Witold Niemiec
Adam Masłoń
Adam Piech
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

PLANTACJA ROŚLIN ENERGETYCZNYCH – PRZYKŁAD ZRÓWNOWAŻONEJ GOSPODARKI ŚCIEKOWEJ NA TERENACH NISKOZURBANIZOWANYCH

Streszczenie

Głównym zadaniem rolnictwa jest i będzie produkcja surowców żywnościowych. Niemniej jednak grunty o niższej przydatności produkcyjnej lub gleby zdegradowane mogą być przeznaczone na alternatywne cele, np. plantacje roślin energetycznych, bowiem biomasa stanowi aktualnie jedno z najbardziej obiecujących i pożądanych źródeł energii odnawialnej. Stosowane są różne rośliny energetyczne, m.in. wierzba energetyczna, miskant.

W pracy przedstawiono przegląd zagadnień związanych z unieszkodliwianiem osadów ściekowych pochodzących z gminnych oczyszczalni, zlokalizowanych na terenach niskozurbanizowanych i wiejskich. Zaprezentowano założenia techniczne i środowiskowe gospodarczego wykorzystania komunalnych osadów ściekowych do nawożenia roślin energetycznych, zwracając szczególną uwagę na potencjalne niekorzystne oddziaływanie na środowisko wodno-glebowe. Analiza tematu wykazuje, że uprawa roślin do produkcji biomasy do celów energetycznych jest atrakcyjnym rozwiązaniem problemu sanitacji obszarów niskozurbanizowanych, poza tym właściwie prowadzona technologia depozycji osadów ściekowych do nawożenia plantacji nie powoduje niebezpieczeństwa zanieczyszczenia środowiska wodno-glebowego.

Słowa kluczowe: osad ściekowy, rośliny energetyczne, plantacja roślin energetycznych

ENERGY CROP PLANTATIONS – EXAMPLE OF SUSTAINABLE WASTEWATER MANAGEMENT IN LOW-URBANIZED AREAS

Summary

The food production is the primary aim of agriculture. Nevertheless, the suitability of land for less productive or degraded soil can be used for alternative purposes, eg. energy plantations. Biomass is currently one of the most promising and desirable sources of renewable energy. A variety of energy crops can be used, among others *Salix viminalis* willow, miscanthus.

The paper presents review of issues related to the disposal of sludge from municipal wastewater treatment plants, which are located in low-urbanized and rural areas. Technical and environmental assumptions of economic use of municipal sewage sludge to fertilize energy crops were presented. Adverse effects of sewage sludge on the environment of water and soil were also presented. Analysis of the theme shows that the cultivation of plants for the production

of biomass for energy purposes is an attractive solution to the problem of sanitation low-urbanized areas. In addition, properly conducted deposition technology of sewage sludge to fertilize the plantation does not cause pollution of water and soil.

Keywords: sewage sludge, energy crops, energy crop plantation

1. Wprowadzenie

Głównym zadaniem rolnictwa jest i będzie produkcja surowców żywnościowych. Jednak grunty o niższej przydatności produkcyjnej lub gleby zdegradowane mogą być przeznaczone na alternatywne cele, np. plantacje roślin energetycznych, bowiem biomasa stanowi aktualnie jedno z najbardziej obiecujących i pożądanych źródeł energii odnawialnej.

Polska, wypełniając postanowienia polityki energetycznej Unii Europejskiej, zobowiązana jest do 2020 r. zwiększyć produkcję energii ze źródeł odnawialnych z obecnych 5–6% do 15%, a do 2030 r. nawet do 20%. Ze względu na pochodzenie biomasę można zaszeregować do trzech kategorii: 1) plony upraw rolniczych (w tym plantacje roślin energetycznych); 2) odpady przemysłu leśnego; 3) inne bioodpady (w tym osady ściekowe) [27]. Zobowiązania unijne obligują do zwiększania w Polsce produkcji biomasy innej niż leśna, a energetyka zawodowa rozpoczęła działania stymulujące rozwój upraw roślin energetycznych [18, 42]. Biorąc pod uwagę raport EEA (Europejskiej Agencji Środowiska) [12], w roku 2020 całkowity potencjał energetyczny biomasy wytworzonej w naszym kraju będzie wynosić 33 MtOE (megaton ekwiwalentu olejowego), z czego 73% pochodzić będzie z upraw rolniczych. Do roku 2030 wzrośnie on do 39 MtOE, przy 77% udziale upraw. W Polsce, według różnych źródeł, jest blisko 2 mln ha terenów, które mogą być przeznaczone pod plantacje energetyczne. Są to przede wszystkim grunty odłogowane i wyłączone spod działalności rolniczej ze względu na zanieczyszczenie – gleby zdegradowane [43]. Inne źródła [9] szacują potrzeby obszarowe upraw biomasy na około 2,3 mln ha, przy założeniu ogólnokrajowych potrzeb energetycznych w zakresie biomasy na poziomie 370 PJ rocznie przy średnim plonie 9t/ha/t i wartości opałowej 18GJ/t.

Uprawa roślin energetycznych może być sposobem na poprawę efektywności ekonomicznej wielu gospodarstw wiejskich, a nawet całych wsi. Należy więc oczekiwać powstania nowego ważnego działu produkcji w gospodarstwach rolnych – działu produkcji energii. Jest to bardzo duże wyzwanie dla branży rolniczej [16]. Szacuje się, że do 2020 r. może powstać 36 tys., a do 2030 r. nawet 57 tys. nowych miejsc pracy związanych ze skupem, przetwórstwem i transportem biomasy [54]. Plantacje roślin energetycznych są niewątpliwie szansą rozwoju obszarów wiejskich [10]. Produkcja biomasy na cele energetyczne na terenach niskozurbanizowanych stwarza wiele możliwości, m.in. aktywizację niewykorzystanej siły roboczej. Jednak realizacja tych zadań wymaga nakładów finansowych, zaangażowania społeczności lokalnych, organizacji samorządowych oraz środków finansowych, a także modyfikacji przepisów prawnych [49]. Przy powstawaniu plantacji roślin, których biomasa jest przeznaczana na cele energetyczne, celowe jest jednak ustalenie właściwych relacji między samo-

wystarczalnością gospodarstwa rolnego w zakresie bezpieczeństwa żywnościowego a koniecznością wspierania potrzeb energetycznych [52].

Od wielu lat prowadzone są badania nad możliwością wykorzystania różnych roślin energetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem gatunków roślin wieloletnich o znacznym potencjale produkcyjnym [17, 18, 19]. Wydajność produkcji roślin energetycznych uwarunkowana jest zastosowaną agrotechniką [28], czynnikami klimatycznymi (temperatura, dostępność wody) [26], dostępnością substancji nawozowych [33]. W celu uzyskania plonów o odpowiedniej jakości z uwzględnieniem zrównoważonej gospodarki rolnej oraz środowiskowej możliwe jest stosowanie osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków do nawożenia roślin energetycznych. Procedura ta jest stosowana z powodzeniem od dawna w wielu krajach europejskich [7, 11]. Nawożenie gleb osadami ściekowymi jest korzystne nie tylko z gospodarczego punktu widzenia, ale także niezbędne do odtwarzania i zachowania równowagi ekologicznej, ponieważ wykorzystanie osadów ściekowych na plantacjach energetycznych pozwala na zamknięcie obiegu składników pokarmowych w całym lokalnym ekosystemie [41]. Ma to także istotne znaczenie w zakresie gospodarki odpadami. Zgodnie z polskim ustawodawstwem, od 2016 r. składowanie osadów ściekowych będzie niemożliwe, dlatego należy zastanowić się nad innym, bardziej efektywnym sposobem ich zagospodarowania. Jednym z takich rozwiązań jest wykorzystanie osadów ściekowych do nawożenia roślin energetycznych.

Optymalizacja upraw energetycznych wymaga nie tylko wiedzy w zakresie zasad agrotechnicznych, lecz również racjonalnego podejścia przy opracowaniu odpowiedniej strategii uporządkowania gospodarki wodno-ściekowej i energetycznej na danym terenie, np. na obszarach niskozurbanizowanych.

W opracowaniu zaprezentowano istotne zagadnienia związane z unieszkodliwianiem i wykorzystaniem osadów ściekowych z komunalnych oczyszczalni ścieków do nawożenia roślin energetycznych.

2. Stan formalno-prawny stosowania osadów ściekowych w uprawach roślin energetycznych

Zagospodarowanie osadów ściekowych na terenach niskozurbanizowanych sprowadza się przede wszystkim do rolniczego ich wykorzystania. W świetle obowiązującego prawa ze względu na niebezpieczeństwo wprowadzenia niepożądanych i szkodliwych substancji do środowiska zaleca się wykorzystanie osadów ściekowych do produkcji biomasy na cele energetyczne [55, 56].

Do wykorzystania na plantacjach roślin energetycznych przydatne stają się komunalne osady ściekowe, w których zawartość metali ciężkich, obecność pasożytów oraz bakterii z rodzaju *Salmonella* nie przekraczają dopuszczalnych limitów ilościowych i jakościowych określonych w załączniku nr 2 i 3 do Rozporządzenia [55]. Stosowanie osadów w uprawach energetycznych nie może pogarszać jakości gleby, jakości wód oraz powodować zagrożenia dla zdrowia ludzi. Dodatkowo osady mogą być stosowane tylko poza okresem wegetacji roślin oraz na gruntach o spadkach nieprzekraczających 10%. Osady ściekowe nie mogą być stosowane na terenach zalewowych i czasowo

podtopionych oraz terenach zlokalizowanych w odległości mniejszej niż 100 m od domu mieszkalnego lub zakładu produkcji żywności [56]. Komunalne osady ściekowe stosuje się w postaci płynnej, mazistej lub ziemistej [55].

Właściwości komunalnych osadów ściekowych i ich wpływ na środowisko naturalne silnie uzależnione są od technologii stosowanych w oczyszczalniach ścieków na etapie oczyszczania ścieków oraz stabilizacji i ich higienizacji. Ilość osadów powstających z jednego metra sześciennego oczyszczanych ścieków kształtuje się na poziomie od 0,1 do 0,34 kg s.m./m^3 [35].

Ustabilizowane i zhigienizowane komunalne osady ściekowe posiadają wysokie walory nawozowe, są bogatym źródłem materii organicznej i składników pokarmowych. Wprowadzone do środowiska glebowego poprawiają jego próchniczność. Po poddaniu ich właściwemu procesowi higienizacji i uszlachetnienia mogą być wykorzystywane jako nawóz organiczny na podobnych zasadach jak obornik [1, 45]. Przy ustalaniu dopuszczalnej dawki komunalnego osadu ściekowego, wykorzystywanego na uprawach energetycznych, powinno uwzględniać się zasady dobrej praktyki rolniczej. Spośród nich za najważniejsze można uznać [40]:

- roczna dawka azotu nie powinna przekroczyć 250 kgN/ha i powinna być dopasowana od ubytku substancji nawozowych wyprowadzanych z plantacji z plonami,
- wstrzymanie aplikacji osadów w okresach dużych opadów,
- metoda aplikacji powinna uwzględniać fazę rozwojową roślin.

Nieodzownym warunkiem stosowania osadów ściekowych jako środka nawozowego i glebotwórczego jest odpowiednia przeróbka osadu ściekowego oraz ciągły monitoring zarówno osadu ściekowego, jak i gruntów, na których jest stosowany [13].

3. Przyrodnicze aspekty funkcjonowania plantacji

3.1. Rośliny energetyczne

Rośliny stosowane w uprawach energetycznych powinny charakteryzować się dużym przyrostem rocznym biomasy, wysoką wartością opałową, jak również znaczną odpornością na szkodniki i choroby. Większość roślin energetycznych wykazuje stosunkowo niewielkie wymagania glebowe. Do roślin, które mogą być wykorzystywane na cele energetyczne, zalicza się przede wszystkim: wierzbę krzewiastą/wiciową (*Salix viminalis*) zwaną pospolicie energetyczną, słonecznik bulwiasty tzw. topinambur (*Helianthus tuberosus*), rdest sachaliński (*Polygonum sachalinense*), różę wielokwiatową, bezkolcową (*Rosa multiflora*), słomę rzepaku i zbóż, trawy wieloletnie: miskant olbrzymi (fot. 1) zwany chińskim lub słoniowym (*Miscanthus sinensis var. gigantheus*), miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*), ślazowiec pensylwański (fot. 2) zwany też malwą pensylwańską (*Sida hermaphrodita*), spartina preriowa (*Spartina pectinata*), mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea*), a także perz kępkowy wydłużony (*Agropyron elongatum*), paulownia puszysta (*Paulownia tomentosa*), topola hybrydowa (*Populus tremula x Populus tremuloides*) i robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia)* [15, 17, 18, 19, 20, 50].

Fot. 1. Miskant olbrzymi (*Miscanthus sinensis var. gigantheus*)
Źródło: Rośliny energetyczne: http://www.ekotrasa.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=67:03roliny-energetyczne&catid=34:galeria&Itemid=59 (dostęp: 15.09.2015)

Fot. 2. Ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*)
Źródło: Rośliny energetyczne: http://www.ekotrasa.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=67:03roliny-energetyczne&catid=34:galeria&Itemid=59 (dostęp: 15.09.2015)

Rośliny energetyczne mogą stanowić substrat do biogazowni (mokra masa lub kiszonka) lub mogą być stosowane do spalania w postaci zrębek (np. wierzba), brykietu (np. miskant), peletu (np. topinambur). Bezpośrednie spalanie jest obecnie najbardziej popularną metodą wykorzystania roślin energetycznych o zdrewniałych pędach. Perspektywy rozwoju metod wykorzystania biomasy zakładają jednak do roku 2030, jako podstawowy kierunek, produkcję biopaliw drugiej generacji, ze szczególnym naciskiem na bioetanol wytworzony z hemicelulozy zdrewniałych pędów [2, 8, 27]. W tym celu prowadzi się badania dotyczące uzyskania najbardziej produktywnych roślin z jak największą zawartością celulozy poddawanej procesowi hydrolizy i późniejszej fermentacji [38]. Frakcje ligninowe biomasy, trudno przekształcalne w procesach biologicznego rozkładu będą poddawane procesowi zgazowania lub bezpośredniego spalania [47]. W reżimie produkcji bioetanolu nie jest problemem nadmierne uwilgotnienie biomasy, co stwarza duże trudności przy spalaniu.

Rośliny energetyczne charakteryzują się różną wartością opałową, która związana jest z budową strukturalną i ze składem chemicznym komórek roślin generatywnych w kolejnych latach uprawy (tab. 1). Dlatego też zbiór biomasy roślin energetycznych prowadzony jest w kilkuletnich cyklach, np. 3 letnim w przypadku wierzby energetycznej. Do uprawy na cele energetyczne preferowane są rośliny wieloletnie, których okres użytkowania wynosi przynajmniej 12–20 lat, bo zmniejsza to koszty ich uprawy. Dobór gatunków zależy od warunków glebowo-klimatycznych, wyposażenia technicznego gospodarstwa oraz wymagań odbiorców (zakładów energetycznych) w zakresie jakości biomasy.

Tab. 1. Wartość opałowa i produkty spalania wybranych roślin energetycznych

Rodzaj	Wartość opałowa [MJ/kg]	Popiół [%]	Siarka [%]	Chlor [%]
Miskant olbrzymi	17,0–19,0	3,0	0,05	0,2
Mozga trzcinowa	14,0–15,0	5,0–9,0	0,15	0,5
Perz wydłużony	18,0–19,0	3,1	0,05	0,2
Wierzba	17,0–19,0	1,8–3,0	0,05	0,5
Topinambur	15,9	b.d.	b.d.	b.d.
Słoma pszenna	16,8–17,2	b.d.	b.d.	b.d.
Słoma rzepakowa	16,1–16,6	b.d.	b.d.	b.d.
Pellet z łuski słonecznika	16,4	3,0	0,13	0,08
Pellet z makuchu rzepakowego	15,2	9,0	0,22	0,22
Pellet z otrąb	14,2	6,0	0,19	0,08
Węgiel kamienny	25,0–28,0	16,0–18,0	0,8	0,1

b.d. – brak danych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie:
A. Kołodziej, Nowe rośliny energetyczne: miskant olbrzymi (trawa słoniowa), Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2015; A. Kołodziej, Nowe rośliny energetyczne: perz kępkowy wydłużony, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2012; A. Kołodziej, Nowe rośliny energetyczne: słonecznik bulwiasty (topinambur), Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2013.

3.2. Gleby

Rośliny energetyczne wymagają odpowiednich warunków hydrogeologicznych, dlatego właściwości fizykochemiczne gruntu, pH, skład mechaniczny, hipsografia terenu stanowią podstawowe kryterium przydatności areału do produkcji rolniczej [28]. Rośliny energetyczne – szczególnie wierzba – wymagają wysokiego poziomu wód gruntowych, ponieważ mają bardzo rozbudowany system korzeniowy, a w przypadku gleb suchych i piaszczystych wymagają odpowiedniej irygacji. Uprawa na glebach lekkich, bez systemów nawadniania, daje niestabilne plony, a system korzeniowy może blokować warstwę filtracyjną gleby. Nawodnienie i odczyn gleby decydują o jakości i wydajności plantacji. Istotną zaletą roślin energetycznych jest ich łatwa zdolność adaptacyjna, przede wszystkim na terenach zanieczyszczonych i zdewastowanych przemysłowo. Z tego powodu mogą być uprawiane na glebach niższych klas bonitacyjnych: III a i b, IV a i b, V oraz wszystkich glebach rolniczych, na których ze względu na dużą ilość zanieczyszczeń zakazana jest uprawa roślin spożywczych [14, 43]. Szerokie spektrum potrzeb wodnych roślin energetycznych pozwala dobrać gatunki do uprawy zarówno w środowisku o wysokim poziomie wód gruntowych, a nawet okresowo zatapianych, jak również na glebach niskiej klasy bonitacyjnej, charakteryzujących się niedoborami wodnymi [49]. Analiza danych [21] wskazuje, że w Polsce istnieje znaczny areał gruntów potencjalnie przydatnych pod uprawę roślin energetycznych (tab. 2).

Tab. 2. Powierzchnie użytków rolnych potencjalnie przydatnych pod uprawę roślin energetycznych (tys. ha)

Województwo	**Kompleks przydatności rolniczej gleb***					**Razem**	
	5	**6**	**8**	**9**	**3z**	**tys. ha**	**% UR**
Dolnośląskie	29,7	40,5	15,7	0,4	2,0	88,3	6,8
Kujawsko-pomorskie	0,2	7,5	0,0	0,0	0,4	8,1	0,6
Lubelskie	16,2	26,9	0,0	0,0	25,7	68,8	3,1
Lubuskie	10,3	32,3	2,3	2,0	6,6	53,4	6,5
Łódzkie	25,0	42,8	0,0	1,4	11,0	80,2	4,9
Małopolskie	9,5	1,4	3,9	0,2	0,1	15,1	2,3
Mazowieckie	38,4	30,3	8,8	1,2	34,6	105,2	3,3
Opolskie	13,9	13,0	13,9	6,7	2,4	49,9	7,2
Podkarpackie	12,5	59,4	4,5	0,1	15,8	92,2	10,3
Podlaskie	24,1	13,7	0,5	1,1	16,8	56,2	3,6
Pomorskie	10,0	15,1	2,6	1,2	20,2	49,1	3,8
Śląskie	22,4	29,9	3,5	0,6	14,4	70,8	9,0
Świętokrzyskie	5,7	14,2	0,1	0,0	2,0	21,9	2,3
Warmińsko-mazurskie	6,4	10,8	6,8	0,0	18,5	42,6	2,3

Wielkopolskie	12,4	19,8	0,1	1,6	9,1	42,9	1,8
Zachodniopomorskie	28,5	27,3	2,3	1,5	49,7	109,4	6,5
Polska	*265,0*	*385,0*	*57,1*	*17,7*	*229,3*	*954,1*	*4,6*

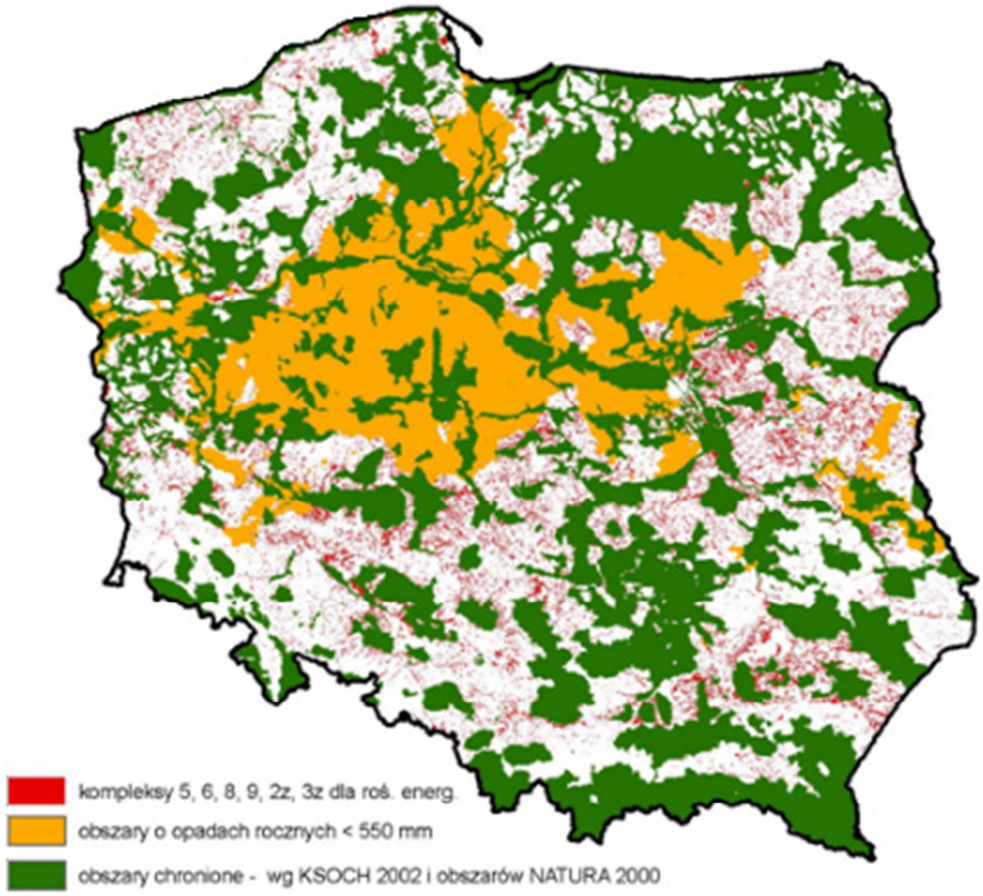
* 5 – żytni dobry, 6 – żytni słaby, 8 – zbożowo-pastewny mocny, 9 – zbożowo-pastewny słaby, 3z – użytki zielone i bardzo słabe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: J. Kuś, A. Faber, Produkcja roślinna na cele energetyczne a racjonalne wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej, Puławy 2009, s. 61–75.

W Polsce plantacji wieloletnich roślin energetycznych nie powinno się zakładać na glebach bardzo dobrych i dobrych, które stanowią zaledwie 54% ogółu gruntów ornych i są niezbędne do produkcji żywności i pasz (ryc. 1) [37]. Jak wynika z zamieszczonej grafiki, najbardziej do upraw roślin energetycznych nadają się północne tereny województwa podkarpackiego.

Wskazane jest zakładanie plantacji energetycznych na terenach odłogowanych, skażonych zanieczyszczeniami antropogenicznymi, aby nie wyłączać gruntów z produkcji rolnej. Rośliny energetyczne mają dodatkowo zdolności remediacyjne i rekultywacyjne, np. miskant pobiera z gleby metale ciężkie, w częściach nadziemnych gromadzony jest arsen, miedź i cynk, z kolei w podziemnych ołów, kadm i nikiel [17].

Ryc. 1. Obszary predysponowane do lokalizacji wieloletnich plantacji roślin energetycznych (kolor czerwony) oraz rejony, w których plantacji nie należy lokalizować (kolor pomarańczowy i zielony)



Źródło: Przydatność gatunków: http://www.klimatarolnictwo.pl/biomasa/wykorzystanie/przydatnosc-gatunkow (dostęp: 15.09.2015)

3.3. Uwarunkowania klimatyczne

Bardzo ważnym aspektem środowiskowym, którym należy kierować się w trakcie wstępnego rozpoznawania możliwości utworzenia plantacji, jest średnia temperatura danego rejonu oraz suma opadów. Wymagania termiczne roślin wykorzystywanych do produkcji biomasy do celów energetycznych, genotypowo pochodzących z naszej strefy klimatycznej, są umiarkowane. Krzewy i drzewa szybko odrastające (wierzba, topola) w okresach niskich temperatur nie przemarzają. Stosunkowo wrażliwe na niskie temperatury w naszym klimacie są młode sadzonki miskanta olbrzymiego, w następnych latach uprawy mroźne zimy nie powodują już strat. Jak już wspomniano, pod względem potrzeb wodnych najbardziej wymagająca jest wierzba. Należy jej zapewnić między 400 a 450 mm wody w okresie wegetacji, a poziom wody gruntowej powinien być niższy niż 2 m. Duże znaczenie w sytuacji niedoborów wody ma odpowiedni wybór genotypowy wierzby.

Badania przeprowadzone w Szwecji [26] wykazały, że spadek produktywności może sięgać nawet 30% (klon referencyjny LF8183 w porównaniu do klonu Jorr, którego produktywność w warunkach ograniczonego uwilgotnienia wykazała tendencję wzrostową). W miejscach, gdzie dominują gleby lekkie, przepuszczalne, a poziom wody gruntowej jest niski, bardziej opłacalne jest stosowanie nasadzeń miskantu olbrzymiego. Z uwagi na fotosyntezę typu C_4 wydajniejszą od C_3 charakteryzującą inne rośliny energetyczne, miskant lepiej wykorzystuje dostępną energię słoneczną. Doświadczenia innych krajów leżących w podobnej do Polski strefie klimatycznej wykazują że w warunkach okresowego deficytu wody, na lekkich glebach, plonowanie miskanta waha się od 10 do 15 t s.m./ha [25, 51].

4. Wybrane środki techniczne w plantacji roślin energetycznych

4.1. Zakładanie i nawożenie

Wieloletnie rośliny energetyczne posiadające różną budowę oraz zróżnicowany system korzeniowy do prawidłowego rozwoju potrzebują odpowiedniej ilości składników pokarmowych, których w wystarczającej ilości na dłuższy okres podczas zakładania i eksploatacji plantacji nie można dostarczyć do gleby. Plantacje roślin energetycznych w trakcie użytkowania nawożone są powierzchniowo nawozami sztucznymi przy użyciu powszechnie znanych specjalistycznych maszyn zwanych rozrzutnikami nawozów mineralnych. Efektywność wzbogacania pokarmowego plantacji uzależniona jest od właściwego dawkowania nawozów, głębokości nawożenia oraz bezzwłocznego przykrycia nawozu glebą, czego nie zapewniają klasyczne rozrzutniki nawozów. Proces ten nabiera szczególnego znaczenia w związku z wykorzystywaniem do nawożenia odpowiednio przygotowanego osadu komunalnego z oczyszczalni ścieków, którego zastosowanie jest warunkowane bezzwłocznym przykryciem glebą [28, 29, 31].

Biorąc pod uwagę lokalizację plantacji roślin energetycznych głównie na terenach wyłączonych z produkcji żywności i pasz oraz postulaty racjonalnego zagospodarowania odpadów pochodzących z komunalnych oczyszczalni ścieków, celowe staje się nawożenie plantacji energetycznych osadami ściekowymi. Wyniki badań wskazują, że niektóre osady ściekowe działają jak typowe nawozy organiczne, z kolei inne ulegają szybkiej mineralizacji i zachowują się jak nawozy organiczno-mineralne [17]. Osady ściekowe dostarczają mikro- i makroskładników, a zhigienizowany osad wapnem podnosi również pH gleby. Ponadto zniechęca dziki do żerowania na plantacji [19].

Przegląd literatury tematu wskazuje, że nawożenie roślin energetycznych powoduje większy przyrost ich biomasy. Przykładowo wzrost miskanta olbrzymiego najintensywniej przebiegał pod wpływem wzbogacenia gleby w osady ściekowe w dawce 40 t/ha. Sumaryczne średnie zbiory z trzech lat dla tego nawożenia były 1,3-krotnie wyższe w porównaniu z plonami uzyskiwanymi przy nawożeniu mineralnym. Wzrost ślazowca najintensywniej przebiegał pod wpływem wzbogacenia gleby w osady ściekowe w dawce 40 t/ha oraz 20 t/ha. Dla obu dawek osadów ściekowych wysokość plonowania była zbliżona. Sumaryczne średnie zbiory z trzech lat przy zastosowaniu tych substratów były ok. 2,5-krotnie wyższe w porównaniu z glebą

nienawożoną i 1,6-krotnie wyższe w porównaniu z plonami uzyskiwanymi przy nawożeniu mineralnym [34]. W innych badaniach na polach doświadczalnych stosowanie osadów ściekowych w ilości 63 ton/ha spowodowało nie tylko zwiększenie plonów miskanta olbrzymiego, lecz także wzrost parametrów biometrycznych roślin (długość źdźbła, liczba źdźbeł, liczba liści na 1 m wysokości) w porównaniu do upraw kontrolnych [17]. Analiza przeprowadzona przez Labrecque'a i współpracowników, jeszcze w latach 90. minionego stulecia [24], wykazała, że wierzba wicowa reaguje w sposób linowy przyrostem biomasy, na wzrastające dawki osadu, wyrażanego jako azot przyswajalny w kg/ha. Przy dawce osadu wynoszącej w ekwiwalencie azotowym 200 kgN/ha, w porównaniu do próby kontrolnej nienawożonej osadem, uzyskano następujące przyrosty:

- 70% wysokości roślin,
- 72% średnicy,
- 415% masy pędów,
- 200% masy korzeniowej,
- 540% masy liści.

Jeszcze większy przyrost biomasy roślin notowany jest w przypadku nawadniania plantacji ściekami, wprowadzanymi na pola po różnych stopniach oczyszczania. Jakkolwiek działalność taka podlega ograniczeniom natury prawnej, estetycznej i higienicznej, przynosi spektakularne rezultaty. Wyjaśnieniem tego wydaje się być bardzo zbliżony do optymalnego dla wierzby udział makroskładników w ściekach (tab. 3).

Tab. 3. Zawartość makroskładników NPK (ilość azotu określono na poziomie 100 jednostek) w typowym osadzie ściekowym i ściekach komunalnych odniesione w stosunku do potrzeb wierzby

Składnik nawozowy	Wymagania wierzby	Osad średnio	Ścieki średnio
N –ogólny	100	100	100
P – ogólny	14	73	17,5
K	72	9	64

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: K.L. Perttu, Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden, Biomass and Bioenergy, 16, 4, 1999, s. 291–297.

Nawadnianie wstępnie oczyszczonymi ściekami zastosowane w pobliżu Kambji (południowo-wschodnia Estonia) spowodowało blisko 40% wzrost plonów na plantacji wierzby, przy równoczesnym osiągnięciu wysokiego poziomu oczyszczania ścieków z substancji biogennych [11]. W Polsce analizę możliwości wykorzystania ścieków do nawodnień plantacji przeprowadził Włodek wraz ze współpracownikami [48].

4.2. Zbiór biomasy

Wybór sposobu pozyskiwania biomasy z plantacji jest uwarunkowany rodzajem uprawianych roślin oraz wielkością plantacji. Najprostsza metoda – ścinanie pędów przy pomocy ręcznych narzędzi (piła łańcuchowa, kosa spalinowa) i jej późniejszy przerób w gospodarstwie jest efektywna na małych plantacjach i w sytuacji wysokich cen skupu biomasy [23].

Bardziej wydajne metody zakładają wykorzystanie sprzętu specjalistycznego. Istnieją dwie grupy urządzeń [3]:

- maszyny do zbioru pędów bez przekształcania postaci,
- urządzenia zbierające z jednoczesnym przekształceniem postaci (najczęściej do zrębek).

Zalety i wady tych rozwiązań przedstawia tabela 4.

Tab. 4. Zestawienie cech maszyn służących do zbioru biomasy

Maszyny do zbioru całych pędów	
Zalety	**Wady**
• akceptowalny koszt zakupu • po zbiorze materiał może być składowany w luźnych stosach, • możliwość dosuszenia biomasy w trakcie składowania • zbiór i przeróbka mogą być przesunięte w czasie	• wymagana jest duża powierzchnia składowania biomasy • konieczność późniejszego przetworzenia biomasy • maszyny są wysokospecjalizowane i nie mają alternatywnych zastosowań • niska gęstość zebranego materiału powoduje wysokie koszty transportu konwencjonalnym taborem
Maszyny do zbioru i przetwarzania	
Zalety	**Wady**
• duża wydajność • mogą mieć inne zastosowania • przetworzona biomasa może być transportowana do odbiorców prosto z plantacji	• wysokie koszty zakupu • przechowywanie zrębków i sieczki musi się odbywać w kontrolowanych warunkach • duże koszty składowania biomasy • brak możliwości dosuszenia • wielkość i masa często uniemożliwia ich wykorzystywanie na terenach okresowo podmokłych

Źródło: Opracowanie własne

Uwarunkowania hydrogeologiczne, klimatyczne i gospodarcze województwa podkarpackiego jednoznacznie wskazują, że optymalnym rozwiązaniem jest stosowanie zestawu specjalizowanych urządzeń, które można użytkować z powszechnie stosowanymi w rolnictwie ciągnikami Przykłady takich rozwiązań były rozpowszechniane w ostatnich latach kilkukrotnie [29, 30, 32].

4.3. Likwidacja plantacji

Ponieważ po 20–25 latach plonowanie roślin energetycznych (a zwłaszcza wierzby) ulega obniżeniu, z ekonomicznego punktu widzenia plantacja powinna być zlikwidowana. W przypadku wierzby po ostatnim zbiorze można przeprowadzić operację

wyorania karp pługiem karczownikiem. Innym sposobem może być zastosowanie rototilera lub cyklotirela, urządzeń rozdrabniających korzenie i mieszający je z glebą. Rośliny trawiaste i wierzbę w pełni okresu wegetacyjnego można opryskać roztworem glifosatu. W tym przypadku pełna biodegradacja części podziemnych roślin może trwać nawet kilka lat.

5. Ekonomia przedsięwzięcia

W procesie produkcji biomasy energetycznej można wyróżnić następujące etapy i z nimi związane koszty: koszty założenia plantacji, koszty użytkowania plantacji oraz koszty likwidacji plantacji. Koszty związane z założeniem plantacji stanowią koszty materiałowe, koszty zabiegów agrotechnicznych (mechanizacji) i koszty pośrednie (np. analizy gleby, podatek gruntowy). Rozłożenie kosztów założenia plantacji, odniesione do lat jej użytkowania pozwala na oszacowanie średniorocznych kosztów prowadzenia plantacji (koszt amortyzacji plantacji) [22]. Koszty założenia i prowadzenia plantacji roślin energetycznych są bardzo zróżnicowane w zależności od wyboru sposobu zakładania plantacji. Wysokie koszty związane są z materiałem siewnym, przygotowaniem i sadzeniem sadzonek. Ostateczna opłacalność produkcji roślin energetycznych uzależniona jest od możliwości jej sprzedaży, kosztów transportu i jej przetwarzania [44].

Jak już wspomniano, najprostszym systemem zbioru biomasy jest wykorzystanie narządzi obsługiwanych ręcznie. Granicą opłacalności w tym systemie jest cena zrębków na poziomie 120 zł/t. Uzyskanie ceny poniżej tej wartości wyklucza powodzenie przedsięwzięcia bez względu na powierzchnię uprawy. Zastosowanie kosiarki tarczowej, transport do gospodarstwa i tam rozdrabnianie staje się efektywne przy wielkości plantacji od 2 do 6 ha, w odniesieniu do ceny skupu wynoszącej odpowiednio od 180 do 120 zł/t. Granicą opłacalności maszyn specjalizowanych (sieczkarnia samojezdna) jest powierzchnia odpowiednio od 17 do 70 ha [23].

Opłacalność produkcji roślin energetycznych trudno jednoznacznie określić, bowiem rynek biomasy rolniczej aktualnie jest w fazie rozwoju i mocno uzależniony od polityki regionalnej. Rozwój ten hamuje przede wszystkim brak gwarancji sprzedaży. Wiele osób rozpoczęło uprawę roślin energetycznych, nie mając dostatecznej wiedzy na temat rynku biomasy i aktualnie są trudności ze zbytem. Gwarantem stabilizacji rynku biomasy będą stabilne i długofalowe rozwiązania prawne, jak również zawieranie wieloletnich kontraktów pomiędzy producentami energii i wytwórcami biomasy [18].

Przykładowe analizy ekonomiczne produkcji biomasy energetycznej przedstawili m.in.: Kwaśniewski [22] dla wierzby energetycznej, Stolarski i współpracownicy [44] dla ślazowca pensylwańskiego. Koszty założenia plantacji wierzby energetycznej, miskanta olbrzymiego i perzu wydłużonego zaprezentowano w tabeli 5.

Tab. 5. Porównanie kosztów założenia plantacji trzech gatunków roślin energetycznych

Podstawowe nakłady (zł/ha)	Perz wydłużony kępkowy	Miskant olbrzymi	Wierzba wiciowa
Uprawa polowa (mechaniczna i zabiegi mechaniczne)	2000,0	2000,0	2000,0
Sadzonkowanie roślin lub siew nasion	200,0	800,0	800,0
Wartość sadzonek lub nasion	500,0	16 000,0	6000,0
Koszty łączne	**2700,0**	**18 800,0**	**8800,0**
Plon suchej biomasy (t/ha)	12–15	15–22	16–22
Wymagany sprzęt, maszyny do zbioru	kosiarka, prasa	kosiarka, przyczepa wysokiego zgniotu	rębaki, rozdrabniacze, kombajn (duży areał)
Wymagany sprzęt do likwidacji plantacji	pług	chemicznie, rozdrabniacz, pług	karczownik, rozdrabniacz karp

Źródło: Opracowanie własne, na podstawie: A, Kołodziej, Nowe rośliny energetyczne: miskant olbrzymi (trawa słoniowa), Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2015; A. Kołodziej, Nowe rośliny energetyczne: perz kępkowy wydłużony, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2012.

W obecnej, szybko zmieniającej się sytuacji rynkowej, trudno jednoznacznie wskazać perspektywy rozwoju plantacji. Dlatego też należy zwracać uwagę na kraje, które mają większe doświadczenie. W Szwecji, gdzie powierzchnia upraw roślin energetycznych sięga około 14 000 ha, w 80–90% liczby plantacji jako środków nawozowych używa się osadów ściekowych [4]. Według Dimitrou i Rosenqvista stosowanie osadów ściekowych do nawożenia pozwala w pewnym stopniu zrekompensować plantatorom wahania cen rynkowych biomasy, poprzez wzrost plonu z hektara, a także dodatkowy przychód pochodzący z przedsiębiorstw komunalnych [7]. Ci sami autorzy szacują zmniejszenie kosztów produkcji biomasy przy zastosowaniu osadu ściekowego na poziomie 25–30% ogólnych kosztów. Duże znaczenie mogą mieć również wymogi środowiskowe zapisane we Wspólnej Polityce Rolnej. Obowiązkiem gospodarstw ubiegających się o dopłaty będzie pozostawienie części areału (od 5 do 7%) jako użytków ekologicznych. Jedną z dopuszczalnych form gospodarowania na tych terenach będzie plantacja drzewiastych roślin energetycznych.

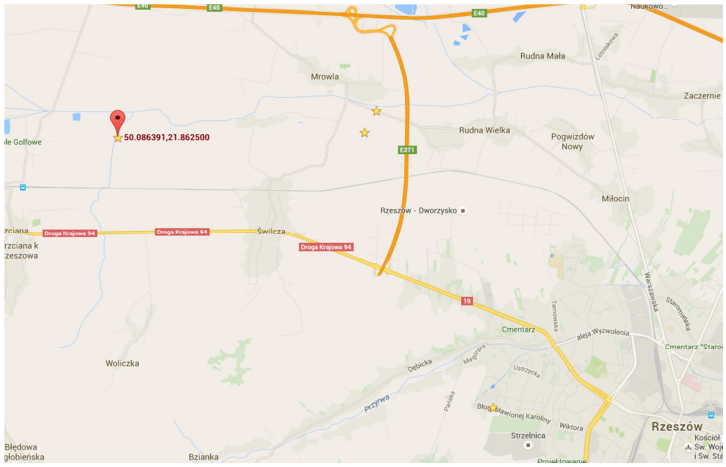
6. Doświadczalna plantacja roślin energetycznych w Świlczy

Istotnym przykładem praktycznego wykorzystania innowacyjnych rozwiązań technologii przygotowania i eksploatacji plantacji roślin energetycznych jest doświadczalna plantacja roślin energetycznych w Świlczy. Podmiotami współpracującymi w założeniu plantacji są :

- Politechnika Rzeszowska,
- Uniwersytet Rzeszowski,
- Spółdzielcza Grupa Producentów Roślin Energetycznych Agroenergia,
- Gmina Świlcza.

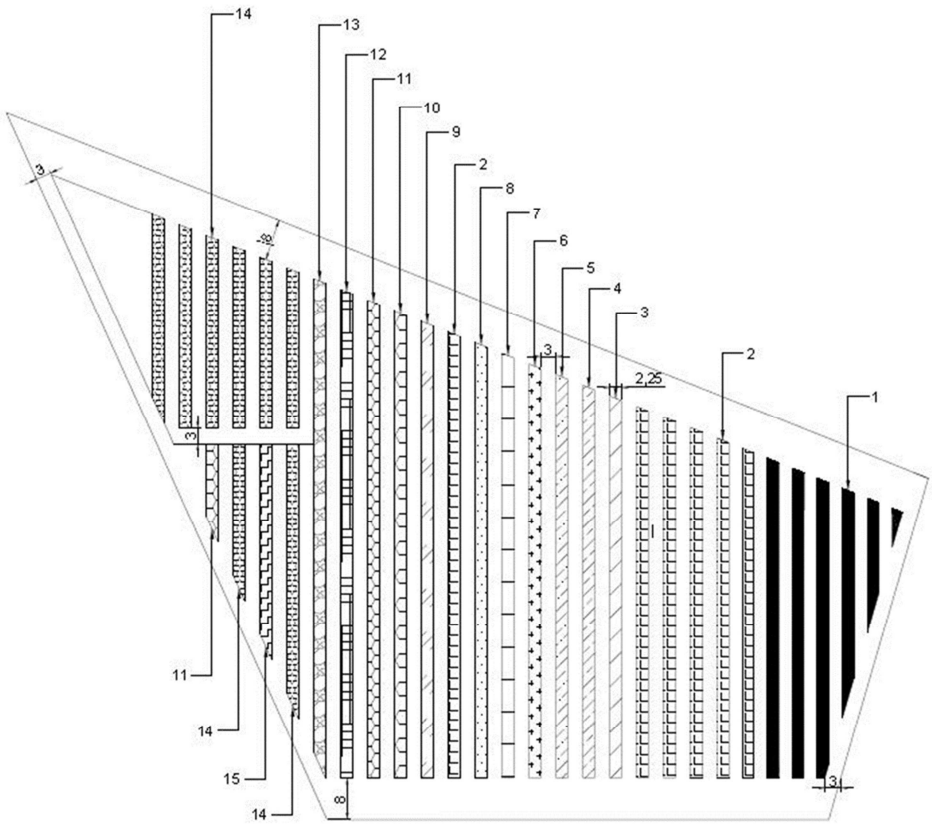
Położona pomiędzy drogą krajową DK 94 a autostradą A4 (ryc. 2) obejmie docelowo powierzchnię ponad 30 ha. Rośliny poddane analizie to: paulownia, robinia akacjowa, róża bezkolcowa i klony wierzby (ryc. 3).

Ryc. 2. Lokalizacja doświadczalnej plantacji roślin energetycznych w Świlczy



Źródło: maps.google.com (dostęp: 10.06.2015)

Ryc. 3. Plan nasadzeń plantacji roślin energetycznych w Świlczy



1 – genotyp RF, 2 – genotyp RM-1, 3 – genotyp RZ47, 4 – genotyp RZ52, 5 – genotyp FR, 6 – genotyp M, 7 – genotyp RFM 3, 8 – genotyp RFM 2, 9 – genotyp RZ 54, 10 – mix mieszanki, 11 – robinia + mix wierzby, 12 – robinia, 13 – mix wierzby + róża bezkolcowa, 14 – mix wierzby, 15 – paulownia

Źródło: Opracowanie własne

Zakres planowanych do wykonania prac obejmować będzie:

I. Określenie optymalnych dawek osadów z uwzględnieniem uwarunkowań prawnych.
II. Sprawdzenie prototypowych maszyn i urządzeń w ramach badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych.
III. Badanie oddziaływania na środowisko gleb i wód opracowanej technologii uprawy roślin.
IV. Upowszechnienie rezultatów opracowanej technologii produkcji roślin energetycznych i przemysłowych.

W chwili obecnej dokonano analiz monitoringu zerowego gleb i wód powierzchniowych drenujących teren plantacji, a także przeprowadzono pierwsze procedury dawkowania osadów. Wygląd plantacji w czasie poboru przedstawiają fotografie 3 i 4.

Fot. 3 i 4. Plantacja doświadczalna uprawy roślin energetycznych nawożonych osadem ściekowym w Świlczy
Źródło: fot. A. Piech

7. Oddziaływanie na środowisko plantacji roślin energetycznych nawożonych komunalnymi osadami ściekowymi

Nieumiejętne stosowanie osadów ściekowych może prowadzić do niekorzystnych zmian właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych w glebie. Najczęściej popełnianie błędy przy nawożeniu upraw energetycznych to aplikacja zbyt dużych dawek i nieprzestrzeganie terminów wprowadzenia osadów ściekowych do gleb. Aplikacja zawyżonych dawek osadów ściekowych w postaci płynnej może prowadzić z kolei do gromadzenia się ich na powierzchni gleby. Osady płynne mogą zawierać znaczne ilości drobnych włókien roślinnych i zwierzęcych, które w połączeniu z tłuszczami tworzą na powierzchni gleby warstwę pilśniową nieprzepuszczającą wody oraz utrudniającą wymianę powietrza i rozkład masy organicznej. Wprowadzone do gleby z osadami ściekowymi związki chemiczne podlegają złożonym procesom biochemicznym – mineralizacji, sorpcji, unieruchamiania, nitryfikacji, denitryfikacji, utleniania do atmosfery, pobierania przez rośliny i wypłukiwania w głąb profilu gleb. Nadmiernie duże dawki osadów wprowadzają do gleby zbyt duże ilości substancji organicznej w środowisku beztlenowym. Z kolei zbyt częste dawkowanie osadów w ponadnormatywnych dawkach może prowadzić do nadmiernego nagromadzenia się w glebie metali ciężkich [1].

Dotychczasowe badania wskazują brak negatywnego wpływu plantacji roślin energetycznych na środowisko, a wręcz można zauważyć wpływ pozytywny. Uprawy roślin energetycznych mogą spełniać funkcję buforów wodnych, zwiększyć bioróżnorodność organizmów pożytecznych oraz wykorzystać składniki pokarmowe z głębszych warstw gleby niedostępne dla innych roślin. Badania wskazują także, że istniejące

już odmiany odporne na szkodniki i patogeny, dobrane dla odpowiedniej strefy klimatycznej, nie wymagają znacznej ochrony chemicznej. A zatem brak istotnego powodu do odwrotu od alternatywnych źródeł energii i konieczne są opracowania informujące o opiniach oraz badaniach dotyczących pozyskiwania energii z biomasy [39]. Uprawy roślin energetycznych zmniejszają możliwość zanieczyszczenia wód podziemnych związkami biogennymi. Średnia zawartości azotanów w próbkach pobranych z lizymetrów umiejscowionych na plantacjach wierzby w Szwecji oscylowała wokół 1 mg/L i była porównywalna z ilościami azotanów określanych dla użytków zielonych. W przypadku fosforanów ich ilości były nieco większe, ale nie przekraczały wartości 0,01 mg/L. Co istotne, dawkowanie osadów ściekowych nie zwiększyło migracji biogenów. W 15-letnim cyklu produkcji biomasy ilości fosforu deponowane na hektarze plantacji mogą wynosić nawet 539 kg [5].

Ważną ekologiczną funkcją wieloletnich upraw roślin energetycznych jest akumulacja materii organicznej w glebie. Analiza danych zebranych w okresie 10 do 20 lat obserwacji wykazała zwiększenie zawartości węgla organicznego w powierzchniowych poziomach gleby o 9%, a podpowierzchniowych o 27% w odniesieniu do prób referencyjnych [6].

Interesujące wyniki dotyczące wpływu uprawy wierzby nawadnianej wstępnie oczyszczonymi ściekami na stan mikrobiologiczny gleby zaprezentowała Truu i współpracownicy. W badaniach wykazano przyrost biomasy, zwiększenie aktywności mineralizacji azotu i aktywności oddechowej pól irygowanych ściekami [46].

Przy stosowaniu osadów ściekowych w uprawach energetycznych celem ich minimalizacji wpływu na środowisko, konieczne jest przede wszystkim właściwe ich przygotowanie (obróbka) w oczyszczalni ścieków poprzez ustabilizowanie i higienizację oraz właściwe zabiegi agrotechniczne, czyli stosowanie odpowiednich urządzeń i maszyn.

8. Podsumowanie

Zagospodarowanie osadów ściekowych na terenach niskozurbanizowanych sprowadza się przede wszystkim do rolniczego ich wykorzystania, przy czym efektem takiego kierunku gospodarki jest produkcja biomasy energetycznej. Właściwości komunalnych osadów ściekowych determinują produkcję biomasy, jak również wpływają w istotny sposób na środowisko naturalne. W oparciu o badania własne, jak również studium literatury, wysunięto następujące wnioski:

1. Dotychczasowe badania nowych środków technicznych i porównanie ich z danymi literaturowymi pozwalają stwierdzić, że uprawa roślin do produkcji biomasy do celów energetycznych jest atrakcyjnym rozwiązaniem problemu sanitacji obszarów niskozurbanizowanych.
2. Właściwie prowadzona technologia depozycji osadów ściekowych do nawożenia plantacji nie powoduje niebezpieczeństwa zanieczyszczenia środowiska wodno-glebowego.

3. Z uwagi na wielość i zmienność czynników kształtujących efektywność ekonomiczną przedsięwzięcia polegającego na założeniu plantacji roślin energetycznych, każdorazowo należy przeprowadzić szczegółowy rachunek ekonomiczny.
4. Badana technologia jest konkurencyjna w odniesieniu do znanych rozwiązań ze względu na proste maszyny i urządzenia wykorzystywane jako środki techniczne.

Bibliografia

1. Baran S., Łabętowicz J., Krzywy E., *Przyrodnicze wykorzystanie odpadów: podstawy teoretyczne i praktyczne*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 2011, s. 1–324.
2. Carroll A., Somerville C., *Cellulosic Biofuels*, Annual Review of Plant Biology, nr 60, 1, 2009, s. 165–182.
3. Culshaw D., Stokes B., *Mechanisation of short rotation forestry*, Biomass and Bioenergy, nr 9, 1–5, 1995, s. 127–140.
4. Dimitriou I., Aronsson P., *Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters – Plant response and treatment efficiency*, Biomass and Bioenergy, nr 35, 1, 2011, s. 161–170.
5. Dimitriou I., Mola-Yudego B., Aronsson P., *Impact of Willow Short Rotation Coppice on Water Quality*, BioEnergy Research, nr 5, 3, 2012, s. 537–545.
6. Dimitriou I., Mola-Yudego B., Aronsson P., Eriksson J., *Changes in Organic Carbon and Trace Elements in the Soil of Willow Short-Rotation Coppice Plantations*, BioEnergy Research, nr 5, 3, 2012, s. 563–572.
7. Dimitriou I., Rosenqvist H., *Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production – Biological and economic potential*, Biomass and Bioenergy, nr 35, 2, 2011, s. 835–842.
8. Dwivedi P., Alavalapati J.R.R., Lal P., *Cellulosic ethanol production in the United States: Conversion technologies, current production status, economics, and emerging developments,* Energy for Sustainable Development, nr 13, 3, 2009, s. 174–182.
9. Ericsson K., Rosenqvist H., Ganko E., Pisarek M., Nilsson L., *An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland*, Biomass and Bioenergy, nr 30, 1, 2006, s. 16–27.
10. Ginalski Z., *Odnawialne źródła energii szansą rozwoju obszarów wiejskich*, Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, nr 2, Poznań 2013, s. 79–89.
11. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? —: *http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_7*. (dostęp: 04.09.2015).
12. Holm B., Heinsoo K., *Municipal wastewater application to Short Rotation Coppice of willows – Treatment efficiency and clone response in Estonian case study*, Biomass and Bioenergy, nr 57, 2013, s. 126–135.
13. Ilba E., Tomaszek J.A., Masłoń A., *Możliwości rolniczego wykorzystania osadów ściekowych z wybranych oczyszczalni województwa podkarpackiego*, [w:] J. Krupa (red.), *Kreowanie przedsiębiorczości w turystyce na terenach wiejskich oraz ochrona środowiska i dziedzictwa kulturowego,* Wydawnictwo ZGTPD, Dynów 2015, s. 137–148.
14. Jensen J.K., Holm P.E., Nejrup J., Larsen M.B., Borggaard O.K., *The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils,* Environmental Pollution, nr 157, 3, 2009, s. 931–937.
15. Karwowska E., *Topole z plantacji jako surowiec energetyczny*, Czysta Energia, nr 2, Poznań 2008, s. 28–31.

16. Kasztelan P., *Energia ze źródeł odnawialnych – potencjalny produkt rolniczy*, Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, nr 13, z. 5, Poznań 2011, s. 31–34.
17. Kołodziej A., *Nowe rośliny energetyczne: miskant olbrzymi (trawa słoniowa)*, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2015.
18. Kołodziej A., *Nowe rośliny energetyczne: perz kępkowy wydłużony*, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2012.
19. Kołodziej A., *Nowe rośliny energetyczne: słonecznik bulwiasty (topinambur)*, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Barzkowice 2013.
20. Kraszkiewicz A., Kachel-Jakubowska M., Szpryngiel M., Niedziółka I., *Ocena właściwości fizycznych dendromasy robinii akacjowej*, Inżynieria Rolnicza, r. 15, nr 6, Kraków 2011, s. 109–115.
21. Kuś J., Faber A., *Produkcja roślinna na cele energetyczne a racjonalne wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej*, Puławy, 2009, s. 61–75.
22. Kwaśniewski D., *Koszty i opłacalność produkcji biomasy z trzyletniej wierzby energetycznej*, Inżynieria Rolnicza, nr 126, 1, Kraków 2011, s. 145–154.
23. Kwaśniewski D., *Modelowe technologie zbioru a koszty produkcji biomasy z trzyletniej wierzby energetycznej,* Inżynieria Rolnicza, nr 129, 4, Kraków 2011, s. 167–176.
24. Labrecque M., Teodorescu T.I., Daigle S., *Effect of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two Salix species*, Plant and Soil, nr 171, 2, 1995, s. 303–316.
25. Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Christou M., *The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe*, Biomass and Bioenergy, nr 25, 4, 2003, s. 335–361.
26. Linderson M.-L., Iritz Z., Lindroth A., *The effect of water availability on stand-level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones*, Biomass and Bioenergy, nr 31, 7, 2007, s. 460–468.
27. Maximising the environmental benefits of Europe's bioenergy potential: *http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2008_10* (dostęp: 05.09.2015).
28. Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T., *Production technology and management of energetic plants with lignified shoots*, International Quaterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes, nr 1, 2012, s. 31–34.
29. Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T., *Technological progress in production, logging and processing of the biomass*, Journal of Civil Engineering, nr 2, 2011, s. 85–92.
30. Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T., *Postęp techniczny w produkcji, pozyskaniu i obróbce biomasy*, [w:] J. Krupa (red.), *Ochrona środowiska w aspekcie zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego Pogórza Dynowskiego*, Wydawnictwo ZGTPD, Dynów 2012, s. 153–160.
31. Niemiec W., Stachowicz F., Trzepieciński T., Jurgilewicz M., *Sanitacja obszarów wiejskich poprzez rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, nr 22, 62, Rzeszów 2015, s. 323–334.
32. Niemiec W., Zdeb M., *Plantacja wierzby energetycznej nawożona osadami ściekowymi*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, nr 30, 60, Rzeszów 2013, s. 67–78.
33. Nord-Larsen T., Sevel L., Raulund-Rasmussen K., *Commercially Grown Short Rotation Coppice Willow in Denmark: Biomass Production and Factors Affecting Production*, BioEnergy Research, nr 8, 1, 2014), s. 325–339.
34. Ociepa-Kubicka A., Pachura P., *Wykorzystanie osadów ściekowych i kompostu na przykładzie miskanta i ślazowca,* Rocznik Ochrona Środowiska, nr 15, Koszalin 2013, s. 2267–2278.

35. Pasterak N., Mrowiec B.M., *Techniczne i ekonomiczne rozwiązania gospodarki osadami w oczyszczalniach komunalnych*, Inżynieria Ekologiczna, nr 43, Lublin 2015, s. 7–14.
36. Perttu K.L., *Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden,* Biomass and Bioenergy, nr 16, 4, 1999, s. 291–297.
37. Przydatność gatunków: *http://www.klimatarolnictwo.pl/biomasa/wykorzystanie/przydatnosc-gatunkow* (dostęp: 15.09.2015).
38. Ray M.J., Brereton N.J.B., Shield I., Karp A. and Murphy R.J., *Variation in Cell Wall Composition and Accessibility in Relation to Biofuel Potential of Short Rotation Coppice Willows*, BioEnergy Research, nr 5, 3, 2012, s. 685–698.
39. Remlein-Starosta D. and Krzymińska J., *Uwarunkowania środowiskowe, produkcyjne i ekonomiczne uprawy roślin na cele energetyczne,* Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, nr 1, Poznań 2013, s. 71–81.
40. Riddell-Black D., *Development of a water industry manual for biosolids use in short rotation forestry*, Biomass and Bioenergy, nr 15, 1, 1998, s. 101–107.
41. Rosikoń K., *Osady ściekowe w nawożeniu wybranych roślin energetycznych*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, nr 17, 2, Częstochowa 2014, s. 339–348.
42. Rubczyński A., Teper A., Małyska P., *Plantacje roślin energetycznych – korzyści dla gospodarki i energetyki*, Czysta Energia, nr 6, Poznań 2013, s. 26–29.
43. Stańczyk K., Ludwik M., *Uprawy roślin energetycznych – możliwości zagospodarowania nieużytków i użytków rolnych, na których produkcja rolnicza jest nieopłacalna,* Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, nr 3, Katowice 2003, s. 53–70.
44. Stolarski M., Tworkowski J., Szczukowski S., Kwiatkowski J., Graban Ł., *Opłacalność i efektywność energetyczna produkcji biomasy ślazowca pensylwańskiego w zależności od stosowanego materiału siewnego*, Fragmenta Agronomica, nr 31, 2, Poznań 2014, s. 96–106.
45. Szejniuk B., Wasilewski P., Budzińska K., *Wpływ kompostu z osadów ściekowych na plonowanie wybranych roślin uprawnych,* Inżynieria Ekologiczna, nr 11, Lublin 2005, s. 188–189.
46. Truu M., Truu J., Heinsoo K., *Changes in soil microbial community under willow coppice: The effect of irrigation with secondary-treated municipal wastewater,* Ecological Engineering, nr 35, 6, 2009, s. 1011–1020.
47. Weng J.-K., Li X., Bonawitz N.D., Chapple C., *Emerging strategies of lignin engineering and degradation for cellulosic biofuel production*, Current Opinion in Biotechnology, nr 19, 2, 2008, s. 166–172.
48. Włodek S., Pawęska K., Biskupski A., Jabłoński W., *Ocena możliwości wykorzystania ścieków do nawodnień roślin energetycznych w wybranych miejscowościach gminy Namysłów,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 02, Kraków 2011, s. 111–119.
49. Włodek S., Pawęska K., Biskupski A., Sikora J., *Uprawa roślin energetycznych ekologicznym kierunkiem rozwoju wsi*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 01, Kraków 2015, s. 145–152.
50. Zajączkowski K., *Robinia akacjowa jako roślina energetyczna*, Wokół Energetyki, nr 10, 2007, s. 30–33.
51. Zub H.W., Brancourt-Hulmel M., *Agronomic and physiological performances of different species of Miscanthus, a major energy crop. A review*, Agronomy for Sustainable Development, nr 30, 2, 2012, s. 201–214.
52. Brodziński Z., Pawlewicz A., *Uwarunkowania organizacji bazy surowcowej do produkcji energii z biomasy,* Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, nr 27, 3, Poznań 2015, s. 62–65.

Literatura uzupełniająca

53. Rośliny energetyczne: *http://www.ekotrasa.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=67:03roliny-energetyczne&catid=34:galeria&Itemid=59* (dostęp: 15.09.2015).
54. Zmiany klimatu: *http://www.zmianyklimatu.pl/* (dostęp: 15.09.2015).

Akty prawne

55. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. z 2015 r., poz. 257).
56. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2013 r., poz. 21).