarach zachodnich i centralnych województwa małopolskiego charakteryzują się podwyższoną zawartością kadmu oraz niklu (IUNG 2017).

W województwie małopolskim obserwuje się **silne zakwaszenie gleb**, co wskazuje na pilną potrzebę ich wapnowania. Zabieg ten poprawi nie tylko odczyn gleb, ale również korzystnie wpłynie na większość ich właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych, włącznie z ograniczeniem mobilności i fitotoksyczności pierwiastków śladowych (metali ciężkich) oraz glinu, żelaza, manganu itp.

Celem niniejszej publikacji jest ukazanie możliwości ograniczenia wpływu skażeń zdeponowanych w glebach uprawnych Małopolski na produkty żywnościowe, przy użyciu roślin niekonsumpcyjnych posiadających zdolność pobierania owych skażeń z gleby i kumulowania ich w biomacie.

2. Metody ograniczenia transmisji substancji szkodliwych zawartych w glebach do roślin uprawnych¹

Raporty Europejskiej Agencji Ochrony Środowiska zwracają uwagę na konieczność znalezienia rozwiązań dla terenów zanieczyszczonych metalami ciężkimi w Europie (EEA 2005, 2016), umożliwiających efektywne zastosowanie metod tzw. remediacji terenów zanieczyszczonych. Remediacja to inaczej:

¹ W rozdziale tym korzystano z informacji zawartych w pracy doktorskiej Jacka Krzyżaka pt. „*Wspomagana fitostabilizacja metali ciężkich w glebach*” z 2013 r. obronionej na Politechnice Wrocławskiej (str. 119).

poddanie gleby, ziemi i wód gruntowych działaniom mającym na celu usunięcie lub zmniejszenie ilości substancji powodujących ryzyko, ich kontrolowanie oraz ograniczenie rozprzestrzeniania się tak, aby teren zanieczyszczony przestał stwarzać zagrożenie dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska, z uwzględnieniem obecnego i, o ile jest to możliwe, planowanego w przyszłości sposobu użytkowania terenu (Dz. U. z 2014 r., poz. 1101).

W 2016 r. Agencja Ochrony Środowiska kompleksowo przedstawiła problem użytkowania gleb na terenach zurbanizowanych wskazując jednocześnie na konieczność zmiany ich użytkowania w zależności od stopnia zanieczyszczenia gleb (EEA 2016).

Obniżenie zawartości potencjalnie i łatwo dostępnych form metali ciężkich na obszarach o ich podwyższonej zawartości może być jedyną sugerowaną opcją ich remediacji bądź dalszej eksploatacji z wyłączeniem użytkowania na cele żywnościowe. Celem takiego działania jest bowiem zmniejszenie ryzyka wystąpienia negatywnego wpływu zanieczyszczeń na środowisko przez ograniczenie dostępności metali do poziomu niższego niż fitotoksyczny i utworzenie lub odtworzenie pokrywy roślinnej, ograniczającej degradację gleby i dalsze rozprzestrzenianie się metali w środowisku. Kluczowymi czynnikami, które należy wziąć pod uwagę, są **fizyczne właściwości gleby, zawartość metali, zawartość materii organicznej i kwasowość gleby**. Ograniczenie pochłaniania metali ciężkich przez rośliny może być osiągnięte przez stosowanie scharakteryzowanych poniżej zabiegów oraz substancji.

2.1. Wapnowanie – ograniczanie poziomu kwasowości gleb

Odczyn gleby jest głównym czynnikiem decydującym o rozpuszczalności metali ciężkich w glebie. Podwyższenie odczynu gleby na skutek na przykład wapnowania, ogranicza zatem pobieranie metali ciężkich przez rośliny.

Wapno jest materiałem najczęściej stosowanym w rolnictwie do neutralizacji odczynu gleby, poprawy warunków wzrostu roślin oraz ograniczenia pobierania metali ciężkich przez rośliny.

Związki alkaliczne, takie jak węglan wapnia (CaCO_3), wodorotlenek wapnia (Ca(OH)_2), tlenek wapnia (CaO) i tlenek magnezu (MgO) były badane pod kątem ich przydatności w remediacji terenów zanieczyszczonych metalami ciężkimi, a ich efektywność porównywano z innymi stosowanymi dodatkami.

2.1.1. Nawozy wapniowe tlenkowe

Nawozy wapniowe tlenkowe przydatne są na gleby średnie i ciężkie. Minimalna zawartość CaO w zależności od rodzaju nawozu wynosi od 60% do co najmniej 80%. Nawozy tego typu działają energicznie, w krótkim czasie zmieniając kwasowość gleby. Stosując wapno tlenkowe należy zachować szczególną ostrożność, aby nie doprowadzić do zjawiska jakim jest przewapnowanie gleb. Jeżeli wyliczone dawki wapna określono jako konieczne lub potrzebne, to wtedy należy je zmniejszyć o połowę w odniesieniu do dawek zalecanych w tabeli 1. W następnym

roku zaleca się kontrolę odczynu i ewentualnie, w razie konieczności, ponownie zwapnować pole. Stosowanie szybko działającego wapna równocześnie poprawia strukturę gruzełkową gleby, dzięki czemu zyskuje się poprawę stosunków powietrzno-wodnych w glebie. Wapna tlenkowe nie powinny być stosowane na gleby lekkie o małej zdolności buforowej.

2.1.2. Nawozy wapniowe węglanowe (wapniak mielony, kreda)

Nawozy wapniowe węglanowe (wapniak mielony, kreda) łagodnie zmieniają odczyn gleby, nadają się przede wszystkim na gleby lekkie o słabych właściwościach buforowych, można stosować je także do wapnowania zachowawczego na glebach ciężkich (w celu utrzymania optymalnego odczynu). Zawartość CaO w zależności od rodzaju nawozu wynosi od 40% do co najmniej 50%. Jeżeli zależy nam na szybkim podniesieniu pH warto zdecydować się na kredę, która jest również nawozem węglanowym, ale dzięki młodszemu pochodzeniu geologicznemu i wysokiej reaktywności (nawet 100%) będzie działała znacznie szybciej.

2.1.3. Nawozy wapniowo-magnezowe

Nawozy wapniowo-magnezowe zaleca się stosować na gleby o bardzo niskiej i niskiej zasobności w magnez. Ten rodzaj nawozów najczęściej używa się wtedy, gdy zasobność gleb w magnez przyswajalny jest bardzo niska lub niska.

2.2. Stosowanie sorbentów mineralnych i organicznych

Kolejnym, po odczynie gleby, istotnym czynnikiem decydującym o zatrzymywaniu jonów metali ciężkich w glebie oraz ich migracji do roztworu glebowego jest pojemność sorpcyjna gleby. Zależy ona od udziału i rodzaju minerałów ilastych, zawartości próchnicy oraz uwodnionych tlenków glinu i żelaza. W celu obniżenia mobilności i biodostępności metali ciężkich, najczęściej stosowanymi dodatkami doglebowymi są: związki fosforu, naturalne i syntetyczne glinokrzemiany, popioły, tlenki żelaza, manganu i glinu, związki wapnia oraz materia organiczna w różnej postaci.

2.2.1. Tlenki żelaza, manganu i glinu

Tlenki żelaza zmniejszają mobilność arsenu, kadmu, miedzi, niklu, ołowiu i cynku przez ich sorpcję, wytrącanie lub formowanie minerałów zawierających wymienione pierwiastki. Badania nad immobilizacją metali ciężkich przy użyciu naturalnych i syntetycznych tlenków żelaza wykazały również przydatność innych związków bogatych w ten pierwiastek, takich jak sole żelaza. Tlenki żelaza są szczególnie skuteczne w immobilizacji arsenu i mogą obniżyć zawartość rozpuszczalnego arsenu w glebie nawet do 90% (Hartley i in. 2004; Kumpiene i in. 2006). Szereg metali równocześnie występujących w roztworze glebowym, jak ma to miejsce w przypadku gleb zanieczyszczonych działalnością przemysłową, może pozytywnie wpływać na swoją stabilizację przez strącanie na powierzchni tlenków żelaza.

Siarczany żelaza szczególnie skutecznie obniżają mobilność arsenu w glebie w porównaniu z innymi związkami

żelaza, podczas gdy żelazo metaliczne (Hartley i in. 2004; Kumpiene i in. 2006) jest wysoce skuteczne w immobilizacji miedzi, chromu i cynku. Żelazo metaliczne lub na zerowym stopniu utlenienia (Fe^0) jest materiałem powszechnie dostępnym, jego wprowadzenie do gleby nie ma dużego wpływu na jej odczyn, ponadto tworzy on w glebie tlenki żelaza o strukturze przydatnej w sorpcji metali ciężkich. Pomimo tego, że tlenki żelaza są związkami obniżającymi mobilność metali w glebie i zmniejszającymi ich dostępność dla roślin oraz mającymi niewielki negatywny wpływ na funkcjonalność gleby, koniecznym jest wprowadzanie ich łącznie z dodatkami bogatymi w substancje odżywcze (np. kompostem lub inną materią organiczną) w celu wspomagania wegetacji roślin na glebie poddanej procesowi stabilizacji (Ruttens i in. 2006).

Oprócz tlenków żelaza innymi ważnymi stabilizatorami metali ciężkich w glebie są tlenki manganu i glinu. W glebach wytworzonych z fliszu karpackiego, gdzie manganu jest bardzo dużo, a kwasowość gleb znacznie większa, związki manganu mają istotne znaczenie w unieczynnianiu metali ciężkich. Tlenki manganu stanowią zazwyczaj mniej istotne składniki gleb, o szerokim zakresie powierzchni sorpcyjnej (od 5 do 360 m^2/g) i znacznym powinowactwie do wiązania metali ciężkich (Kumpiene 2010). Tlenki manganu, w szczególności syntetyczne (birnezyt i kryptomelan), są bardziej skutecznymi sorbentami ołowiu niż związki żelaza, a równocześnie obniżają pobór kadmu i ołowiu przez rośliny. Wprowadzenie do gleby syntetycznych tlenków manganu powoduje redukcję potencjalnie dostępnych frakcji cynku i ołowiu odpowiednio o 90% i o 60%.

Tlenki glinu również posiadają dużą powierzchnię sorpcyjną (od 100 do 220 m²/g) i potrafią sorbować zarówno kationy, jak i aniony. Związki te są stabilne w zakresie pH od 4,0 do 10,0, jednakże poza tymi wartościami mogą ulec rozpuszczaniu i uwalniać metale ciężkie do gleby (Kumpiene 2010). Wielopierścieniowy kompleks glinu lub polimer Al₁₃ efektywnie sorbuje nikiel, cynk i kadm oraz w mniejszym stopniu miedź i ołów z roztworu wodnego. Polimer Al₁₃ jest proponowany jako związek immobilizujący metale ciężkie w glebach zanieczyszczonych, niezależnie od ich odczynu (Potter i Yong 1999).

2.2.2. Naturalne i syntetyczne glinokrzemiany

Iły

Iły stanowią minerały glinokrzemianowe, które tworzą się w glebie na skutek wietrzenia i są klasyfikowane na podstawie wielkości cząstek. Dzięki ujemnie naładowanej powierzchni należą do aktywnych składników gleby i są zdolne do sorpcji kationów. Niektóre minerały ilaste, na przykład kaolinit, tworzą dodatkowo naładowane struktury przy niskim odczynie gleby, w związku z czym są zdolne do adsorpcji anionów w kwaśnym środowisku glebowym. W zależności od stopnia usieciowania, powierzchnia sorpcyjna iłów może wahać się od 15–20 m²/g w przypadku kaolinitu do nawet 280–500 m²/g dla montmorylonitu (Kumpiene 2010).

Wprowadzenie minerałów ilastych (palygorskitu i sepiolitu) do silnie zanieczyszczonej gleby powoduje znaczne obniżenie biodostępnych i potencjalnie dostępnych form kadmu

i cynku, ołowiu i miedzi. Imobilizacja arsenu możliwa jest przez wprowadzenie do gleby minerałów ilastych w postaci bentonitu. Jednakże skuteczność tego dodatku jest zależna od pH gleby – w środowisku kwaśnym bentonit nie wykazuje istotnego ograniczenia biodostępności tego pierwiastka.

Warto tu zwrócić uwagę na to, że skuteczność materiałów ilastych w ograniczaniu mobilności metali ciężkich w glebach może być obniżona w przypadku ich łącznego stosowania z innymi dodatkami stabilizującymi, zwłaszcza z materią organiczną. Związane jest to między innymi z działaniem rozpuszczonych kwasów tłuszczowych, pochodzących z materii organicznej.

Zeolity

Zeolity są uwodnionymi minerałami glinokrzemianowymi, powstającymi naturalnie w wyniku reakcji pyłów wulkanicznych z wodami powierzchniowymi lub podziemnymi. Mogą również powstawać w środowisku niewulkanicznym, podczas interakcji między zasolonymi cząstkami gleby i silnie zasadowymi roztworami (Kumpiene 2010). Zeolity wykazują podobieństwo do minerałów ilastych ze względu na zawartość związków krzemu i glinu, jednakże różnią się strukturą krystaliczną oraz właściwościami. Nazywane są również „sitami molekularnymi” ze względu na zdolność do selektywnego sortowania molekuł na podstawie ich wielkości. Zeolity mogą być również łatwo syntetyzowane z produktów odpadowych pochodzących z przemysłu jak na przykład z popiołów lotnych.

Zeolity posiadają wysoką wydajność w sorbowaniu kadmu, ołowiu, miedzi, cynku oraz arsenu. Wprowadzenie do gleby zeolitów wpływa na jej odczyn – wraz ze zwiększeniem ilości wprowadzanych zeolitów rośnie pH i jednocześnie zwiększa się immobilizacja metali.

2.2.3. Popioły lotne

Skład chemiczny i właściwości fizyczne popiołów różnią się w zależności od rodzaju spalanego paliwa, czy też metody jego spalania. Popioły powstałe w wyniku spalania węgla i innych biopaliw składają się głównie z minerałów glinokrzemianowych i zawierają znaczne ilości Ca, Mg, Na i K oraz różne stężenia innych pierwiastków (np. Cd, Pb, Zn, As, Cr, Cu, B, Ba itp.). Ich odczyn waha się od silnie kwaśnego do silnie zasadowego, w zależności od składu spalanego paliwa.

Najczęstszym powodem aplikacji popiołów do gleb jest poprawa produkcji biomasy – przez dostarczenie substancji odżywczych dla roślin, oraz redukcja zakwaszenia gleby – popioły o wysokim odczynie są stosowane w remediacji obszarów zdegradowanych przez przemysł. Wprowadzenie do gleby piaszczystej popiołów poprawia jej strukturę oraz zwiększa pojemność wodną. Dodatkowo popioły mogą w efektywny sposób ograniczyć mobilność metali ciężkich w glebie, obniżając ich toksyczność.

Popioły lotne są najbardziej efektywne w przypadku zanieczyszczeń występujących w formie kationów, takich jak Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} i Ni^{2+} , podczas gdy efekt stabilizacji może być osłabiony dla zanieczyszczeń występujących w formie anionów, na przykład arsenianów czy też chromianów.

Mechanizm zatrzymywania zanieczyszczeń przez popioły lotne oparty jest głównie na podwyższeniu odczynu gleby i wytrącaniu zanieczyszczeń oraz ich sorpcji w postaci kompleksowania na powierzchni popiołów i reakcji wymiany kationów (Kumpiene 2010). Najlepsza skuteczność w immobilizacji zanieczyszczeń przy użyciu popiołów lotnych jest obserwowana dla gleb kwaśnych, o niskim poziomie materii organicznej.

2.2.4. Związki fosforu

Stosowanie związków fosforu w immobilizacji metali ciężkich w glebach oparte jest głównie na zdolności fosforanów do strącania i tworzenia stabilnych form stałych. Popularnym minerałem zawierającym fosfor jest apatyt, rozpuszczalny w warunkach kwaśnych i zdolny do ponownego wytrącania się wraz z zaadsorbowanymi zanieczyszczeniami, na przykład Pb, Cu, Zn, Cd.

Oprócz apatytów, przydatne są również inne związki fosforowe, takie jak syntetyczne apatyty i hydroksyapatyty, sole fosforanowe oraz kwas fosforowy.

Stosowanie dodatków doglebowych zawierających fosfor jest szczególnie rekomendowane w przypadku immobilizacji ołowiu. Wprowadzenie hydroksyapatytów do gleby skutkuje wytrącaniem się trwałych związków – hydroksypiromorfitytów, podobny mechanizm obserwowano podczas wprowadzania do gleby apatytów i innych związków fosforu. Rozpuszczalność związków ołowiu i fosforu determinuje wydajność stabilizacji ołowiu w glebie. Ołów może występować w różnych formach w glebie (np. tlenku

ołowiu, węglanu ołowiu, siarczaniu ołowiu), które ulegają rozpuszczaniu przy różnym odczynie.

Sole fosforanowe i kwas fosforowy są bardziej rozpuszczalne, a co za tym idzie, bardziej wydajne w stabilizacji ołowiu. Stosowanie dodatków fosforowych powinno być ograniczone w przypadku zanieczyszczeń w postaci anionów, takich jak arsen, selen czy wolfram.

Efektywność dodatków fosforowych jest słaba w przypadku gleb zanieczyszczonych wieloma pierwiastkami śladowymi ze względu na zjawisko konkurencji jonów kadmu, miedzi i cynku o miejsca sorpcyjne.

Wyższe dawki związków fosforowych wprowadzane do gleby mogą wzmocnić efekt stabilizacji zanieczyszczeń, ale mogą również spowodować przekroczenie dopuszczalnych ilości fosforu w glebie. Skuteczne ograniczenie mobilności ołowiu przez formowanie piromorfitów wymaga niskiego odczynu gleby, wysokiej rozpuszczalności związków ołowiu i fosforu, co może z kolei spowodować znaczne zagrożenie środowiskowe. W związku z tym ograniczanie biodostępności ołowiu przy użyciu związków fosforu w aplikacjach terenowych powinno być stosowane ze szczególną ostrożnością.

2.2.5. Materia organiczna

Głównym składnikiem materii organicznej jest mieszanina kwasów humusowych i fulwowych. Wysoka zawartość grup funkcyjnych w substancjach humusowych pozwala na wymianę jonową, tworzenie kompleksów i adsorpcję z metalami ciężkimi. Brak materii organicznej jest częstym zja-

wiskiem w glebach silnie zanieczyszczonych, spowodowanym toksycznym wpływem zanieczyszczeń na aktywność biologiczną gleby oraz wzrost roślin.

W związku z tym dodatki doglebowe złożone z materii organicznej pozwalają na poprawę jakości gleby i zatrzymanie w niej substancji odżywczych.

Metale ciężkie, silnie włączone w strukturę materii organicznej przez na przykład tworzenie struktur chelatowych, są 'zablokowane' tak długo, aż odczyn gleby nie obniży się do wartości $\text{pH} = 3,0$.

Wpływ materii organicznej na mobilność metali ciężkich w znacznym stopniu jest uzależniony od jej właściwości, między innymi od stopnia humifikacji czyli stosunku pomiędzy rozpuszczalnymi małocząsteczkowymi kwasami organicznymi a wielkocząsteczkowymi składnikami. Warunki zasadowe mogą prowadzić do rozpuszczania materii organicznej, co może przyczynić się do zwiększenia mobilności zanieczyszczeń nieorganicznych. Natomiast w warunkach kwaśnych spada powinowactwo kwasów humusowych i fulwowych do kationów metali. W związku z tym istotnym jest, aby w procesie stabilizacji zanieczyszczeń przy użyciu materii organicznej był utrzymywany obojętny odczyn gleby.

Torf

Torf posiada wysokie powinowactwo do jonów cynku i kadmu, znacznie wyższe niż materiały ilaste. Wprowadzenie torfu do gleby w ilości 5% (w stosunku wagowym)

może znacznie obniżyć stężenia kadmu i cynku w roztworze glebowym przy pH = 5,0. Z kolei łączne wprowadzanie torfu z popiołami lotnymi może rozszerzyć zakres jego skuteczności w glebach podatnych na zakwaszenie. Niektóre właściwości torfu, takie jak podatność na wysychanie, słaba stabilność chemiczna i niski odczyn, zmieniają niekorzystnie warunki dla wzrostu roślin i jednocześnie mogą ograniczać jego zastosowanie w procesie wspomaganej fitostabilizacji. W związku z tym stosowanie torfu w większości przypadków wiąże się z koniecznością korekty odczynu stabilizowanej gleby.

Węgiel brunatny

Polskie węgle brunatne należą do węgli ksyliłowo-ziemistych. Duża część, szczególnie odpadowych węgli ziemistych, może być z powodzeniem wykorzystywana jako źródło materii organicznej dla gleb. Skład pierwiastkowy organicznej substancji węgla brunatnego jest zróżnicowany. Zawartość węgla organicznego może sięgać 80%. Zawartość azotu w organicznej substancji węgla brunatnego najczęściej wynosi 0,8–1,4%, a zawartość siarki przeciętnie wynosi 1–4%.

Węgiel brunatny składa się z szeregu składników grupowych. Należą do nich przede wszystkim kwasy huminowe, hymatomelanowe, fulwowe oraz biuminy. Największe znaczenie z punktu widzenia przydatności rekultywacyjnej mają kwasy huminowe – główny składnik węgli brunatnych. Kwasy huminowe zbudowane są głównie z węgla,

wodoru i tlenu oraz niewielkich ilości azotu i siarki. Kwaśy te charakteryzują się zdolnościami jonowymiennymi. Oprócz sodu i potasu mogą również wymieniać glin, żelazo, miedź, kadm, czy też ołów.

O wielkości zatrzymywania metali ciężkich przez glebę w głównej mierze decyduje jej pojemność sorpcyjna, która z kolei zależy od ilości i jakości koloidów tworzących kompleks sorpcyjny. Grupy funkcyjne kwasów huminowych i fulwowych, obecnych w węglu brunatnym, mogą łączyć się z metalami jedno-, dwu- lub trójwartościowymi, a trwałość powstałych w ten sposób kompleksów chelatowych warunkowana jest odczynem gleby oraz stężeniem metalu w glebie. Wraz ze wzrostem odczynu gleby rośnie powinowactwo kwasów humusowych do metali, na przykład cynk przy wyższych wartościach pH tworzy wodorotlenek cynku zamiast wolnych jonów Zn^{2+} i w związku z tym kwasy humusowe są w stanie związać znacznie większą ilość tego pierwiastka. Wprowadzenie do gleby węgla brunatnego obniża stężenie biodostępnych form kadmu i cynku oraz znacząco zmniejsza pobieranie kadmu, ołowiu i cynku przez rośliny.

2.3. Wykorzystanie mikroorganizmów do biologicznej utylizacji skażeń – biosorpcja

Przy wykorzystaniu metod mikrobiologicznych w procesie usuwania metali ciężkich z gleb stosowane są szczepy mikroorganizmów charakteryzujące się dobrą zdolnością namnażania nawet w niekorzystnych warunkach środowiska.

Zastosowanie mają również populacje mieszane mikroorganizmów. Do mikroorganizmów, dzięki którym możliwe jest usuwanie metali z terenów nimi skażonych, zalicza się bakterie, drożdże, promieniowce, pleśnie, grzyby (nie kapeluszowe) oraz glony (bez plechowych). Odporność mikroorganizmów na metale ciężkie wynika z obecności systemów komórkowych umożliwiających wydalanie metali na zewnątrz, bioakumulację lub przemiany enzymatyczne prowadzące do powstania mniej toksycznych form metali.

W technologii zwanej bioremediacją mogą być wykorzystane materiały w formie sproszkowanej o właściwościach biosorbentów na bazie ligninocelulozy (np. glony, grzyby – m.in. *Trichoderma harzianum*), które mają właściwość adsorpcji chromu sześciowartościowego – toksycznego i rozpuszczalnego w wodzie – i przekształcania go w formę trójwartościową, która jest nierozpuszczalna.

W technologiach bioremedycyjnych istnieje także możliwość aplikacji szczepów bakteryjnych charakteryzujących się zdolnością do produkcji surfuktantów, to znaczy związków powierzchniowo czynnych. Związki te są bardziej stabilne w środowisku glebowym, stymulują procesy enzymatyczne poprawiając tym samym biodostępność zanieczyszczeń (np. metali ciężkich).

Wspomaganie oczyszczania gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi może polegać również na wprowadzeniu drobnoustrojów zamieszkujących strefę ryzosferową, określanych jako bakterie promujące wzrost roślin (z j. ang. *plant-growth-promoting rhizobacteria*, dalej: PGPR). Przy-

kładowo szczepy *Pseudomonas putida* i *P. fluorescens* są odporne na zanieczyszczenia kadmem i ołowiem, ponadto wspomagają fitoekstrakcję tych pierwiastków przez rośliny.

Jednym z warunków zasilania skażonej gleby w mikroorganizmy jest to, aby biopreparaty wprowadzane do gleby były całkowicie bezpieczne dla człowieka i środowiska oraz posiadały atest Państwowego Zakładu Higieny, który gwarantuje, że wprowadzane szczepy nie są chorobotwórcze.

3. Fitoremediacja – wykorzystanie roślin w procesie biologicznego oczyszczania gleb uprawnych

Fitoremediacja to technologia wykorzystująca potencjał genetyczny niektórych gatunków roślin do usuwania, degradacji, metabolizowania lub unieruchamiania zanieczyszczeń z gleby, wód gruntowych, powierzchniowych bądź powietrza. Pod pojęciem zanieczyszczeń rozumiemy tu głównie metale ciężkie, ale również wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (dalej: WWA).

Zdecydowana większość roślin w trakcie wegetacji pobiera zanieczyszczenia, w tym metale ciężkie, z podłoża. W gatunkach uprawnych i dziko rosnących istnieje znaczna zmienność w zdolności do pobierania i akumulowania jonów różnych metali z zanieczyszczonej gleby.

Generalnie rośliny są w stanie rosnąć na gruntach o zawartościach większości metali ciężkich dwu- czy nawet trzykrotnie przekraczających dopuszczalne wartości. Dopiero

po osiągnięciu zawartości metali rzędu 1 400 mg/kg Pb, 90 mg/kg Cd, czy ponad 4 500 mg/kg Zn następuje zahamowanie wzrostu i zatrzymanie rozwoju rośliny w stadium kilkulistnej siewki. Podane przekroczenia zawartości metali ciężkich są jednak bardzo rzadkie i spotykane najczęściej w sąsiedztwie hut metali nieżelaznych.

Fitoremediacja może przybierać różne formy:

- **fitoekstrakcji:** jest to metoda polecana do stosowania w warunkach niskich lub średnich stężeń zanieczyszczeń. W fitoekstrakcji wykorzystuje się zdolność roślin do kumulacji zanieczyszczeń w częściach nadziemnych, które następnie usuwane są wraz z zanieczyszczonym plonem. Jednym z rodzajów fitoekstrakcji jest fitoekstrakcja wspomagana, nazywana także indukowaną hiperakumulacją. Idea tej metody polega na dodaniu do gleby substancji chelatującej, na przykład EDTA, której zadaniem jest zwiększenie pobierania zanieczyszczeń do części nadziemnych roślin, a następnie usunięcie metali z gleby wraz z biomasą części nadziemnych roślin;
- **fitodegradacji:** takie podejście obejmuje wykorzystanie roślin i związanych z nimi mikroorganizmów do rozkładu zanieczyszczeń organicznych do mniej toksycznych form lub do unieruchamiania zanieczyszczeń w celu uniemożliwienia ich wejścia do łańcucha pokarmowego lub środowiska;
- **ryzofiltracji:** metoda ta polega na wykorzystaniu korzeni roślin do pochłaniania i adsorpcji zanieczyszczeń ze

zbiorników wodnych, wody płynącej oraz ścieków. Na potrzeby tej metody tworzone są zbiorniki zwane sztucznymi bagnami, które obsadza się gatunkami roślin zdolnymi do pochłaniania metali. Zanieczyszczona woda przechodzi przez te ryzofiltry, rośliny pobierają metale ciężkie, a następnie rośliny są zbierane i utylizowane;

- **fitostabilizacji:** metoda ta wykorzystuje rośliny do zmniejszenia biodostępności zanieczyszczeń w środowisku przez ograniczenie wypłukiwania, spływu i erozji gleby. Sam proces fitostabilizacji zachodzi na drodze adsorpcji zanieczyszczeń na powierzchni korzeni, adsorpcji do ich wnętrza i wytrącenia w strefie korzeniowej. Dodatkowo sam system korzeniowy powoduje unieruchomienie gleby i zawartych w niej zanieczyszczeń, uniemożliwiając erozję powietrzną oraz wodną, dzięki czemu zanieczyszczenia nie przemieszczają się do głębszych warstw profilu glebowego;
- **fitowolatylicacji:** jest to wykorzystanie roślin do transformacji zanieczyszczeń w formę gazową i wydzielenia ich do atmosfery. Pomimo dość dużej atrakcyjności metody stanowi ona zagrożenie dla środowiska i zdrowia człowieka, gdyż wiąże się z faktem usunięcia z gleby lub wód zanieczyszczeń, które następnie rozprzestrzeniają się w atmosferze.

Wśród roślin przydatnych do procesu fitoekstrakcji można wyróżnić gatunki naturalnie wyposażone w zdolność do pobierania bardzo dużych ilości metali ciężkich. Są to tak

zwane hyperakumulatory. Kryteria przypisania danego gatunku do tej grupy roślin są ściśle związane z akumulacją poszczególnych metali. Zawartość metali w suchej masie pędów hyperakumulatorów powinna wynosić co najmniej: 100 mg/kg seleniu, kadmu i talu, 300 mg/kg miedzi, kobaltu i chromu, 1 000 mg/kg niklu i ołowiu, 3 000 mg/kg cynku oraz 10 000 mg/kg manganu (Van Der Ent i in. 2013).

Obecnie zidentyfikowano ponad 300 gatunków hyperakumulatorów niklu, około 30 – miedzi oraz kobaltu, 20 – seleniu, 14 – ołowiu, około 15 – cynku oraz 10 – manganu i zaledwie 4 hyperakumulatory kadmu. Niektóre gatunki są w stanie gromadzić ponadprzeciętne ilości kilku metali ciężkich jednocześnie. W tabeli 3 zestawiono przykłady hyperakumulatorów wśród chwastów, roślin ozdobnych oraz uprawnych.

Tabela 3. Przykłady hyperakumulatorów metali ciężkich

Nazwa gatunkowa	Nazwa polska	Pobierane metale ciężkie	Uwagi
<i>Alyssum bracteatum</i>	smagliczka	Ni	gatunek obcy
<i>Alyssum lesbiacum</i>	smagliczka	Ni, Co, Mg	gatunek obcy
<i>Astragalus pectinatus</i>	traganek	Se	gatunek obcy
<i>Astragalus racemosus</i>	traganek	Se	gatunek obcy
<i>Berkheya purpurea</i>	Berkheya purpurowa, oset afrykański	Ni, Cd, Pb, Zn	roślina ozdobna



► Tabela 3. cd.

Nazwa gatunkowa	Nazwa polska	Pobierane metale ciężkie	Uwagi
<i>Brassica juncea</i>	gorczyca sarepska	Cr, Cu, Pb	gatunek uprawny
<i>Helianthus annuus</i>	słonecznik zwyczajny	As, Ni, Co, Cu, Mn, Pb, Zn	gatunek uprawny
<i>Ipomea alpina</i>	wilec alpejski	Cu	gatunek obcy
<i>Laburnum anagyroides</i>	złotokap zwyczajny	Pb	krzew ozdobny
<i>Leptospermum scoparium</i>	manuka	Cr	krzew ozdobny
<i>Medicago sativa</i>	lucerna siewna	Pb, Zn, Cu, Ni, Cd	gatunek uprawny
<i>Nicotiana tabacum</i>	tytoń	Cd	gatunek uprawny
<i>Polygonum aviculare</i>	rdest ptasi	Hg	chwast
<i>Potentilla griffithii</i>	pięciornik	Zn, Cd	gatunek obcy
<i>Salix viminalis</i>	wierzba wiciowa	Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn	
<i>Sinapis alba</i>	gorczyca biała	Cd	gatunek uprawny
<i>Sonchus arvensis</i>	mleczyk polny	Pb	chwast
<i>Streptanthus polygaloides</i>	brak polskiej nazwy	Zn, Cu, Ni	gatunek obcy, Sierra Nevada (USA)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	tobołki polne	Zn, Cd	chwast
<i>Thlaspi rotundifolium</i>	tobołki okrągłolistne	Pb	gatunek obcy, Alpy Północne i Południowe
<i>Typha angustifolia</i>	pałka szerokolistna	As, Ca, C, Co, Ni, Mn	–
<i>Vetiveria zizanioides</i>	wetiwieria pachnąca	Pb	–

Źródło: Purakayastha i Chhonkar (2010), zmienione.

Uprawa roślin na gruntach o możliwym zanieczyszczeniu metalami ciężkimi wymaga poznania podstawowych parametrów fizykochemicznych gleby takich jak odczyn (pH), zawartość materii organicznej, zawartość części spławialnych oraz zawartość metali ciężkich najczęściej występujących w glebach Polski tj. ołowiu, kadmu, miedzi, cynku, chromu oraz niklu. W oparciu o uzyskane wyniki można dokonać klasyfikacji stopnia skażenia oraz rekomendowanych upraw. Poniższe klasyfikacje (tabele 4 i 5) i zalecenia (tabela 6) oparto na wytycznych Państwowej Inspekcji Ochrony Środowiska oraz Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (Kabata-Pendias i in. 1995; Siebielec i in. 2012).

Tabela 4. Podział gleb na grupy pod względem zawartości części spławialnych oraz odczynu

	[%]	Odczyn (pH) gleby			
		< 4,5	4,6–5,5	5,6–6,5	> 6,5
Gleby mineralne					
Fracja spławialna	< 10	1	1	1	1
(ϕ ziaren poniżej 0,02 mm)	10–20	1	1	1	2
	20,1–35	2	2	3	3
	35,1–55	2	2	3	3
Gleby organiczne					
udział (%) substancji organicznej	6,0–10	2	2	2	2
	> 10	3	3	3	3

Tabela 5. Graniczne zawartości metali ciężkich (mg/kg) w wierzchniej warstwie gleby z uwzględnieniem podziału na grupy

Metal	Grupa gleby	Stopień zanieczyszczenia gleby					
		0	I	II	III	IV	V
Cd (kadm)	1	0,3	1,0	2,0	3,0	5,0	> 5
	2	0,5	1,5	3,0	5,0	10,0	> 10
	3	1,0	3,0	5,0	10,0	20,0	> 20
Cu (miedź)	1	15	30	50	80	300	> 300
	2	25	50	80	100	500	> 500
	3	40	70	100	150	750	> 750
Cr (chrom)	1	20	40	80	150	300	> 300
	2	30	60	150	300	500	> 500
	3	50	80	200	500	1 000	> 1 000
Ni (nikiel)	1	10	30	50	100	400	> 400
	2	25	50	75	150	600	> 600
	3	50	70	100	300	1 000	> 1 000
Pb (ołów)	1	30	70	100	500	2 500	> 2 500
	2	50	100	250	1 000	5 000	> 5 000
	3	70	200	500	2 000	7 000	> 7 000
Zn (cynk)	1	50	100	300	700	3 000	> 3 000
	2	70	200	500	1 500	5 000	> 5 000
	3	100	300	1 000	3 000	8 000	> 8 000

Tabela 6. Zalecane użytkowanie rolnicze gleb o różnych stopniach zanieczyszczenia metalami ciężkimi

Stopień zanieczyszczenia	Zalecane uprawy	Ograniczenia	Zalecenia
0	Wszystkie	brak	brak
I	Wszystkie	produkcja żywności dla dzieci	brak
II	zboża, okopowe, pastewne, użytkowanie pastwiskowe	warzywa (sałata, szpinak, kalafior, marchew)	brak
III	zboża, okopowe, pastewne (okresowa kontrola zawartości metali w roślinie), rośliny przemysłowe, trawy nasienne	pastwiska – pod warunkiem kontroli zawartości metali w pobieranej paszy	–
IV	rośliny przemysłowe (np. len, konopie, wiklina, ślazowiec, sylfia itp.), materiał siewny zbóż i traw, ziemniaki do produkcji spirytusu, rzepak na olej techniczny	–	zabiegi rekultywacyjne, wapnowanie, wprowadzanie substancji organicznej
V	rośliny przemysłowe (np. len, konopie, wierzba (wiklina), ślazowiec, sylfia itp.)	–	zabiegi rekultywacyjne, zadrzewienie i zakrzaczenie

3.1. Charakterystyka gatunków roślin do uprawy na terenach o podwyższonej zawartości metali ciężkich

3.1.1. Gatunki uprawne

Gorczyca sarepska (kapusta sitowa, musztardowiec)
Brassica juncea (L.) Czern.

Gatunek jednoroczny z rodziny kapustowate (*Brassicaceae*). W stanie naturalnym występuje w Azji (Syberia, Chiny), w Europie Wschodniej i w Ameryce Północnej.



Ryc. 2. Kwiaty gorczycy w zbliżeniu oraz łan w pełni kwitnienia

Źródło: <https://zdrowie831.wordpress.com/2017/09/18/musztarda/>, <https://murator-dom.pl/ogrod/rosliny/gorczyca-uprawa-wlasciwosci-i-zastosowanie-aa-CSTs-JRMz-jgdM.html> (za GettyImages).

Wymagania glebowe

Toleruje różne typy gleb, poza skrajnie podmokłymi oraz suchymi, piaszczystymi. Uważany za gatunek wytrzymały na suszę. Wymaga gleb zasobnych w wapń, na zakwaszonych gorzej się rozwija. Najlepiej, żeby odczyn pH gleb wynosił 5,8–6,8. Wymaga zabiegów uprawowych zabez-

pieczających możliwie największy zapas wody z opadów zimowych oraz stosowania zabiegów pielęgnacyjnych w sezonie, ograniczających straty wody spowodowane nadmiernym parowaniem.

Wymagania termiczne

Gatunek ten ma niewielkie wymagania klimatyczne. Kiełkuje w temp. 1–2°C. Po wschodach wytrzymuje nawet przymrozki (maks. do –6°C).

Potencjał plonotwórczy

Gatunek mniej plenny od rzepaku jarego. Plony nasion w szerokich granicach od 0,4 t do 1,2 t nasion z 1 ha.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Gatunek ten jest uważany za hyperakumulator metali ciężkich. Doniesienia literaturowe mówią o zdolności do pobierania na przykład chromu w ilości 1 400 mg/kg oraz ołowiu w ilości 15 000 mg/kg. Biomasa (tj. rośliny oraz nasiona) ze znacznie podwyższoną zawartością metali ciężkich nie może być przeznaczana na cele konsumpcyjne.

Podstawy agrotechniki

Wysiew nasion (6–9 kg/ha), w rzędy co 25–33 cm, możliwie jak najpłycej do głębokości 2 cm. Nawożenie tak jak dla rzepaku jarego. Optymalne dawki nawozów wynoszą około 30–40 kg P₂O₅/ha, 50–70 kg K₂O/ha i 10 kg MgO/ha. Nawozy fosforowe stosuje się jesienią pod orkę, a nawozy potasowe można używać w całości na wiosnę. Na glebach lekkich nawożenie fosforowo-potasowe można wy-

konać wiosną, a dodatkowo do gleby dostarczyć około 20 kg siarki. Dawki nawozów azotowych powinny wynosić 40–60 kg N/ha. Na glebach ciężkich całość azotu można wysiać przedsiewnie, a na lekkich – podzielić go na dwie dawki. Pierwszą (ok. 50%) stosujemy na przykład przed siewem, a drugą w czasie formowania rozety.

Miejsce w zmianowaniu

Może być wysiewana jako poplon ścierniskowy po zbożach, ewentualnie po ziemniakach.

Dostępność materiału siewnego

Aktualnie w Krajowym Rejestrze Odmian (dalej: KR) nie jest zarejestrowana żadna odmiana oryginalna. Do 2010 r. w KR wpisana była odmiana MAŁOPOLSKA. Oprócz niej w uprawie spotyka się także populacje miejscowe. We Wspólnym Katalogu Odmian Roślin Rolniczych (dalej: CCA) znajdują się obecnie 22 odmiany gorczycy sarepskiej.

Rzepak ozimy

***Brassica napus* L. ssp. *oleifera* Metzg.**

Kolejny jednoroczny gatunek z rodziny kapustowatych (*Brassicaceae*). Jest to główny krajowy gatunek rośliny oleistej. Jego uprawy w Polsce zajmują 95% powierzchni wszystkich upraw oleistych.

Wymagania glebowe

Rzepak ozimy najlepiej radzi sobie na glebach żyznych, głębokich i przepuszczalnych, które są zasobne w próchnicę



Ryc. 3. Kwiatostany rzepaku w zbliżeniu oraz porównanie łanu odmian o różnej dojrzałości [fot. M. Starzycki]

oraz wapń. Roślina ta najlepiej plonuje na glebach kompleksu pszennego bardzo dobrego i dobrego oraz żytniego bardzo dobrego. Odpowiednie są dla niego gleby utrzymane w wysokiej kulturze rolnej o pH w granicach od 6,0 do 7,0 przynajmniej średnio zasobne w potas, fosfor oraz magnez. Nie zaleca się uprawy rzepaku na stanowiskach piaszczystych, suchych, podmokłych, zakwaszonych oraz torfowych.

Wymagania termiczne

Rzepak najlepiej rośnie w rejonach o dużej wilgotności względnej powietrza i równomiernych opadach atmosferycznych w przedziale od 600 do 700 mm rocznie. Dzięki głębokiemu systemowi korzeniowemu rzepak jest w stanie przetrwać krótkotrwałe niedobory wody, jednak wykazuje się wrażliwością na długotrwałe susze. Odpowiednio rozwinięte i dobrze zahartowane rośliny przy utrzymującej się około 10 cm pokrywie śnieżnej są w stanie przetrzymać spadki temperatur nawet do -22°C . Do czynników

mających niekorzystny wpływ na przezimowanie rzepaku zaliczyć można przede wszystkim utrzymujące się niskie temperatury bez pokrywy śnieżnej. Z kolei wiosną i latem groźne dla rzepaku mogą okazać się wiosenne przymrozki, wymakanie roślin, burze gradowe oraz silny wiatr.

Potencjał plonotwórczy

Możliwości plonotwórcze najnowszych odmian to od 3,6 t do 4,5 t nasion z 1 ha. Po zbiorze nasion pozostaje od około 5 t do 9 t słomy, która w razie stwierdzenia w niej przekroczeń w zawartości metali ciężkich nie może być przeznaczana do celów na przykład paszowych.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Istnieje duże zróżnicowanie odmianowe w zdolności do gromadzenia metali ciężkich. Równocześnie zróżnicowana jest sama akumulacja metali w częściach roślin. Z reguły kadm jest akumulowany w pędach, podczas gdy ołów – w korzeniach rzepaku. Relatywnie najmniej metali ciężkich przedostaje się do nasion, z których produkowany jest olej. Jednakże proces rafinacji pozbawia olej wszelkich niekorzystnych dla zdrowia składników, eliminuje zanieczyszczenia właśnie takie jak metale ciężkie oraz aflatoksyny, benzo-piren czy pleśń i inne grzyby.

Podstawy agrotechniki

Roślina ta jest wymagająca pod względem struktury i sprawności gleby. Gleba nie powinna być przesuszona. Możliwy jest również siew bezpośredni lub uprawa bezorkowa.

Siew nasion w drugiej połowie sierpnia (do 25 sierpnia), na głębokość 1,5–2,5 cm.

O normie wysiewu decydują warunki pogodowe, typ gleby i odmiana. Obsada musi wynosić 40–45 szt./m² dla odmian populacyjnych i 35–40 szt./m² dla odmian mieszańcowych rzepaku. Ponadto trzeba uwzględnić poprawkę normy wysiewu ze względu na samosiewy rzepaku.

Zalecane jest jesienne nawożenie rzepaku ozimego dobrze przyswajalnymi (rozpuszczalnymi) formami fosforu i potasem, przy użyciu nawozów kompleksowych, stosowanych na ściernisko lub pod orkę siewną. Należy unikać stosowania azotu w formie saletrzaney, ponieważ osłabia mrozoodporność rzepaku. Jesienią średnie zapotrzebowanie rzepaku przy plonie założonym na 4–5 t/ha wynosi: w azot 60–80 kg, w fosfor 80–110 kg, w potas 140–180 kg. W praktyce w uprawach rzepaku jesienią dostarcza się całą potrzebną dawkę fosforu, natomiast potas dzieli się na dwie dawki jesienne po 50% lub w dawkach 75% i 25%.

Pierwsza wiosenna dawka azotu powinna zostać podana w najwcześniejszym możliwym terminie, natomiast druga w odstępie 2–4 tygodni, jednak nie później niż 4 tygodnie przed kwitnieniem. W praktyce oznacza to, że jeżeli pierwszą dawkę azotu podamy na początku marca, to drugą staramy się zastosować w połowie tego miesiąca. Przy intensywnym nawożeniu azotem należy stosować trzy dawki oscylujące w granicach 60%, 30% i 10%.

Mikroelementy (bor, mangan, żelazo, molibden) aplikuje się w formie nawozów dolistnych.

Miejsce w zmianowaniu

Dobrym przedplonem dla rzepaku ozimego są wczesne ziemniaki, rośliny bobowate i ich mieszanki z trawami. Nie należy uprawiać rzepaku po sobie lub po innych kapustowatych – przerwa w uprawie na tym samym polu powinna wynosić co najmniej 4 lata. Można również uprawiać rzepak po zbożach (jęczmień jary i ozimy, pozostałe ozime zboża oraz jare – pszenica i owies).

Dostępność materiału siewnego

W KR znajdują się obecnie 34 odmiany rzepaku ozimego. Godne polecenia są odmiany krajowe, o potwierdzonej odporności na warunki zimowe oraz lokalnie występujące patogeny i szkodniki. Obecne w doborze formy dwuzerowe o wysokiej plenności i zaolejeniu są przydatne zarówno w celach konsumpcyjnych, jak i biopaliwowych. Odmiany o zwiększonej zawartości kwasu oleinowego kosztem linolenowego mogą być bardziej przydatne do produkcji biopaliw.

Lucerna siewna***Medicago sativa L.***

Jest to jedna z podstawowych roślin bobowatych (*Fabaceae*). Roślina wieloletnia.

Wymagania glebowe

Najbardziej przydatne do uprawy tego gatunku są gleby żyzne i średnio żyzne o odczynie alkalicznym (pH 6,5–7,0), szybko nagrzewające się i przepuszczalne. Przy niższym pH należy zastosować wapnowanie, najlepiej już pod roślinę



Ryc. 4. Kwiaty lucerny oraz łan w fazie do zbioru [fot. Z. Bodzon]

przedplonową lub w ostateczności po jej zbiorze, na przykład na ściernisko rośliny zbożowej. Lucerna nie toleruje stanowisk zalewowych i o wysokim poziomie wód gruntowych.

Lucerna siewna, podobnie jak inne wieloletnie rośliny z rodziny bobowatych, charakteryzuje się silnie rozwiniętym systemem korzeniowym, sięgającym u tego gatunku na głębokość ponad 2 m. Wydzieliny takiego systemu korzeniowego mogą udostępniać, na potrzeby własne i roślin następczych, składniki pokarmowe (makro- i mikroelementy) pochodzące z trudno rozpuszczalnych związków, w tym także związków fosforu, znajdujących się w podglebiu, niedostępnych dla innych gatunków roślin. Lucerna pozostawia w glebie duże ilości masy organicznej w postaci resztek poźniwnych i masy korzeniowej, z których powstaje próchnica.

Wymagania termiczne

Jest to typowa roślina światłolubna dnia długiego. Jej rozwojowi sprzyja wysoka temperatura latem, przy czym znosi

dobrze okresowe susze. Zimotrwałość jest najczęściej uzależniona od pochodzenia danej odmiany.

Potencjał plonotwórczy

W roku siewu, w zależności od fazy rozwoju, można uzyskać od 2,3 t (siew czysty, faza pełni kwitnienia) do około 3,0 t (siew czysty, faza pąkowania) suchej masy z 1 ha. W kolejnych latach użytkowania plony lucerny mogą oscylować średnio rocznie od 3 t do 4 t s.m./ha.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Gatunek ten wykazuje tolerancję na zawartość metali ciężkich w glebie oraz w wodzie znacznie powyżej zakresu tolerancji innych gatunków. Posiada szczególne predyspozycje do pobierania jonów Cd, Pb i Zn. Największe stężenie jonów tych metali osiąga po około 80 dniach wegetacji. Opisano również zdolność lucerny do pobierania znacznych ilości Ni oraz Cu. Uprawa tego gatunku, jak i innych z rodziny bobowatych (np. koniczyny, przelotu, komonicy czy rutwicy wschodniej, wpływa na jakość gleby, zwiększając zawartość materii organicznej i podnosząc odczyn pH. Tym samym rośliny uprawiane po bobowatych w znacznie mniejszym stopniu pochłaniają metale ciężkie z gleby.

Podstawy agrotechniki

Pod lucernę gleba powinna być starannie uprawiona. Należy dążyć do likwidacji uciążliwych chwastów oraz do przygotowania gleby tak, aby mógł bez przeszkód rozwijać się głęboki system korzeniowy.

Siew

Siew lucerny najczęściej wykonujemy wiosną (12–20 kg/ha), ale można wysiać też rośliny w okresie letnim od czerwca do drugiej dekady lipca (12–16 kg/ha). Siew wiosenny wykonuje się w drugiej dekadzie kwietnia, po nagrzaniu gleby.

Przed wysiewem nasiona powinny być zaprawione preparatami fungicydowymi (np. zaprawa nasienna T w formie zawiesiny lub Funaben T). Równocześnie, jeśli na polu w dłuższym okresie przed siewem nie uprawiano roślin bobowatych, nasiona należy zaprawić szczepionką zawierającą bakterie wiążące azot z grupy *Rhizobium* (Nitragina). Lucernę wysiewamy w rozstawie rzędów 12,5–15 cm, na głębokość 1,5–2 cm, na glebach zwięzłych – płycej, a na glebach lekkich – głębiej.

Nawożenie

Lucerna jest bardzo wrażliwa na zakwaszenie gleby. Regulacji odczynu należy dokonać jesienią, pod przedplon lub krótko po jego zbiorze. Na glebach lekkich, o małej pojemności wodnej, stosuje się wapno węglanowe, wymagające bardzo dokładnego wymieszania z glebą. Szybciej działające wapno tlenkowe zaleca się na gleby ciężkie i średnie.

Wielkości dawek nawożenia fosforowego i potasowego zależą przede wszystkim od zasobności gleb w te składniki. Przy pełnym użytkowaniu lucerny w danym roku zaleca się aplikację całej dawki nawozów fosforowych jesienią lub wiosną. Dawki nawozów potasowych należy dzielić – pierwszą stosuje się wczesną wiosną, przed ruszeniem we-

getacji, a kolejne dawki – w zależności od liczby pokosów w ciągu sezonu wegetacyjnego.

W dalszych latach uprawy lucerna potrzebuje głównie nawożenia fosforem i potasem. Zalecane dawki przy średniej zawartości tych składników w glebie wynoszą w czystym składniku – około 90 kg fosforu i 140 kg potasu na 1 ha.

W przypadku stwierdzenia niedoborów wapnia i magnezu można stosować nawożenie pogłównie wapnem (dolomitem), w dawce do 2 t na 1 ha, siarczanem magnezu w dawce do 50 kg na 1 ha. Niedobory mikroelementów można uzupełnić nawozami dolistnymi, w terminie dwóch tygodni po zbiorze pokosu.

Głównym źródłem azotu dla lucerny jest ten dostarczany przez bakterie brodawkowe. Na ogół jego ilość pokrywa zapotrzebowanie rośliny. W niekorzystnych warunkach rozwój bakterii brodawkowych może być zbyt słaby. Występują wtedy niedobory azotu, co objawia się jasną barwą, chlorozą i żółknięciem liści oraz słabym wzrostem roślin. W takim przypadku nawożenie azotem jest konieczne. Lucerna jest wrażliwa na niedobór boru, miedzi i molibdenu i średnio wrażliwa na niedobór manganu.

W przypadku wysiewu lucerny z trawami, nawozy fosforowe aplikuje się tak, jak dla siewu czystego. Nawożenie potasowe wymaga nowych podziałów dawek na tyle, ile pokosów przewiduje rolnik w swoim gospodarstwie. Ważne, aby stosować je przed każdym odrostem. Dzięki symbiozie z bakteriami brodawkowymi, lucerna uprawiana w siewie czystym nie wymaga nawożenia azotowego.

Miejsce w zmianowaniu

Najlepszy przedplon lucerny to rośliny okopowe, kukurydza, zboża jare lub ozime oraz trawy. Nie należy uprawiać lucerny po rzepaku oraz po bobowatych grubo- i drobno-nasiennych. Lucerna nie powinna powracać na to samo pole wcześniej niż po 5–6 latach.

Lucerna jest również jednym z najlepszych przedplonów pod inne rośliny. Taki przedplon, przy dużym udziale zbóż w skali kraju i w poszczególnych gospodarstwach, jest szczególnie cenny. Ponadto lucerna może być ważnym elementem programów ochrony środowiska, programów rolnośrodowiskowych, produkcji ekologicznej i integrowanej.

Dostępność materiału siewnego

Aktualnie dostępnych jest 5 odmian tego gatunku, w tym 3 krajowe (ULSTAR, ODRA i NORDICSTAR). W ofercie firm nasiennych znajdują się nasiona lucerny siewnej wzbogacone bakteriami z grupy *Rhizobium*.

Słonecznik zwyczajny

***Helianthus annuus* L.**

Roślina jednoroczna, z rodziny astrowatych (*Asteraceae*). obcopylna, zapyłana przez owady (np. pszczoły i trzmiele). W sprzyjających warunkach dorasta do wysokości 2,5–4 m.

Wymagania glebowe

Roślina ta przydatna jest również do uprawy na glebach słabszych – IV, V klasy. Odczyn gleby obojętny.



Ryc. 5. Słonecznik – widok kwiatostanu oraz łąnu przed zbiorem

Źródło: <http://www.pobiedziska.pl/sloneczniki-jak-z-obrazow/>, <https://www.czystapro-mocjalg.pl/jak-uprzyc-slonecznik-poznaj-sposob-na-smaczny-prazony-slonecznik/>.

Wymagania termiczne

Niewątpliwą zaletą słonecznika jest jego wytrzymałość na przymrozki do -4°C i odporność na przejściowe okresy suszy.

Potencjał plonotwórczy

Plon biomasy z ha to około 20–30 t.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Słonecznik pobiera względnie duże ilości kobaltu, chromu, miedzi, manganu, niklu, ołowiu, arsenu oraz cynku. W badaniach stwierdzano najniższe stężenia metali ciężkich w liściach oraz pędach słonecznika, z kolei najwyższe – w nasionach oraz łupinach nasion. Olej uzyskany z wyciśnięcia takich nasion nie nadaje się do konsumpcji, dlatego też jeszcze w fazie przed zawiązaniem nasion całe nadziemne części roślin (liście i pędy) należy przeznaczyć na paszę dla zwierząt. Może być natomiast poddany procesowi rafinacji, który obniża zawartość metali ciężkich do wartości dopuszczalnych.

Podstawy agrotechniki

Uprawa gleby tak jak pod zboża jare. Nawożenie: N 60–80 kg/ha, P₂O₅ 60–90 kg/ha, K₂O 120–180 kg/ha. Norma wysiewu: przy siewie wiosennym – od 8 do 10 kg/ha, siew opóźniony około 10 sierpnia w ilości 30–40 kg/ha. Uprawa słonecznika nie wymaga też dodatkowych nakładów finansowych na sprzęt, wręcz przeciwnie – pozwala maszynom takim jak siewnik czy kombajn pozostawać dłużej w użyciu i czerpać z nich większą korzyść finansową.

Miejsce w zmianowaniu

Może być doskonałym zmianowaniem na przykład dla upraw kukurydzy, okopowych, strączkowych, motylkowych z trawami oraz dla zbóż. W warunkach gleb nieskażonych, słonecznik w uprawie na nasiona wkomponowuje się dobrze w termin prac polowych, ponieważ dojrzewa po żniwach pszenicy a przed żniwami kukurydzy.

Dostępność materiału siewnego

Odmiany słonecznika oleistego: LECH, SŁONECZNIK WIELKOPOLSKI, BLIZAR RM, LG 53.77, LG 50.455 CLP. Jest również wiele odmian ozdobnych słonecznika.

Len zwyczajny

***Linum usitatissimum* L.**

Jednoroczny gatunek uprawny, z rodziny lnowatych (*Linaceae*). Posiada dwa główne typy użytkowe – włóknisty oraz oleisty.



Ryc. 6. Kwiaty lnu oraz rośliny w łanie w fazie pełni kwitnienia

Źródło: <https://zielonyogrodek.pl/katalog-roslin/jednoroczne-dwuletnie/12527-len>,
<https://www.salutfrancja.com/francuskie-pola-lnu/>.

Wymagania glebowe

Pod uprawę lnu nadają się prawie wszystkie gleby średnie i mocniejsze o przepuszczalnym podłożu i dobrze magazynujące wodę. Najlepsze są gleby gliniasto-piaszczyste i piaszczysto-gliniaste. Nie nadają się gleby lekkie piaszczyste, mocne gliniaste, ropy i torfy.

Wymagania termiczne

Len należy uprawiać w rejonach, gdzie roczna ilość opadów wynosi co najmniej 600–650 mm, a w okresie wegetacji 110–150 mm. Rośliny lnu w okresie normalnego wzrostu pobierają i wyparowują bardzo duże ilości wody. W Polsce najlepsze warunki do uprawy lnu panują w północnej, północno-wschodniej i południowo-wschodniej części kraju.

Potencjał plonotwórczy

Plony nasion lnu wahają się od 2,0 t/ha do 2,4 t/ha, a plony pozostałej słomy – od 3,4 t/ha do 4,4 t/ha. Nie ma za-

sadniczych różnic w plonowaniu odmian z wymienionych grup użytkowych.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Pomimo względnie małej biomasy, w porównaniu do innych roślin rolniczych, len jest w stanie pobierać duże ilości metali ciężkich, a szczególnie kadmu (do ok. 5,1 mg/kg). Znacznie efektywniej pobiera metale ciężkie z podłoża niż na przykład konopie. Relatywnie najmniej metali ciężkich stwierdza się w nasionach, najwięcej zaś w korzeniach i pędach.

Podstawy agrotechniki

Orkę przedzimową należy wykonać na pełną głębokość 20–25 cm i na zimę pozostawić w ostrej skibie. Wiosenne uprawki przedsiewne to głównie włókovanie, bronowanie i mechaniczne niszczenie chwastów. Termin siewu uzależniony jest od warunków pogodowych, najczęściej przypada na II lub III dekadę kwietnia. Wysiew nasion w liczbie 40–60 kg/ha (formy oleiste) oraz 120–130 kg/ha (formy włókniste), na głębokość około 2 cm.

Miejsce w zmianowaniu

Len można uprawiać po każdej roślinie, która dała dobry plon i pozostawiła glebę w kulturze. Z roślin zbożowych dobrym przedplonem jest pszenica i pszenżyto ozime, a z okopowych – buraki i ziemniaki.

Dostępność materiału siewnego

W każdym z typów użytkowych są zarejestrowane po 4 odmiany.

Konopie siewne *Cannabis sativa* L.

Jednoroczna roślina uprawna z rodziny konopiowatych (*Cannabaceae*).



Ryc. 7. Wierzchołki pędów konopi oraz zbiór plantacji

Źródło: <https://olvita.pl/konopia-siewna-wlasciwosci-i-zastosowanie/>, <https://wolnekonopie.org/2018/11/co-zrobic-aby-zarobic-uprawiajac-konopie-siewne/>.

Konopie siewne są szeroko wykorzystywane w zastosowaniach niekonsumpcyjnych jako roślina zapewniająca surowiec do produkcji włókna naturalnego, płyt izolacyjnych, lin i sznurów, oleju, lakieru, papieru itp., jak i do produkcji energii (biogaz, biodiesel, paliwa stałe).

Uprawa konopi włóknistych w Polsce uregulowana jest Ustawą o przeciwdziałaniu narkomanii (Dz.U. z 2005 r. nr 179, poz. 1485 z późniejszymi zmianami), która zobowiązuje producentów konopi do uzyskiwania zezwolenia z urzędu gminy lub miasta właściwego dla położenia planowanej plantacji. W momencie podjęcia decyzji o uprawie

wie konopi, rolnik składa w gminie deklarację. W oparciu o tą deklarację gmina występuje do właściwego marszałka województwa, który dokonuje rejonizacji uprawy konopi. Dlatego też deklaracja uprawy konopi powinna dotrzeć do gminy z odpowiednim wyprzedzeniem (w miesiącach od września do października) w roku poprzedzającym planowaną uprawę. Dopiero po przyznaniu rejonizacji rolnik może wystąpić do gminy z wnioskiem na uprawę.

Parlament Europejski podjął niedawno uchwałę dla uprawy konopi włóknistych zwiększając ilość substancji THC (czyli organicznego związku chemicznego z grupy kannabinoidów, głównej substancji psychoaktywnej zawartej w konopiach) z 0,2% do 0,3%. W ten sposób otworzyła się droga do masowej produkcji konopi przemysłowych w Europie. Dzięki temu można będzie uprawiać więcej odmian przy wyeliminowaniu niebezpieczeństwa przekroczenia niedopuszczalnego poziomu THC, co dotychczas teoretycznie zagrażało każdej plantacji konopi.

Wymagania glebowe

Najbardziej odpowiednie dla uprawy konopi są gleby dobre oraz średnio przydatne rolniczo (nie słabsze niż kl. IVb), o dużej zasobności w składniki pokarmowe i obojętnym odczynie. Gleby te określone są jako należące do kompleksu pszenno-buraczanego. Nie nadają się do uprawy tej rośliny gleby bielico-we zalegające na piasku, podmokłe, kwaśne i zlewne. Konopie lubią stanowiska mokre, do prawidłowego wzrostu potrzebują dużej ilości wody – wiosną poziom wód gruntowych powinien wynosić około 60 cm, a przed zbiorem – poniżej 100 cm.

Wymagania termiczne

Rośliny konopi nie są wrażliwe na wiosenne przymrozki. Warunki klimatyczne do uprawy tego gatunku są odpowiednie na terenie całego kraju. Konopie mają małe wymagania świetlne – są roślinami krótkiego dnia, który hamuje rozrost łodygi i przyspiesza dojrzewanie nasion. Kiełkują przy temperaturze 8–10°C w ciągu 7–12 dni.

Potencjał plonotwórczy

W sprzyjających warunkach można uzyskać od 15 t do 19 t suchej masy słomy z 1 ha oraz od 0,6 t do 0,9 t nasion. Plon włókna może wahać się od 4,0 t do 4,5 t z 1 ha uprawy.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Metale ciężkie są akumulowane głównie w korzeniach, za wyjątkiem arsenu, który koncentruje się bardziej w częściach nadziemnych. Konopie siewne uprawiane na glebie skażonej chromem nie wykazywały podwyższonego stężenia tego metalu w nasionach.

Badania nad zdolnością konopi do rekultywacji gleby rozpoczęły się w 1998 r., kiedy firma Phytotech wraz z ukraińskim Instytutem Upraw Włóknodajnych zasadziła ten gatunek w celu usunięcia zanieczyszczeń w pobliżu Czarnobyła. Uzyskano obiecujące wyniki, aczkolwiek ich rezultaty nie zostały opublikowane.

Podstawy agrotechniki

Zabiegiem niezbędnym jest głęboka (ok. 30 cm) orka zimowa. Na wiosnę należy ziemię dobrze wyrównać, co gwarantuje rozmieszczenie nasion na równej głęboko-

ści (2–4 cm). Siewy mogą trwać od III dekady kwietnia do końca maja (praktyczna wskazówka – po rozpoczęciu siewów kukurydzy). Nasiona wysiewa się w ilości: dla plantacji nasiennych 10–15 kg/ha w rozstawie rzędów 40–50 cm; dla uprawy na cele przemysłowe (włókiennictwo) 60–70 kg/ha, rozstawa 7,5–15 cm; dla uprawy na cele przemysłowe (celuloza i biokompozyty) 30–40 kg/ha, rozstawa 7,5–15 cm.

Na polach zachwaszczonych można zastosować dozwolone do ochrony konopi środki chwastobójcze (na chwasty jedno- i dwuliścienne). Poza tym nie potrzeba stosować środków przeciw chorobom i szkodnikom.

Konopie ze względu na długi okres wegetacji wymagają wysokiego nawożenia mineralnego. W zależności od zasobności gleby w składniki pokarmowe oraz przedplon, zaleca się następujące dawki nawozów mineralnych: N 90–120 kg/ha (2/3 dawki przedsiemnie i 1/3 pogłównie), P_2O_5 70–100 kg/ha i K_2O 150–180 kg/ha. Nawozy fosforowe i potasowe można częściowo zastosować na jesieni pod orkę (ok. 60% dawki), a resztę bezpośrednio przed siewem nasion razem z nawozami azotowymi.

Miejsce w zmianowaniu

Dobrym przedplonem w zmianowaniu są rośliny okopowe, strączkowe i dobrze plonujące zboża. Konopie są z kolei dobrym przedplonem dla innych upraw, gdyż ograniczają znacznie występowanie chwastów oraz pozostawiają glebę w dobrej strukturze.

Dostępność materiału siewnego

Z uwagi na bardzo duże zainteresowanie rolników uprawą konopi siewnych Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich – PIB w Poznaniu (IWNiRZ) powołał krajowy Program Konopny stanowiący praktyczne wykorzystanie opracowanych i wdrożonych w Instytucie wysoko cenionych na świecie odmian konopi przemysłowych. W ramach Programu Konopnego Instytut na lata 2020/21 oferował rolnikom możliwość uprawy polskich odmian na cele nasienne w oparciu o umowę kontraktacyjną, przy jednoczesnym dostarczeniu nasion kwalifikowanych, pomocy w dokonaniu zgłoszeń urzędowych, wszelkiego doradztwa agrotechnicznego i zakupu całego plonu nasion od rolnika według ustalonych cen. Do sprzedaży oferowane są odmiany włókniste: BIAŁOBRZESKIE, TYGRA oraz HENOLA (uprawiana głównie na olej), zawierające mniej niż 0,2% substancji psychoaktywnej (THC).

Poza tym Instytut świadczy także usługi koszenia materiału roślinnego z przeznaczeniem zarówno na wykorzystanie wiech, jak i dla pozyskania nasion.

3.1.2. Trawy

Perz wydłużony (wydmuchrzyca wydłużona)

Elymus elongatus (Host.) Runemark;

Elytrigia elongata (Host.) Nevski

Trawa ta w stanie naturalnym występuje na suchych, zasolonych stanowiskach w Europie południowo-wschodniej i w Azji. Jest to gatunek wieloletni, charakteryzujący się



Ryc. 8. Kwiatostany perzu oraz plantacja w woj. warmińsko-mazurskim [fot. D. Martyniak, G. Żurek]

długimi, szczeciniastymi liśćmi o długości nawet do 30 cm, o szarozielonej barwie.

Wymagania glebowe

Perz wydłużony preferuje gleby podobne do tych, na których najlepiej rosną zboża. Co ciekawe, na glebach lekkich rozwija się szybciej niż na ciężkich. Uwzględniając warunki, w jakich gatunek ten występuje w naturze, są to gleby lekkie, o pH między 6,5 a 10,0. Optimum pH dla produkcji biomasy tego gatunku zawiera się między 7,5–9,0.

Wymagania termiczne

Roślina rośnie dobrze na terenie całego kraju w aktualnych warunkach termicznych i wodnych.

Potencjał plonotwórczy

Koszenie odrostu zielonej masy wegetatywnej z przeznaczeniem na przykład do produkcji biogazu, konieczne jest już w roku siewu, zwłaszcza przy wczesnym wiosennym siewie (kwiecień–maj). Należy je przeprowadzić na wysokość 8–10 cm, a zebraną zieloną masę przeznaczyć na pasze do bezpośredniego skarmiania, do produkcji kiszonki bądź biogazu. Możliwe do uzyskania plony biomasy to od 5 t (bez nawożenia) do 15 t suchej masy z 1 ha. W doświadczeniach własnych stwierdzono, że bez nawożenia trudno jest uzyskać zadowalające plony, zwłaszcza na glebie mniej zasobnej. Zastosowanie nawozów mineralnych umożliwiło utrzymanie plonu biomasy na poziomie 10–12 t z 1 ha do 4. roku od wysiewu.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Opisano zdolność do pochłaniania względnie dużych ilości niklu, kadmu oraz ołowiu. Największe ilości metali ciężkich kumulowane były w systemie korzeniowym.

Podstawy agrotechniki

Najbardziej korzystnym terminem siewu jest sierpień, gdyż rośliny rozwijają się wolno po wschodach, i przy wysiewie wiosennym zbyt duże nakłady należałoby ponieść na odchwaszczanie. Nasiona sieje się w ilości 10–15 kg/ha, na głębokość 1–2 cm, w rzędy co 30 cm. Zabiegi pielęgnacyjne mają szczególne znaczenie w roku siewu, ponieważ znacznie ograniczają występowanie chwastów także w latach następnych. Dotyczy to zwłaszcza takich chwastów,

jak: chwastnica jednostronna, wiechlina roczna oraz włośnica zielona. Chwasty te, podobnie jak miotła i wyczyniec polny, są wrażliwe (od fazy 2 liści do końca krzewienia) na działanie środka chemicznego Puma Uniwersal, zastosowanego do oprysku w zalecanej dawce 0,8–1,0 litra na ha. Środek ten stosuje się, gdy rośliny perzu są już dostatecznie rozkrzewione (minimum 5–6 liści). Skuteczność oprysku jest większa, gdy nasiona chwastów kiełkują, a gleba jest wilgotna. W przypadku jednoczesnego zwalczania chwastnicy jednostronnej i chwastów dwuliściennych można zastosować mieszaninę: Puma Uniwersal – 1 l/ha + Chwastox Extra 300 Sl – 3,0 l/ha.

Nawożenie fosforowo-potasowe można stosować jako uzupełniające jesienią, zależnie od zasobności gleby w te składniki. Dotyczy to zarówno uprawy na suchą, jak i na zieloną biomasę. Mniej korzystny, lecz dopuszczalny, jest termin jesienny. Nawożenie azotowe przy produkcji biomasy do spalania należy zastosować wczesną wiosną (jak najwcześniej, na przełomie marca/kwietnia), co najmniej w ilości do 60 kg czystego składnika na 1 ha. Dotychczasowe badania wskazują, iż do uzyskania wysokich plonów suchej biomasy potrzeba 60–80 kg azotu na 1 ha. Pamiętać należy, że wczesny wysiew nawozów azotowych wpływa na wzrost liczby pędów generatywnych, co przyczynia się do wyżki plonu. Opóźnienie nawożenia azotowego wzmacnia konkurencyjność pędów wegetatywnych kosztem pędów generatywnych.

Nawożenie azotowe plantacji w uprawie dla uzyskania masy zielonej (np. na biogaz) w latach pełnego użytko-

wania rozpocząć należy również wczesną wiosną (jak najwcześniej na przełomie marca i kwietnia), stosując nawozy wolno działające, na przykład mocznik lub saletrę wapniową w dawce około 40–60 kg azotu na ha. Podobne dawki stosuje się w następnych 3–4 pokosach, a więc corocznie łącznie 120–160 kg/ha. Natomiast w roku siewu, w którym można uzyskać stosunkowo zadowalający plon zielonki często już z dwóch pokosów, dodatkowe nawożenie azotowe przy dobrych stanowiskach przeważnie nie jest konieczne.

Miejsce w zmianowaniu

Perz wydłużony można uprawiać w zasadzie po wszystkich roślinach z wyjątkiem traw nasiennych. Wieloletni charakter tej uprawy powoduje korzystne zmiany w strukturze gleby, akumulację materii organicznej.

Dostępność materiału siewnego

Obecnie zarejestrowane w Polsce są 3 odmiany tego gatunku, z czego tylko dla jednej (BAMAR) jest realizowana reprodukcja materiału siewnego (Hodowla Roślin Grunwald sp. z o.o. Grupa IHAR).

Kostrzewa trzcinowata *Festuca arundinacea* Schreb.

Kostrzewa trzcinowata jest trawą wieloletnią, wytrzymałą na ostre zimy oraz na niskie temperatury. Rośliny tego gatunku są bardzo wysokie, tworząc duże, skupione, stojące kępy. Charakteryzuje się szybkim tempem wzrostu i rozwoju oraz wysoką wydajnością biomasy. Rośliny kostrzewy



Ryc. 9. Kwiatostany kostrewy trzcinowatej oraz 3-letnia plantacja odmiany 'Rahela' [fot. G. Żurek]

trzciniowatej wyróżniają się obfitym ulistnieniem, długimi i szerokimi liśćmi, które są dość twarde i sztywne, koloru soczystej i jasnej zieleni.

Wymagania glebowe

Ze względu na silnie rozwinięty system korzeniowy można ją uprawiać na wszystkich rodzajach gleb, również tych nieco słabszych, a także stosować w zadarnieniach specjalnych do rekultywacji hałd i gleb zdegradowanych. Udaje się również na glebach wilgotniejszych, mineralnych, zasobnych w próchnicę i składniki pokarmowe. Dzięki silnie rozwiniętemu systemowi korzeniowemu kostrewa trzcinowata toleruje długotrwałe susze i uważana jest za gatunek najbardziej na nie odporny spośród traw klimatu umiarkowanego. W porównaniu do innych gatunków z rodzaju

kostrzewa, system korzeniowy kostrzewy trzcinowatej jest najsilniej rozwinięty na głębokości 50–100 cm.

Wymagania termiczne

Gatunek może wykazywać pewną wrażliwość na silne mrozy, na wiosnę wolno rusza i odbudowuje uszkodzenia. Generalnie przydatny jest do uprawy na terenie całego kraju.

Potencjał plonotwórczy

Możliwe do uzyskania plony biomasy – przy zbiorze jednofazowym: od 6 t (bez nawożenia) do 12 t suchej masy z 1 ha. Według danych COBORU w uprawie na zielonkę (kilka pokosów) możliwe jest uzyskanie do 28 t suchej masy z 1 ha. W momencie zbioru biomasa kostrzewy trzcinowatej ma zazwyczaj około 30% suchej masy.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Opisano zdolność do pobierania relatywnie dużych ilości kadmu i ołowiu z podłoża.

Podstawy agrotechniki

Przed siewem glebę należy dokładnie odchwaścić z obcych gatunków traw, zwłaszcza z perzu właściwego, chwastnicy i miotły. Następnie wykonujemy orkę zimową, a wiosną włókovanie, wysiew nawozów i ich przykrycie przez uprawki przedsiewne. W razie konieczności, przy opóźnieniu siewu, można użyć lekką bronę w celu zniszczenia skielkowanych chwastów. Górna warstwa gleby nie może być zbyt pulchna, tak aby nasiona znalazły się w niej nie głębiej niż 2 cm.

Przedsięwzięcie nawożenia mineralnego ma ogromny wpływ na wysokość plonu biomasy ze względu na właściwy początkowy rozwój roślin, a przede wszystkim na ich ukorzenienie i rozkrzewienie. Nawożenie fosforowo-potasowe stosuje się w ilości 80 kg P_2O_5 i 100–120 kg K_2O na 1 ha. Nasiona najlepiej wysiewać w siewie czystym, w glebę odleżałą, na głębokość 1–2 cm i w rozstawie 30–40 cm, w ilości 10–15 kg na 1 ha zależnie od żyzności gleby.

Wiosenny termin siewu (od kwietnia do połowy czerwca) zapewnia bardziej równomierne wschody niż termin letni lub wczesnojesienny. Siew letni jest bardziej zawodny z powodu upałów i skąpych opadów, natomiast wczesnowiosenny jest pewniejszy z racji zgromadzonej wilgoci po zimie, kiedy to rośliny mają lepsze warunki do rozwoju i wzrostu oraz rozbudowy systemu korzeniowego. Należy unikać zbyt gęstego siewu plantacji ponieważ zbyt duża obsada roślin może powodować wyleganie roślin.

Plantację należy nawozić co roku nawozami mineralnymi. Wczesną wiosną (jak najwcześniej, na przełomie marca/kwietnia) należy zastosować nawożenie azotowe w ilości do 60 kg czystego składnika na 1 ha. W przypadku planowanego wykorzystania biomasy do produkcji biogazu zwiększamy nawożenie azotowe do 120 kg w dwóch podzielonych dawkach: wiosną i po zbiorze I pokosu. Coroczne nawożenie fosforowo-potasowe najlepiej zastosować jesienią, po zbiorze nasion lub biomasy w dawce 80 kg P_2O_5 (np. superfosfat) i 80 kg K_2O (np. sól potasowa) na 1 ha. Dawki te można obniżyć lub zwiększyć zależnie od zasobności gle-

by. Dopuszczalne jest także stosowanie nawozów fosforowo-potasowych w dalszych latach użytkowania plantacji, w terminie wiosennym, lecz przy dobrym uwilgotnieniu gleby.

Miejsce w zmianowaniu

Kostrzewę trzcinowatą można uprawiać w zasadzie po wszystkich roślinach z wyjątkiem traw nasiennych. Wieloletni charakter tej uprawy powoduje korzystne zmiany w strukturze gleby, akumulację materii organicznej.

Dostępność materiału siewnego

W wykazie odmian są obecnie zaledwie 3 odmiany tego gatunku. Dostępny jest również materiał siewny odmiany RAHELA, będący w dyspozycji wymienionej już powyżej Hodowli Roślin Grunwald sp. z o.o. Grupa IHAR.

3.1.3. Gatunki dedykowane na cele energetyczne

Wierzba *Salix* sp.

Rośliny krzewiaste lub drzewa z rodziny wierzbowatych (*Salicaceae*). W Polsce rośnie ponad 60 gatunków wierzb, z których większość to mieszańce międzygatunkowe. Znaczenie praktyczne ma kilka gatunków: wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.), wierzba purpurowa (*S. purpurea* L.) oraz mieszańiec wierzby długokończystej z wierzbą wiciową (*S. xdasyclados* Wimm. x *S. viminalis* L.).

Wymagania glebowe

Dobrym stanowiskiem pod plantacje szybko rosnących gatunków wierzb krzewiastych są grunty użytkowane rolniczo (płużnie) wyższych klas bonitacyjnych na przykład



Ryc. 10. Wierzba wiciowa – kwiaty na pędzie oraz fragment plantacji

Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Salix_viminalis_003.jpg, <https://murator-dom.pl/galeria/wierzba-energetyczna/gg-PCqz-xTxX-td9y/gp-ejF2-4tKX-X84S>.

klasy IIIa i IIIb (gleby odpowiednie pod uprawę rzepaku). Dobre są również do tego celu gleby aluwialne napływowe oraz mady, które mogą być okresowo nadmiernie wilgotne (ale nie zabagnione), gleby te są aktualnie zagospodarowane zwykle jako użytki zielone. Pod uprawę szybko rosnących wierzb krzewiastych mogą być przeznaczane grunty słabsze, niższych klas bonitacyjnych, ale pod warunkiem ich nawadniania i intensywnego nawożenia na przykład osadami ściekowymi. Możliwe jest również zagospodarowanie gleb zanieczyszczonych przez przemysł metalami ciężkimi.

Wymagania termiczne

Wierzba wiciowa nie ma specjalnych wymagań termicznych – udaje się na terenie całego kraju.

Potencjał plonotwórczy

W zależności od jakości podłoża, lokalnych warunków oraz rotacji (roczna, 2-letnia lub 3-letnia) plony biomasy wierzby mogą wahać się do 19 do 25 t/ha.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Stwierdzono zdolność do efektywnej akumulacji jonów kadmu, żelaza, manganu, cynku, miedzi i ołowiu w pędach wierzby wiciowej, porastającej tereny skażone.

Wiele badań wskazuje, że najlepsze efekty w fitoremediacji daje wierzba wiciowa (*S. viminalis* L.), która dzięki dobrym właściwościom adaptacyjnym szybko przystosowuje się do prawie każdego siedliska. Ponadto ma zdolność absorbowania biogenów oraz innych pierwiastków śladowych, co sprzyja detoksykacji gruntu. Dodatkowo stabilizuje i umacnia grunt.

Podstawy agrotechniki

Plantacja wielkości hektara może pomieścić do czterdziestu tysięcy krzewów. Sadzonki wierzby energetycznej sadi się zazwyczaj w rzędach, w rozstawie od 50 cm między rzędami. Odległość ta jest uzależniona od szerokości sprzętu wykorzystywanego później na plantacji. Pożądana odległość sadzonki od sadzonki powinna wynosić powyżej 70 cm. Sadzonki wierzby energetycznej powinny mieć długość ponad 20 cm, a sadi się je głęboko w ziemię, pozostawiając 2 cm odcinki. Na dużych plantacjach wykorzystuje się do tego celu sadzarki. Sadzonki wierzby energetycznej nazywane są sztobrami lub zrzecami. Są to odcinki pociętych pędów o minimalnej grubości powyżej 7 mm.

Do czasu rozwinięcia korzeni i pędów gleba powinna być systematycznie pielona, by chwasty nie zdominowały uprawy.

Miejsce w zmianowaniu

Bardzo ważne jest dobrze odchwaszczone stanowisko pod uprawę wierzby. Mogą to być zatem rośliny okopowe lub bobowate zbierane na zielonkę. Po zbiorze przedplonu należy wykonać orkę głęboką na około 50 cm oraz zestaw zabiegów przed sadzeniem (kultywator + brona).

Dostępność materiału rozmnożeniowego

Dostępnych jest kilkanaście odmian z Krajowej Listy Odmian. Większość z nich wyhodowano na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie.

Ślazowiec pensylwański

***Sida hermaphrodita* Rusby**

Jest to gatunek wieloletni z rodziny ślazowatych (*Malvaceae*) pochodzący z Ameryki Północnej. Ślazowiec jest rośliną wieloletnią, odrasta corocznie, zwiększając liczbę łodyg od jednej w pierwszym roku do 20–30 w latach następnych. Wysokość jego pędów pod koniec okresu wegetacji może przekraczać nawet 400 cm.

Uprawy ślazowca są obecnie wykorzystywane przede wszystkim do celów energetycznych. Pod względem ciepła spalania łodygi ślazowca ustępują drewnu bukowemu tylko o 20–34%, przy czym większym ciepłem spalania charakteryzują się cieńsze łodygi. Obok wykorzystania w energetyce ślazowiec pensylwański nadaje się do rekultywacji terenów



Ryc. 11. Kwiaty ślazońca oraz 3-letnie rośliny [fot. G. Żurek]

zdegradowanych chemicznie, ponownego wykorzystania gruntów odłogowanych, nasadzeń w pasach przydrożnych chroniących inne uprawy przed zanieczyszczeniami komunikacyjnymi, tworzenia tzw. remiz śródpolnych.

Ze względu na odpowiednio dużą zawartość celulozy, żywicy i wosku w łodygach ślazońca pensylwański może być wykorzystywany w przemyśle celulozowo-papierniczym, zaś obecność substancji zbliżonych do zawartych w żywokoście lekarskim czyni go wartościowym surowcem farmaceutycznym. Poza tym ślazońca może też być wykorzystywany w charakterze pożytku pszczelego (kwitnie aż do jesiennych przymrozków) i w uprawie fasoli tyczkowej (łodygi).

Wymagania glebowe

Udaje się na wszystkich typach gleb, nawet na piaszczystych V klasy bonitacyjnej, pod warunkiem ich dostatecz-

nego uwilgotnienia. Mogą to być również tereny zdegradowane chemicznie, hałdy pokopalniane, czy rekultywowane wysypiska komunalne, gdzie pełni rolę fitoremediacyjną. Ślázowiec może być uprawiany na zboczach terenów erodowanych i generalnie na gruntach wyłączonych z rolniczego użytkowania. Optymalny odczyn gleby – powyżej 5,5.

Wymagania termiczne

Roślina nadaje się do uprawy we wszystkich rejonach kraju i wykazuje sporą odporność na skrajne temperatury zarówno niskie, jak i wysokie. Młode rośliny są wrażliwe na suszę.

Potencjał plonotwórczy

Plonowanie zależy od metody założenia plantacji (wysiew bądź sadzonki), gęstości siewu bądź sadzenia oraz wieku plantacji. W roku siewu/sadzenia plony mogą wahać się od 0,4 t/ha do 6,6 t/ha suchej masy. W kolejnym roku – od 2,9 t/ha do 20 t/ha. Plony osiągają swoje optimum po 3–4 latach. Średnia z 9 lat uprawy może wahać się od 10 t/ha do 20 t/ha suchej masy.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Stwierdzono zdolność do akumulacji kadmu, miedzi, niklu, ołowiu i cynku, zwłaszcza w warunkach nawożenia uprawy ściekami komunalnymi. Na uwagę zasługuje szczególnie zdolność do akumulacji kadmu z podłoża.

Podstawy agrotechniki

Gleba pod uprawę ślázowca powinna zostać odpowiednio przygotowana. Ponieważ młodym roślinom do prawidłowo-

wego rozwoju niezbędne jest światło, należy unikać pojawienia się chwastów, które zacieniają uprawę. Sukcesywne odchwaszczanie ma największe znaczenie w pierwszym roku prowadzenia plantacji – później duży przyrost masy zielonej umożliwi roślinie samodzielną obronę przed chwastami. Ślázowiec pensylwański rozmnaża się generatywnie, czyli przez nasiona i wegetatywnie – przez sadzonki, będące fragmentami korzeni lub pędów naziemnych. Do siewu nasiona powinny być wstępnie kondycjonowane dla przełamania spoczynku pozbiorowego (np. moczone w wodzie) ewentualnie poddane otoczkowaniu z zastosowaniem fungicydów (np. tebukonazol). Norma wysiewu nie wpływa znacząco na późniejszy wzrost plonu – stosuje się od 1,5 kg do 9 kg nasion na 1 ha. Optymalna ilość nasion powinna przekładać się na około 25 nasion na 1 m² powierzchni. Rozstawa rzędów powinna umożliwiać wykonanie mechanicznego odchwaszczania po wschodach. Podczas wysiewu ślázowca szczególną uwagę trzeba zwrócić na równomierność: nasiona powinny zostać rozmieszczone w podobnej odległości od siebie, na podobnej głębokości (1,0–1,5 cm). Najlepszym sposobem osiągnięcia tego celu jest zastosowanie siewu maszynowego.

Zakładając plantację ślázowca z sadzonek należy przyjąć od 10 000 do 18 000 roślin na 1 ha uprawy. Przy zastosowaniu rozłogów, pozyskanych z dojrzałych roślin, można zastosować od 15 000 do 30 000 sztuk na 1 ha, przy zachowaniu odstępu między rzędami jak powyżej.

Uprawę ślázowca na cele pastewne lub przeznaczonego do produkcji biogazu można zacząć użytkować już w dru-

gim roku prowadzenia plantacji. Pierwszego zbioru plonów dokonuje się w maju, drugiego zaś na przełomie lipca i sierpnia, gdy rośliny osiągną wysokość 100–150 cm. Jeśli chodzi o zbiór ślázowca przeznaczonego na nasiona, który można połączyć ze zbiorem na cele energetyczne, to najlepiej dokonywać go na przełomie września i października, choć możliwe są także zbiory późniejsze (w grudniu).

Nawożenie ślázowca zależy od zaplanowanego kierunku użytkowania plantacji, typu gleby, uwilgotnienia, czynników meteorologicznych itp. W roku zakładania plantacji z reguły nie stosuje się nawożenia mineralnego. W kolejnych latach należy stosować nawozy wczesną wiosną i wymieszać je z glebą. Wyższe dawki nawozów azotowych należy podzielić na dwie części, pierwszą zastosować wraz z nawozami fosforowo-potasowymi, drugą przed zwarciem rzędów. Ślázowiec najsilniej reaguje na azot, którego dawka wynosić może nawet 250 kg/ha, aczkolwiek rekomenduje się o wiele niższe nawożenie (ok. 100 kg/ha) dla właściwej efektywności ekonomicznej całej uprawy. Dawki nawozów fosforowych i potasowych powinny być ustalone na podstawie analizy gleby. Przeprowadzone badania dowodzą, że optymalne nawożenie ślázowca uprawianego na cele pastewne wynosi 80–100 kg/ha P_2O_5 , oraz 150 kg/ha K_2O . W przypadku uprawy na nasiona nawożenie potasowe pozostaje bez zmian (ok. 150 kg/ha K_2O), fosforowe należy ograniczyć do 60–90 kg P_2O_5 /ha, a azotowe do 100 kg N/ha. Najwyższe plony łądyg uzyskano przy nawożeniu: 90–120 kg P_2O_5 /ha, 50–100 kg K_2O /ha oraz 100–150 kg N /ha.

Miejsce w zmianowaniu

Przedplonem dla słażowca pensylwańskiego mogą być wszystkie rośliny uprawne, które schodzą z pola dostatecznie wcześnie, aby wykonać orkę przedzimową. Ze względu na podatność na niektóre wspólne choroby nie zaleca się uprawy słażowca po słoneczniku, fasoli i tytoniu. Długowieczność uprawy słażowca można szacować dla warunków Polski na 15–20 lat. Po likwidacji plantacji stanowisko wymaga nawożenia uzupełniającego, w zależności od wyników analiz zasobności gleby.

Dostępność materiału rozmnożeniowego

Brak jest aktualnie zarejestrowanych odmian tego gatunku, aczkolwiek nasiona bądź sadzonki można nabyć bez trudności (informacje w Internecie).

Rożnik przerośnięty

Silphium perfoliatum L.

Jest to bylina z rodziny astrowatych (*Asteraceae*), pochodząca z północnoamerykańskich prerii.

Roślina dorasta do 2,5–3,0 m wysokości, jej łodyga jest gruba, owłosiona, czterokanciasta. Ustawione naprzeciwległe i zrosnięte ze sobą liście tworzą zagłębienie (kielich) przy pniu łodygi, gdzie zbiera się woda z rosy, co stanowi swoisty wodopój dla ptaków i owadów. Stąd również wywodzi się angielska nazwa tej rośliny – ‘cup plant’.

Wymagania glebowe

Roślina nie ma specjalnych wymagań co do jakości gleby. Można ją uprawiać nawet na glebach z wysokim poziomem



Ryc. 12. Kwiaty roznika oraz łan 3-letnich roślin [fot. D. Martyniak]

wód gruntowych, a nawet bagnistych. Roznik nie toleruje jedynie gleb zasolonych.

Wymagania termiczne

Roślina ta charakteryzuje się znaczną mrozoodpornością oraz wytrzymałością na susze. Dla uzyskania najwyższych plonów biomasy najodpowiedniejsze są warunki klimatu cieplego, tak jak przykładowo dla uprawy winorośli. Lata mokre i chłodne powodują zmniejszenie plonowania roznika.

Potencjał plonotwórczy

Roślina osiąga optimum plonowania najczęściej w drugim roku od siewu. W sprzyjających warunkach plony zielonej masy mogą dochodzić do 100–130 t zielonej masy z ha (15–20 t suchej masy z ha).

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Stwierdzono, że nadmiar cynku w glebie może być szkodliwy dla roślin roznika. Gatunek ten posiada z kolei zdolność do akumulacji dużych ilości kadmu w korzeniach, lecz nie w pędach.

Podstawy agrotechniki

Roślina wytwarza nasiona żywotne o dobrej zdolności kiełkowania, które wcześniej na dwa miesiące przed wysiewem należy poddać stratyfikacji, aby zwiększyć energię kiełkowania. Nasiona należy wysiewać na jesień (koniec sierpnia–wrzesień) w rzędy o rozstawie 75–90 cm, w rzędzie co 50–75 cm. Przy tego rodzaju wysiewie na 1 ha potrzeba około 8–10 kg nasion. Nasiona kiełkują po około 3–4 tygodniach od siewu.

Jesienny siew ogranicza początkowe zachwaszczenie, które przy siewie wiosennym może znacznie zahamować wzrost młodych siewek, stosunkowo wolno się rozwijających. Kilkukrotne mechaniczne zwalczanie chwastów w międzyrzędziach jest niezbędne aż do momentu, gdy rośliny osiągną około 1 m wysokości i będą w stanie same konkurować z chwastami. W zależności od przeznaczenia plonu rożnik można zbierać jednofazowo we wrześniu bądź kilkukrotnie, na przykład do 3 razy. Ta ostatnia metoda może prowadzić do uzyskania wyższych plonów biomasy.

Rożnik wytwarza bardzo duże ilości biomasy nadziemnej i podziemnej, z czym związane są jego potrzeby nawozowe. Doświadczenia w Niemczech wykazały, że roślina ta pozytywnie reaguje na nawożenie na przykład obornikiem bądź fazą stałą gnojowicy w początkowej fazie wzrostu, a później gnojowicą płynną. Nawożenie mineralne należy stosować łącznie z organicznym w ilości 100–125 kg N, 110–115 kg P₂O₅ oraz 125 kg K₂O.

Miejsce w zmianowaniu

Nie powinno się uprawiać roznika po rzepaku, słoneczniku, grochu, warzywach oraz ziemniakach z uwagi na możliwość przeniesienia chorób grzybowych. Przedplon dla roznika powinien zapewnić bardzo dobre odchwaszczenie stanowiska. Mogą to być zatem zboża, kukurydza czy też buraki cukrowe.

Dostępność materiału rozmnożeniowego

W Krajowym Rejestrze Odmian są obecnie trzy odmiany tego gatunku, zarejestrowane w latach 2018–2019. Brak informacji o produkcji materiału rozmnożeniowego.

3.2. Możliwości w zakresie utylizacji roślin wzbogaconych o substancje szkodliwe

Głównym procesem, który umożliwia efektywne wykorzystanie biomasy pozyskanej z terenów skażonych metalami ciężkimi jest **przetworzenie jej na energię** wraz z zagospodarowaniem pozostałości po przerobie i ewentualną utylizacją bądź unieczynnieniem metali ciężkich. W świetle obowiązujących norm biomasa obciążona metalami ciężkimi nie powinna być przeznaczana do bezpośredniego spalania lub innego rodzaju przerobu na energię. Typowe wartości zawartości metali ciężkich w biomacie traw zawierają się w przedziałach: od 0,03 mg/kg do 0,60 mg/kg kadmu, od 0,05 mg/kg do 2,0 mg/kg ołowiu oraz od 10 mg/kg do 60 mg/kg cynku (wg *FprEN 14961-1:2009*). Z kolei dopuszczalna zawartość wymienionych trzech metali ciężkich na przykład w peletach opałowych wytworzonych z biomasy traw wieloletnich nie

powinna przekraczać odpowiednio: 0,5 mg/kg, 10,0 mg/kg oraz 100 mg/kg (*FprEN 14961-6:2011*).

Biomasa produkowana na glebach skażonych metalami ciężkimi może być przeznaczana do przetwarzania na energię jedynie przy wykorzystaniu technik uniemożliwiających ponowne uwolnienie metali ciężkich do środowiska. Jedną z takich technik jest **proces zgazowania biomasy**, który jest wymieniany przez wielu autorów, jako dający możliwość 'kontrolowania' metali ciężkich znajdujących się w biomasie roślin energetycznych. Zgazowanie to proces przekształcania stałego wsadu w paliwo gazowe. Proces zgazowania charakteryzuje się wyższym odzyskiem energii i niższymi kosztami emisji skażeń do atmosfery w porównaniu ze spalaniem, jak również zapobiega emisjom tlenków siarki i azotu oraz metali ciężkich do środowiska.

Po procesie zgazowania pozostają popioły, które można zastosować jako nawóz, przy założeniu włączenia ich w cykl produkcji biomasy na terenie, na którym ta biomasa została wyprodukowana. Limity dopuszczalne na terenie Rzeczpospolitej dla zawartości ołowiu i kadmu w nawozach organiczno-mineralnych stosowanych w rolnictwie wynoszą odpowiednio 140 mg/kg i 5 mg/kg (Dz.U.2008 nr 119, poz.765). Rozporządzenie to ustala również, że zawartość P i K w nawozie nie może być mniejsza niż 2%.

Idea wykorzystania popiołów po zgazowaniu roślin energetycznych jako nawozów nie dotyczy ich wykorzystania na gruntach o wysokiej wartości, jednak mogą one stanowić opcję dla miejsc już zanieczyszczonych, w których

stężenie metali ciężkich przekracza dopuszczalne normy. Zastosowanie takich popiołów z jednej strony nie zmieni dramatycznie sytuacji na takim terenie, ale może pomóc w jego przywróceniu do użytkowania przez recykulację składników mineralnych dla rosnących tam roślin. Ponadto ze względu na wysoki odczyn ($\text{pH} = 10\text{--}11$) popioły te mogą być również wykorzystane do korekty odczynu gleb kwaśnych zanieczyszczonych metalami.

4. Gatunki poplonowe

Facelia wrotyczolistna (błękitna)

Phacelia tanacetifolia Benth.

Gatunek z rodziny faceliowatych (*Hydrophyllaceae*). Roślina dorasta do 100 cm, oprócz wartości jako poplon jest również doskonałą rośliną miododajną.



Ryc. 13. Kwitnąca facelia oraz jej łan

Źródło: <https://kwiaty-ogrody.pl/rosliny-jednoroczne/facelia-blekitna-phacelia-tanacetifolia/>, <https://ifarmer.pl/product-pol-2785-FACELIA-BLEKITNA-odm-STALA-C1-0-5kg.html>.

Wymagania glebowe

Roślina najlepiej wzrasta na stanowiskach słonecznych oraz lekko zacienionych. Nie ma specjalnych wymagań glebowych – ziemia musi być jednak przepuszczalna, niezapierzona i nie może być podmokła (pH obojętne). Facelia uważana jest za jedną z najbardziej niezawodnych roślin poplonowych uprawianych na wszystkich rodzajach gleb.

Wymagania termiczne

Facelia jest odporna na suszę oraz przymrozki (od -7° do -10°C).

Potencjał plonotwórczy

Przy sprzyjających warunkach pogodowych dobry plon zielonej masy można otrzymać już po 50–60 dniach. W poplonie ścierniskowym, gdy rośliny facelii osiągną wysokość 30–40 cm, można otrzymać 20–30 t/ha zielonki.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Gatunek ten bardzo dobrze toleruje nawożenie osadami ściekowymi. Jego zastosowanie w warunkach podwyższonej zawartości metali ciężkich w podłożu może być związane z wartością nawozową biomasy oraz pożytkami dla pszczół.

Podstawy agrotechniki

Wysiew na poplon preferowany w połowie sierpnia. Przed wysiewem zaleca się wykonanie głębszej podorywki oraz bronowanie, a także zastosowanie wału i brony posiewnej. Przed wykonaniem uprawy ziemi najlepiej zastosować skoncentrowany nawóz fosforowy, który w swoim składzie, poza fosforem,

będzie też miał siarkę oraz wapń. Zawartość tych składników mineralnych jest szczególnie ważna, gdyż zwiększa odporność rośliny na szkodniki i choroby. Zalecane nawożenie składnikami mineralnymi: 20–40 kg N/ha; 40–70 kg P₂O₅/ha; około 60–100 kg K₂O/ha. Roślina bardzo dobrze reaguje na nawożenie magnezem. Nasiona facelii powinno się wysiewać w rzędy 10–15 cm lub 20–25 cm na głębokość 2–3 cm. W siewie czystym – około 10 kg/ha, w mieszankach – mniej (szczegóły poniżej). Preferuje się lekkie wałowanie gleby przed siewem, aby umożliwić szybsze wschody i lepsze podsiąkanie wody.

W poplonach, po wcześniej schodzących przedplonach, można ją wysiewać w następujących mieszankach: facelia (4 kg) + wyka (40 kg), facelia (4 kg) + seradela (40 kg). W praktyce stosuje się często mieszanki: facelia (5 kg) + gorczyca (10 kg), facelia (4 kg) + łubin żółty (80 kg).

Miejsce w zmianowaniu

Facelia jest znakomitym przedplonem dla wielu roślin sianych w plonie głównym z racji swojej odrębności gatunkowej. Jej obecność na polu nie przyczynia się do namnażania patogenów chorobotwórczych dla upraw następczych, a wręcz przeciwnie – ogranicza je. Roślina ta ma również właściwości matwinkobójcze. Doskonale sprawdza się jako roślina odzyskująca makro- i mikroelementy. Silnie rozbudowany system korzeniowy o palowej strukturze powoduje, że facelia wyciąga z głębszych warstw gleby pierwiastki nieosiągalne dla innych upraw.

Dostępność materiału siewnego

Obecnie dostępne są następujące odmiany: ANABELA, ASTA, ATARA oraz NATRA.

Łubin wąskolistny
Lupinus angustifolius L.

Gatunek z rodziny bobowatych (*Fabaceae*).

Łubin bywa wykorzystywany jako międzyplon ścierniskowy, uprawiany po zbiorze zbóż bądź innych roślin, które wcześniej schodzą z pola. Jego uprawa może przyczynić się do zwiększenia plonowania zbóż nawet o 0,6–0,8 t/ha. Uprawa łubinu w poplonie poprawia warunki fitosanitarne gleb. Jednak wraz z uprawą międzyplonów ścierniskowych pojawiają się pewne utrudnienia, do których należą m.in.: ograniczenia w wykonywaniu pełnego zespołu uprawek pozniwnych czy zwiększona liczba prac w okresie żniw.

Podstawową zaletą łubinu wąskolistnego jest jego wyższe plonowanie i szybsze dojrzewanie oraz zdecydowanie niższa wrażliwość na antraknozę łubinu niż łubinu żółtego, co zmniejsza koszty uprawy, a tym samym powoduje, że cena nasion siewnych jest znacznie niższa.



Ryc. 14. Łubin wąskolistny – kwiaty w zbliżeniu oraz łan przed kwitnieniem [fot. Rynek Rolny, Agrofoto]

Źródło: <https://big-agro.pl/produkt/lubin-waskolistny-tango/>, <https://www.agrofoto.pl/forum/gallery/image/460407-lubin-waskolistny-na-poplon/>.

Wymagania glebowe

Najbardziej odpowiednie do uprawy tego gatunku są gleby tzw. średnie (klasa IV–V).

Wymagania termiczne

Brak szczególnych predyspozycji tego gatunku względem zakresu temperatur w kraju.

Potencjał plonotwórczy

Plon zielonej masy, w zależności od fazy dojrzałości, może wynosić od 3,1 t/ha do 10,6 t/ha.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Potwierdzono zdolność do akumulacji kadmu w zakresie od 120 µg/kg do 300 µg/kg s.m., z czego około 30–35% zlokalizowane było w pędach nadziemnych. Gatunek ten jest również w stanie akumulować metale ciężkie (arsen, rtęć, ołów, chrom, mangan i kadm) ze ścieków, nawet po względnie krótkim czasie ekspozycji na warunki zwiększonego stężenia wymienionych metali.

Podstawy agrotechniki

Uprawa roli – taka sama jak pod rośliny jare. Agrotechnicznym terminem siewu dla łubinu na poplon jest pierwszy tydzień sierpnia. Deficyt opadów w sierpniu wydłuży czas wschodów, co przełoży się na wytworzenie przez rośliny mniejszej zielonej masy. Łubin na poplon najlepiej zatem wysiewać w lipcu, zaraz po zbiorze ozimin, w ilości 160–180 kg/ha. Rozstawa rzędów przy takim siewie to około 15 cm.

Jeżeli uprawa łubinu jako międzyplonu jest zlokalizowana na słabszych stanowiskach, to należy nawozić je niewiel-

ką dawką azotu na poziomie 20–30 kg N/ha. Pod uprawy mieszanek łubinu z roślinami niemotylikowatymi można wysiać około 50 kg N/ha. Do nawożenia międzyplonów można również stosować gnojówkę i gnojowicę w dawkach od 25 m³/ha do 35 m³/ha.

Miejsce w zmianowaniu

Najczęściej łubiny jako międzyplony ścierniskowe wysiewa się po jęczmieniu ozimym, rzepaku ozimym bądź życie. Należy przestrzegać 4-letniej przerwy w uprawie roślin bobowatych na tym samym polu.

Dostępność materiału siewnego

Najlepiej na poplon do wysiewu nadają się odmiany szybkorosnące i wytwarzające w krótkim czasie dużą zieloną masę, na przykład z HR Smolice: HOMER, ROLAND, NERON, BORUTA, OSKAR, ZEUS.

Gorczyca biała *Sinapis alba* L.

To najczęściej uprawiany gatunek gorzycy w Polsce. Należy do rodziny kapustnych i jest rośliną jednoroczną. Może być uprawiana na cele przyprawowe, kulinarne, do wytwarzania musztardy oraz jako międzyplon lub plon główny na zielonkę. Dodatkowo można przeznaczać ją na cele paszowe, zielony nawóz bądź mulcz wsiewany w zboża jare.

Wymagania glebowe

Gorczyca biała, ze względu na niewielkie wymagania glebowe, może być uprawiana po zbożach. Wymaga gleb zasob-



Ryc. 15. Gorczyca biała – kwiaty oraz łąn w uprawie poplonowej

Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Gorczyca_bia%C5%82a#/media/Plik:Image-Moutarde1.jpg, <http://womir.pl/index.php?sekcja=strona&id=318>.

nych w wapń o odpowiednim odczynie, najlepiej obojętnym. Jej uprawę można prowadzić na glebach torfowych, należących do kompleksów zbożowo-pastewnych oraz na dobrych glebach żytnych.

Wymagania termiczne

Gorczyca biała jest rośliną dnia długiego. Kielkuje już przy temperaturze 1°C, jednak szybciej kielkuje i wschodzi przy temperaturze 4–5°C. Największe nasilenie wschodów ma miejsce po 10 dniach od siewu. W okresie wschodów znosi przymrozki do –6°C, a w fazie kwitnienia do –2°C. Jest wrażliwa na długotrwałe susze.

Potencjał plonotwórczy

Gorczycę białą należy zbierać po osiągnięciu dojrzałości pełnej za pomocą kombajnu. Zbiór w tak późnej fazie rozwojo-

wej jest możliwy dlatego, że tworzy ona łuszczyzny odporne na pęknięcie. Zebrane nasiona należy dosuszyć do wilgotności 5–7%. Plon nasion wynosi średnio 3 t/ha. Olej wytwarzany z odmian technicznych gorzycy białej jest wykorzystywany do celów technicznych z uwagi na bardzo duże ilości kwasu erukowego, co eliminuje go z użytkowania jadalnego.

Potencjał w zakresie pobierania metali ciężkich z gleby

Gorzycza biała została opisana jako hyperakumulator kadmu (do 123 mg/kg suchej masy).

Podstawy agrotechniki

Wymagana jest orka przedzimowa na głębokość 20–25 cm (po ziemniakach orkę można spłycić do 15 cm). Wiosenna uprawa roli ma za zadanie spulchnianie gleby, przerwanie parowania i zniszczenie wcześniej wschodzących chwastów. Zabiegi przedsewne muszą zapewnić płytki wysiew nasion.

Gorzycę białą należy wysiewać jak najwcześniej, w III dekadzie marca lub I dekadzie kwietnia. Optymalna gęstość roślin po zasiewach powinna wynosić 120–150 roślin/m², a w związku z tym ilość wysiewu powinna kształtować się na poziomie 10–12 kg/ha. Rozstawa rzędów pod gorzycę białą wynosi 20–25 cm, a siew powinien być wykonywany na głębokość 2,5–3 cm. Jeżeli planowana jest mechaniczna pielęgnacja zasiewów gorzycy, to można wysiewać ją w szerszą rozstawę rzędów 25–35 cm.

W zależności od stanowiska, na którym uprawiana jest gorzycza biała, stosuje się nawożenie wynoszące:

30–50 kg P_2O_5 /ha, 60–100 kg K_2O /ha i 40–60 kg N/ha. Gorczyca wykazuje też duże zapotrzebowanie na siarkę i mikroelementy, które mogą być dostarczane roślinom dolistnie za pomocą roztworu wodnego. Jeżeli gleba, na której ma być uprawiana gorczyca, jest kwaśna, to należy przeprowadzić jej wapnowanie, najlepiej od razu po zbiorze przedplonu. Wapno węglanowe ($CaCO_3$) lub węglano-magnezowe ($CaCO_3 + MgCO_3$) stosuje się na glebach lekkich w dawce 2–3 t/ha, zaś na glebach ciężkich używa się wapna w formie tlenkowej (CaO) w dawce 1–1,5 t/ha.

Miejsce w zmianowaniu

Gorzycę białą najczęściej uprawia się w międzyplonie ścierniskowym z uwagi na bardzo szybki wzrost roślin i krótki okres wegetacji. Dodatkowo wytwarza ona bardzo dużą masę wegetatywną, która zacienia glebę i ogranicza wzrost chwastów. Uprawiana może być również na zielony nawóz, wtedy jej rośliny są przyorywane na polu. Wyrośniętą masę roślin można też pozostawiać na zimę jako mulcz, który następnie jest przyorywany na początku wiosny. W taki mulcz można jednocześnie wsiać roślinę główną, a wtedy nie zachodzi potrzeba wykonywania właściwej orki.

Najlepsze wyniki uzyskuje się uprawiając gorzycę białą po okopowych albo po bobowatych. Nie powinno się jej uprawiać po innych roślinach kapustowatych.

Dostępność materiału siewnego

W Krajowym Rejestrze Odmian jest obecnie 11 odmian gorzyicy białej, z czego 10 to odmiany krajowe.

5. Katalog dobrych praktyk rolniczych dla ograniczenia wpływu skażeń środowiskowych zdeponowanych w glebach uprawnych na produkty spożywcze wytwarzane w regionie

Pierwszy krok – identyfikacja potencjalnych zagrożeń

Znajomość stopnia ewentualnego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi jest warunkiem niezbędnym do produkcji bezpiecznej żywności. Zlecenie wykonania tego typu analiz należy powierzyć wykwalifikowanemu personelowi Okręgowych Stacji Chemiczno-Rolniczych, łącznie z fachowym pobraniem reprezentatywnych dla pozostających w naszej dyspozycji gruntów. Wartości progowe, zawarte w tabeli 1 oraz tabelach 4–6 wskazują na możliwe dalsze działania.

Regulacja odczynu gleby

Te zagadnienia omówiono szczegółowo w rozdziale 2. Na glebach kwaśnych i o bardzo niskiej zawartości przyswajalnego magnezu połowę naliczonej dawki CaO (według tabeli 7) należy zastosować w postaci wapna zwykłego bez magnezu lub zawierającego magnez o stosunku Ca:Mg jak 3–2:1 (odmiany 01, 02, 03, 05). Jeśli dysponujemy nawozami o szerokim stosunku Ca:Mg (odmiany 04, 06, 07), całość naliczonej dawki CaO stosujemy w postaci wapna magnezowego. Zawartość sumy tlenku wapnia i tlenku magnezu dla formy tlenkowej, w zależności od odmiany wynosi od 60% do co najmniej 75%, natomiast dla form węglanowych od 40% do co najmniej 50%.

Tabela 7. Dawka wapna w zależności od kategorii agronomicznej i potrzeb wapnowania w t CaO/ha

Potrzeby wapnowania	Kategoria agronomiczna gleby							
	bardzo lekkie		lekkie		średnie		ciężkie	
	pH	dawka	pH	dawka	pH	dawka	pH	dawka
Konieczne	do 4,0	3,0	do 4,5	3,5	do 5,0	4,5	do 5,5	6,0
Potrzebne	4,1–4,5	2,0	4,6–5,0	2,5	5,1–5,5	3,0	5,6–6,0	3,0
Wskazane	4,6–5,0	1,0	5,1–5,5	1,5	5,6–6,0	1,7	6,1–6,5	2,0
Ograniczone	5,1–5,5	–	5,6–6,0	–	6,1–6,5	1,0	od 6,6	1,0

Źródło: według <https://nawozy.eu>.

Powyższe zasady dotyczące wapnowania gleb odnoszą się do wszystkich rodzajów gleb, a nie tylko do tych zanieczyszczonych metalami ciężkimi.

Zastosowanie dodatków doglebowych ograniczających biodostępność metali ciężkich

Dodatki doglebowe zostały szczegółowo omówione w rozdziale 2. Ich zastosowanie wiąże się zawsze z koniecznością odczekania kilku tygodni po ich rozsypaniu i zmieszaniu z glebą na ich tzw. stabilizację. Dopiero potem można przystąpić do zabiegów przygotowania gleby i siewu. Uzyskane w badaniach wyniki jednoznacznie wskazują, że dodatki zmniejszające biodostępność metali ciężkich w glebie mogą zmniejszyć ich pobieranie na przykład do ziarniaków zbóż, obniżając tym samym ryzyko dla zdrowia ludzi. Jednocześnie stwierdzono wzrost zawartości przykładowo cynku w słomie jęczmiennej, co jest z kolei ważne w żywieniu zwierząt.

Zabiegi agrotechniczne ograniczające pobieranie kadmu – mikoryza

Pierwszym z tego typu zabiegów jest mikoryzacja korzeni roślin w celu stworzenia symbiozy korzeni roślin z grzybami mikoryzowymi, które mogą być dostarczone w postaci szczepionki. Dowiedziono, że około 95% gatunków roślin tworzy swoistą symbiozę z grzybami mikoryzowymi. Mikoryzy powodują poprawę ogólnej kondycji rośliny, wspomagają jej wzrost, podnoszą odporność na patogeny, przyczyniają się do bardziej efektywnego poboru składników odżywczych z gleby. Stwierdzono, że grzyby mikoryzowe są zdolne do gromadzenia 10–20 razy wyższych zawartości kadmu w stosunku do korzeni roślin. Zatem grzyby mikoryzowe mogą być odpowiedzialne za ograniczenie translokacji kadmu do pędów przez bioaugmentację w glebie.

Zabiegi agrotechniczne ograniczające pobieranie kadmu – oprysk cynkiem

Drugim zabiegiem agrotechnicznym przydatnym w ograniczaniu zawartości kadmu w ziarniakach roślin zbożowych jest dolistny oprysk roztworem cynku. Kadm wykorzystuje szlaki transportu cynku, aby zostać pobranym z korzeni do części nadziemnych rośliny, dlatego stosowanie cynku może być pomocne w zmniejszeniu akumulacji kadmu. Dolistne stosowanie cynku jest coraz częściej stosowane w celu podniesienia niedoborów mikroelementów tego pierwiastka. Wykazano, że zastosowanie oprysku *Mono-Zn* na powierzchni liści w trakcie kwitnienia i zawiązywania

ziarna, u niektórych odmian jęczmienia spowodowało zmniejszenie zawartości kadmu w ziarnie i słomie. Wyniki były związane z rodzajem odmiany jęczmienia i rodzajem gleby (czyste bądź zanieczyszczone kadmem).

Zmianowanie zbożowych bobowatymi

Zmniejszenie intensywności akumulacji metali ciężkich w ziarnie pszenicy ozimej wynika z optymalizacji stanu agrokologicznego gleby po uprawie wieloletnich roślin bobowatych, takich jak przelot pospolity (*Onobrychis arenaria* Kit.), rutwica wschodnia (*Galega orientalis* Lam.) czy koniczyna łąkowa (*Trifolium pratense* L.). Decyduje o tym niższa zawartość mobilnych form metali ciężkich w glebie, współczynnik ich akumulacji, wyższa zawartość próchnicy oraz mobilnego fosforu, optymalny odczyn gleby po uprawie bobowatych.

Uprawa roślin wieloletnich, okrywowych

Dla ograniczenia erozji powierzchniowej gleby oraz uwalniania szkodliwych substancji do atmosfery lub przez wymywanie, tereny o znacznych przekroczeniach norm zawartości metali ciężkich najlepiej trwale zadarnić za pomocą traw wieloletnich w mieszance z bobowatymi drobnonasiennymi. Taki układ umożliwi zaniechanie uprawy gleby na danym obszarze na kilka–kilkanaście lat, jednocześnie całkowicie ograniczając niepożądaną migrację metali ciężkich. Pozostaje jedynie problem zagospodarowania wywarzanej biomasy, która powinna być co najmniej dwa razy do roku skoszona, aby uniknąć niebezpieczeństwa pożaru suchej masy, zarasta-

nia drzewami itp. Należy pamiętać, że pod żadnym pozorem nie wolno wypalać takiej biomasy zarówno na polu, jak i w paleniskach zamkniętych. Przy znacznym wysyceniu biomasy metalami ciężkimi, w trakcie procesu spalania następuje ich uwalnianie do atmosfery oraz przenikanie do popiołu.

Literatura

- Bezak-Mazur E. (2001), *Elementy toksykologii środowiskowej*, Skrypt nr 32, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, s. 1–172.
- Christoforidis A., Stamatis N. (2009), *Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national Road in Kavala's region, Greece*, „Geoderma”, nr 51, s. 257–263.
- EEA (2005), *The European environment - state and outlook*, European Environment Agency, Kopenhaga.
- EEA (2016), *Report 07/2016. Soil resource efficiency in urbanised areas Analytical framework and implications for governance*, European Environment Agency, s. 90.
- Gawroński K. (2002), *Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi i siarką na tle struktury funkcjonalno-przestrzennej gmin województwa łódzkiego*, „Rocznik Ochrony Środowiska”, t. 4, s. 379–401.
- GIOŚ (2014), *Stan środowiska w Polsce. Raport 2014*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, s. 1–199.
- Hartley W., Edwards R., Lepp N. W. (2004), *Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests*, „Environmental Pollution”, nr 131, s. 495–504.
- IUNG (2017), *Monitoring Chemizmu Gleb Ornych Polski* [dok. elektr.], http://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/index.php?mod=monit [odczyt: 6.09.2021].

- Jadczyzyn J., Filipiak K., Stuczyński T., Koza P., Wilkos S. (2010), *Obszary problemowe rolnictwa (OPR) i obszary o niekorzystnych warunkach gospodarowania (ONW) w Polsce. Różnice kryteriów i zasięgów przestrzennych*, „Studia i Raporty IUNG – PIB”, Zeszyt nr 21, s. 9–20.
- Kabała C., Singh B. R. (2001), *Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter*, „Journal of Environmental Quality”, nr 30, s. 485–492.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. (1993), *Biogeochemia pierwiastków śladowych*, PWN, Warszawa, s. 68–99.
- Kabata-Pendias A., Piotrowska M., Motwicka-Terelak T., Maliszewska-Kordybach B., Filipiak K., Krakowiak A., Pietruch Cz. (1995), *Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb. Metale Ciężkie, siarka i WWA*. PIOŚ, IUNG, Puławy, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, s. 1–37.
- Kumpiene J. (2010), *Trace elements immobilization in soil using amendments* [w:] Hooda P. S. (red), *Trace elements in soil*, John Wiley and Sons Ltd., United Kingdom, s. 353–379.
- Kumpiene J., Ore S., Renella G., Mench M., Lagerkvist A., Maurice C. (2006), *Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic in soil*, „Environmental Pollution”, nr 144, s. 62–69.
- Kyzioł J. (1994), *Minerały ilaste jako sorbenty metali ciężkich*, Wydawnictwo PAN, Wrocław–Warszawa–Kraków.
- Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A. (2013), *Zagrożenie zanieczyszczeniami chemicznymi gleb na obszarach rolniczych w Polsce w świetle badań IUNG-PIB w Puławach*, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, zeszyt 35 (9), s. 97–118.
- Pasieczna A. (2002), *Zawartość cynku w glebach wybranych miast w Polsce*, *Zeszyty Naukowe Komitetu „Człowiek i Środowisko” PAN*, nr 33, s. 203–212.

- Potter H. A. B., Yong R. N. (1999), *Influence of iron – aluminium ratio on the retention of lead and copper by amorphous iron–aluminium oxides*, „Applied Clay Science”, nr 14, s. 1–26.
- Purakayastha T. J., Chhonkar P. K. (2010), *Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils* [w:] Sherameti I., Varma A. (red.), *Soil Heavy Metals: Soil Heavy Metals*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, s. 389–429.
- Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2020* (2021), GUS [dok. elektr.], <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rolnictwa-2020,6,14.html> [dostęp: 6.09.2021].
- Roszyk E., Szerszeń L. (1988), *Nagromadzenie metali ciężkich w warstwie ornej gleb stref ochrony sanitarnej przy hutach miedzi*, „Roczniki Gleboznawcze”, t. XXXIX, nr 4, s. 135–158.
- Ruttens A., Mench M., Colpaert J. V., Boisson J., Carleer R., Vangronsveld J. (2006), *Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. I: Influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil amendments on phytotoxicity and plant availability of metals*, „Environmental Pollution”, nr 144, s. 524–532.
- Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Hryńczuk B., Łysiak M., Miturski T., Gałązka R., Suszek B. (2012), *Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010–2012*, IUNG-PIB, Puławy, s. 202.
- Terelak H., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Pietruch C. (2000), *Pierwiastki śladowe (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) w glebach użytków rolnych Polski*, IOŚ, Warszawa.
- Van Der Ent A., Bakere A. J. M., Reeves R. D., Pollard A. J., Schat H. (2013), *Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction*, „Plan Soil”, nr 362, s. 319–334.
- Woch F. (2007), *Wademekum klasyfikatora gleb*, Praca zbiorowa, IUNG, Puławy, s. 1–480.

Indeks nazw polskich i łacińskich

Facelia wrotyczolistna (błękitna)	82	<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern.	41
Gorzycza biała	87	<i>Brassica napus</i> L. ssp. <i>oleifera</i> Metzg.	43
Gorzycza sarepska (kapusta sitowa, musztardowiec)	41	<i>Cannabis sativa</i> L.	57
Konopie siewne	57	<i>Elymus elongatus</i> (Host.) Runemark; <i>Elytrigia</i> <i>elongata</i> (Host.) Nevski	61
Kostrzewa trzcinowata	65	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	65
Len zwyczajny	54	<i>Helianthus annuus</i> L.	52
Lucerna siewna	47	<i>Linum usitatissimum</i> L.	54
Łubin wąskolistny	85	<i>Medicago sativa</i> L.	47
Perz wydłużony (wydmuchrzyca wydłużona)	61	<i>Phacelia tanacetifolia</i> Benth.	82
Rożnik przerośnięty	77	<i>Salix</i> sp.	69
Rzepak ozimy	43	<i>Sida hermaphrodita</i> Rusby	72
Słonecznik zwyczajny	52	<i>Silphium perfoliatum</i> L.	77
Ślázowiec pensylwański	72	<i>Sinapis alba</i> L.	87
Wierzba	69		

ISBN 978-83-935777-8-1