

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA –
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY W PUŁAWACH



Katarzyna Mizak

**MOŻLIWOŚCI PRODUKCJI WIERZBY WICIOWEJ
(SALIX VIMINALIS L.) NA CELE ENERGETYCZNE
W REJONIE KANAŁU WIEPRZ-KRZNA**

Praca doktorska

Wykonana w Zakładzie Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki

Promotor Prof. dr hab. **Antoni Faber**

PUŁAWY 2009

Spis treści

Wstęp.....	3
Hipoteza.....	5
Cel pracy.....	5
1. Przegląd literatury	6
2. Obszar badań.....	21
3. Materiały i metody	29
4. Wyniki	43
4.1 Ocena warunków glebowych	43
4.2 Ocena warunków przyrodniczych i ograniczenia legislacyjne	48
4.3 Ocena warunków wodnych.....	51
4.4 Ocena warunków drogowych.....	60
4.5 Analiza danych meteorologicznych.....	64
4.6 Analiza użytkowania terenu.....	70
4.7 Plonowanie, obieg węgla i azotu oraz wielkość emisji gazów cieplarnianych	77
5. Dyskusja	92
6. Wnioski.....	100
7. Wykaz piśmiennictwa	101
Spis rysunków	109
Spis fotografii.....	111
Spis tabel.....	111

Wstęp

W Unii Europejskiej Polska postrzegana jest jako jeden z krajów o dużym potencjale i możliwościach produkcji biomasy na cele energetyczne. W jednym z raportów EEA (2006) oszacowano grunty dostępne dla uprawy roślin energetycznych w poszczególnych krajach członkowskich UE, z którego wynika, że w Polsce znajdują się największe dostępne obszary do tego typu upraw. Oszacowano, że dostępne grunty do uprawy roślin na cele energetyczne to 3,8 mln ha w roku 2010 a w roku 2030 będzie to 4,5 mln ha.

Według dyrektywy UE promującej odnawialne źródła energii (OZE), uchwalonej 17 grudnia 2008 r., Polska zobowiązana jest do osiągnięcia 15 % udziału OZE w strukturze energii zużytej w 2020 roku (Directive of the European COM(2008) 30 final). W opracowanej przez rząd w 2002 roku Strategii Rozwoju Energetyki Odnawialnej udział odnawialnych źródeł energii w bilansie energii pierwotnej określony był na poziomie 7,5% w roku 2010 oraz 14% w 2020. W związku z zapisami dyrektywy UE opracowywana obecnie „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” zakłada już udział odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii na poziomie 15% w roku 2020 oraz 20% w roku 2030.

Do zwiększania udziału OZE w bilansie produkcji energii zobowiązują nas także zapisy Protokołu z Kyoto. Polska ratyfikując ten protokół 13 grudnia 2002 roku zobowiązała się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (CO₂, CH₄, N₂O), a tym samym do promowania i wdrażania technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE), w tym biomasy przeznaczonej na cele energetyczne.

Spełnienie powyższych wymagań będzie możliwe pod warunkiem przyspieszonego rozwoju wykorzystania wszystkich rodzajów OZE. Największe jednak znaczenie w osiągnięciu tego celu będzie miało zabezpieczenie produkcji biomasy na cele energetyczne. Stąd też badania potencjału produkcji biomasy oraz działania techniczno-organizacyjne zmierzające do jego wykorzystania mają obecnie wysoki priorytet.

W Polsce w 2007 roku ze źródeł odnawialnych pozyskano jedynie 6,9% ogólnej ilości energii pierwotnej, zatem do 2020 roku udział OZE musi zostać podwojony. W porównaniu do roku 2006 udział OZE wzrósł jedynie o 0,5% (Energia ze źródeł odnawialnych w 2007 r.). Takie tempo wzrostu nie pozwoli osiągnąć prognozy 15% w 2020r.

Wśród odnawialnych źródeł energii największy udział w jej produkcji ma biomasa stała, z której w 2007 roku uzyskano 91,3% energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Według danych GUS (Energia ze źródeł odnawialnych w 2007 r.) kolejne pod względem udziału w produkcji energii są następujące źródła: woda (4,1%), biopaliwa ciekłe (2,2%), biogaz (1,3%) oraz wiatr, energia geotermalna, biodegradowalne odpady komunalne, energia promieniowania słonecznego (ich udział nie przekracza 1%).

Należy jednak pamiętać o podstawowej funkcji rolnictwa jaka jest produkcja żywności i pasz. Dlatego też ważne jest zrównoważone wykorzystanie obszarów rolniczych, tak aby nie doprowadzić do konkurencji pomiędzy energetyką odnawialną i rolnictwem.

Jednym z narzędzi mogących być wykorzystywanym w celu wyznaczenia terenów korzystnych do produkcji biomasy przy jednoczesnym zachowaniu podstawowej funkcji rolnictwa jest System Informacji Geograficznej. Dobrze opracowana baza danych na temat rolniczej przestrzeni produkcyjnej pozwoli na wskazanie najkorzystniejszych terenów do produkcji danej rośliny, przy jednoczesnym zabezpieczeniu gruntów do produkcji żywności i pasz.

Hipoteza

W rejonie Kanału Wieprz-Krzna może być prowadzona produkcja roślin energetycznych, w tym wierzby wiciowej, a istniejące tam grunty orne zbędne do produkcji żywności i pasz, odłogowane i ugorowane stanowią potencjalne obszary dla rozwoju ich upraw. Istniejące bazy danych geograficznych i Systemy Informacji Geograficznej (GIS) umożliwiają wskazanie obszarów korzystnych do uprawy roślin energetycznych.

Cel pracy

Celem pracy jest wyznaczenie terenów korzystnych do uprawy wierzby wiciowej w rejonie Kanału Wieprz-Krzna.

1. Przegląd literatury

Zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE) związane jest ze stałym wzrostem zapotrzebowania na energię, wyczerpywaniem się zasobów paliw konwencjonalnych, ale zwłaszcza ze stosowaniem ich jako sposobu na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Ocenia się, że właśnie duża emisja CO₂ do atmosfery, która związana jest z działalnością człowieka, jest główną przyczyną powodującą ocieplanie się klimatu (IPCC 2000). Inne czynniki przemawiające za wykorzystywaniem odnawialnych źródeł energii to między innymi powstanie nowych miejsc pracy oraz zagospodarowanie gruntów zbędnych do produkcji żywności.

Zgodnie z założeniami Protokołu z Kyoto z 1997 wszystkie kraje powinny dążyć do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (CO₂, CH₄, N₂O). Polska ratyfikując ten Protokół 13 grudnia 2002 roku zobowiązała się do ograniczenia emisji tych gazów o 6% w stosunku do 1988 roku oraz między innymi do promowania i wdrożenia technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii.

Przyjęta przez rząd Strategia Rozwoju Energetyki Odnawialnej (2002) zakłada wzrost odnawialnych źródeł energii w bilansie energii pierwotnej do poziomu 7,5% w roku 2010 i 14% w roku 2020. Obecnie największy udział wśród odnawialnych źródeł ma biomasa w Polsce szacuje się jej udział na poziomie ponad 95%. W 2002 roku udział biomasy w wytwarzaniu energii odnawialnej wynosił 90,5% (Stolarski 2006) i wzrastał w kolejnych latach. W 2007 roku energia pozyskiwana ze źródeł odnawialnych pochodziła w 91,2% z biomasy (Energia ze źródeł odnawialnych w 2007 r.). Kisiel i współpracownicy (2003) udział biomasy wśród odnawialnych źródeł szacują na poziomie 92%. Również w Europie udział biomasy jest wysoki. Przewiduje się, że 70% całości energii odnawialnej w Europie pochodzić będzie z biomasy, której głównym źródłem będą uprawy energetyczne (Łoś 2008 za Dubas). Do upraw tych zaliczane są wszystkie uprawy roślin, których produkcja przeznaczona jest na stałe, płynne lub gazowe surowce energetyczne (Jeżowski 2003). Według definicji Dyrektywy UE (2008) energia ze źródeł odnawialnych jest to energia pochodząca z niekopalnych źródeł, do których zalicza się energię: wiatrową,

słoneczną, geotermiczną, pływów morskich, biomasy, biogazu. W tym samym dokumencie zawarta jest definicja biomasy, która brzmi następująco: „biomasa oznacza ulegająca biodegradacji część produktów, odpadów i pozostałości z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i pokrewnych dziedzin przemysłu, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych i komunalnych”.

Popularność produkcji biomasy na cele energetyczne związane jest między innymi z chęcią przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Podaje się, że produkcja, jak także wykorzystanie biomasy, nie przyczynia się do zwiększania emisji dwutlenku węgla, gdyż rośliny przy spalaniu oddają do atmosfery węgiel, który wcześniej zasymilowały (Gradziuk i in. 2003, Zabrocki, Ignacek 2007) oraz emitują tylko nieznaczne ilości siarki i azotu (Gradziuk i in. 2003). Według Fabera (2008) twierdzenie takie nie jest prawdziwe, gdyż z produkcją roślinną związana jest także emisja gazów cieplarnianych związana między innymi z produkcją i stosowaniem nawozów mineralnych i użyciem sprzętu rolniczego. Crutzen i in. (2008) uważają, że określenie wpływu uprawy roślin na cele energetyczne możliwe jest poprzez wykonanie dla tych upraw analizy cyklu trwania (LCA – Life Cycle Assesment). Analiza LCA uwzględnia wszystkie etapy związane z produkcją roślin energetycznych od produkcji materiału rozmnożeniowego, aż po zagospodarowanie odpadów powstających w procesie produkcji energii.

W związku z obowiązującą od 1 stycznia 2005 roku nową ustawą Prawo Energetyczne wszystkie elektrownie i elektrociepłownie zobowiązane są produkcji części energii ze źródeł odnawialnych, którym może być biomasa. Biorąc pod uwagę również zapisy zawarte w Strategii Rozwoju Energetyki Odnawialnej (2002) oraz Polityce energetycznej Polski do 2030 roku (2009) należy spodziewać się w najbliższym czasie wzrostu zainteresowania uprawami roślin energetycznych. Zgodnie z założeniami tego dokumentu w Polsce powinien nastąpić wzrost odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii do poziomu 15% w 2020 roku oraz do 20% w 2030 roku. W jednej ze swoich publikacji Łoś (2008) podaje, że w Polsce w celu całkowitego zastąpienia paliw kopalnych energią pochodzącą z upraw energetycznych, powinny one zajmować powierzchnie od 20 do 30 milionów hektarów. Jest to więcej niż powierzchnia

wszystkich użytków rolnych w naszym kraju. Odłogi i ugory na gruntach ornych wynosiły w 2007 roku 413 tys. ha, co stanowi 3,5% gruntów ornych w Polsce. W województwie lubelskim 2,3% gruntów ornych to odłogi i ugory (Ochrona środowiska 2008).

Zainteresowanie wierzbą, jako surowcem do produkcji energii, rozpoczęło się w ostatnich kilku dekadach XX wieku. Pierwsze plantacje z nasadzeniami wierzby z przeznaczeniem na cele energetyczne pojawiły się w Szwecji na początku lat 70-tych. Zainteresowanie biomasą jako surowcem energetycznym pojawiło się po kryzysie paliwowym w latach 70-tych (Elowson 1999). Według danych z 2001 roku (Keoleian, Volk 2005 za Verwijst 2001) w Szwecji wierzba z przeznaczeniem na cele energetyczne uprawiana była na powierzchni 17 tys. ha. W celu lepszego wykorzystania i rozwoju modeli dotyczących między innymi plonowania, produkcji energii w połowie lat 80-tych XX wieku założone zostały plantacje wierzby także w Stanach Zjednoczonych. Prowadzono tam liczne prace związane z poznaniem biologii, mechanizmu wzrostu tych roślin oraz możliwością wykorzystania ich jako surowca w energetyce (Keoleian, Volk 2005).

Wśród upraw roślin energetycznych z przeznaczeniem na biomasę najpowszechniejsza jest w Polsce uprawa na plantacjach wieloletnich wierzby (*Salix spp.*). Rodzaj ten obejmuje około 300 gatunków oraz dużą liczbę mieszańców i występuje zarówno jako drzewa i krzewy (Kościk i in. 2003). W uprawach wierzby z przeznaczeniem na cele energetyczne wykorzystywana jest najczęściej wierzba wiciowa (konopianka) (*Salix viminalis*) (Kościk i in. 2003, Szczukowski i in. 2004). Charakteryzuje się ona szybkim przyrostem biomasy, dobrą produktywnością i jakością drewna oraz wysoką mrozoodpornością (Dubas 2006, Szczukowski, Budny 2003, Wróbel 2006). Z badań wynika, że z plantacji szybko rosnącej wierzby uprawianej na gruntach ornych w przeliczeniu na hektar i jeden rok użytkowana możemy uzyskać energię równoważną energii uzyskanej z 11 ton węgla kamiennego (Szczukowski i inni 2000).

Uprawa wierzby na cele energetyczne prowadzona może być na gruntach rolniczych o małej produktywności, gruntach niewykorzystywanych rolniczo, zdegradowanych, odłogowanych oraz podmokłych (van Dam i inni 2007,

Gradziuk i in. 2003, Kisiel i in. 2003; Jasiulewicz 2007, Jasiulewicz, Kiełczewski 2006; Stolarski 2006, Zabrocki, Ignacek 2007, Wróbel 2006).

Zagadnienie wykorzystania biomasy wierzby na cele energetyczne jest w Polsce zagadnieniem stosunkowo nowym. Jedną z pierwszych prac na ten temat była praca Kowalika z 1990 roku. Liczne doświadczenia i prace z tego zakresu w Polsce prowadzone są obecnie na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, w SGGW i IUNG-PIB.

Wierzba energetyczna jest rośliną o dużej tolerancji na warunki klimatyczno-glebowe. Najkorzystniejsze do zakładania plantacji są tereny o uregulowanych stosunkach wodnych, ze średnią roczną sumą opadu atmosferycznego powyżej 550 mm (Szczukowski i in. 2004, Szczukowski, Budny 2003). Na obszarze Polski wartości rocznej sumy opadu wahają się od 500 do 700 mm. Najniższe opady występują w centralnej Polsce w pasie nizin, Wielkopolsce (około 500 mm) i zwiększają się kierunku północnym i południowym. Na Pobrzeżu i Pojezierzach roczna suma opadu dochodzi do 800 mm, zaś na Pogórzu wartość ta przekracza 800 mm (Lorenc 2005). Z analizy rocznych sum opadu atmosferycznego dla Polski wynika, że warunki opadowe korzystne do zakładania plantacji wierzby energetycznej występują na obszarze całego kraju z wyjątkiem województwa wielkopolskiego, kujawsko-pomorskiego i północno-zachodniej części mazowieckiego (Jadczyzyn i in. 2008). Odpowiednia ilość opadów jest szczególnie istotna dla plantacji młodych, tuż po posadzeniu. Brak dostatecznej ilości wody w okresie ukorzeniania się zrzewów wierzby (maj - czerwiec) może powodować słaby rozwój systemu korzeniowego i wypadanie poszczególnych roślin (Dubas 2003). Natomiast niewystarczające opady w okresie maksymalnego przyrostu zielonej masy, tj. od połowy czerwca do sierpnia, może spowodować spadek plonów dochodzący nawet do 50% (Szczukowski, Budny 2003).

Oprócz wody opadowej dla uprawy wierzby ważna jest także ilość wody nagromadzonej w glebie w okresie zimowym oraz poziom zalegania wody gruntowej (Gradziuk i in. 2003, Kościk i in. 2003). Najkorzystniejszy dla wierzby są grunty z poziomem wody gruntowej na głębokości do 2 m oraz gleby dobrze uwilgotnione w okresie od marca do końca października (Faber 2008, Gradziuk i in. 2003, Kościk i in. 2003). Wierzba może także być uprawiana na glebach

okresowo nadmiernie uwilgotnionych, obecnie często wykorzystywanych jako łąki, lub też glebach okresowo zalewanych, gdy woda nie utrzymuje się dłużej niż 10 dni. Należy jednak zaznaczyć, że pod uprawę wierzby wiciowej nie nadają się gleby zabagnione (Dubas 2003, Grabiński i in. 2006, Szczukowski, Budny 2003). Grunty najniższych klas bonitacyjnych (gleby zbyt suche, o niskim potencjale plonotwórczym) także mogą być wykorzystane pod plantacje wierzby pod warunkiem zastosowania odpowiedniego nawożenia i nawodnienia (Szczukowski i in. 2002).

Według Szczukowskiego i Budnego (2003) aby korzenie wierzby mogły swobodnie pobierać składniki pokarmowe poziom wody gruntowej powinien znajdować się na głębokości od 1 do 1,5 m. Dubas (2003) natomiast podaje, że dla uprawy wierzby na cele energetyczne prowadzonej na glebach gliniastych poziom wody gruntowej powinien znajdować się na głębokości od 1,6 do 1,9 m, zaś na glebach piaszczystych głębokość zalegania pierwszego poziomu wody gruntowej może dochodzić do 3 m. W opracowaniu Jadczyzna i in. (2008) przy wyznaczaniu obszarów korzystnych do uprawy wierzby przyjęto poziom wody gruntowej dochodzący do 2 m.

Przeprowadzenie szczegółowych badań warunków hydrologicznych, wielkość opadu, poziom zalegania wód gruntowych, jest bardzo istotne przed założeniem wieloletniej plantacji wierzby. Wierzba charakteryzuje się wysoką intercepcją opadu atmosferycznego, co przyczynia się do zmniejszenia spływu powierzchniowego wód opadowych oraz przesiąkania wody w głąb profilu glebowego. Wymienione wyżej czynniki mogą powodować obniżenie zwierciadła wody podziemnej, nawet o 1m (Faber 2008), co przy ujemnym klimatycznym bilansie wodnym (różnica pomiędzy sumą opadu atmosferycznego i ewapotranspiracją) może być zjawiskiem bardzo niekorzystnym.

Przy zakładaniu plantacji wierzby wiciowej, jak i każdej innej rośliny, ważny jest wybór odpowiedniego stanowiska. Wierzba posiada szeroki zakres tolerancji co do warunków glebowych. Najlepsze plony uzyskuje się na glebach żyznych, bardzo dobrych, jednak ze względu na wysoki potencjał plonotwórczy takich gleb przeznaczone one powinny być do produkcji żywności. Uprawa wierzby może być prowadzona na glebach zaliczanych do następujących klas bonitacyjnych: IIIa, IIIb, IVa, IVb oraz V (Grabiński i in. 2006, Gradziuk

i in. 2003, Szczukowski, Budny 2003, Szczukowski i in. 2004, Wróbel 2006). Pod względem kompleksów przydatności gleb ornych do uprawy wierzby korzystne są grunty następujących kompleksów: 5 – żytni dobry, 8 – zbożowo pastewny mocny, 9 – zbożowo pastewny słaby oraz 3z – kompleks trwałych użytków zielonych bardzo słabych (Jadczyzyn i in. 2008). Według Szczukowskiego i Budnego (2003) uprawa wierzby może być prowadzona także na glebach słabszych, zdegradowanych i nieużytkowanych. Wymagają one jednak przed założeniem plantacji wykonania odpowiednich zabiegów agrotechnicznych.

Odpowiednie dla wierzby wiciowej są zarówno gleby mineralne, jak i gleby organiczne jeżeli są one dostatecznie uwilgotnione oraz gleby torfowe (torfy średnie i głębokie). Dobre plony uzyskuje się również na glebach aluwialnych oraz na madach (Gradziuk i in. 2003, Szczukowski, Budny 2003). Dubas (2003) podaje, że wierzba uprawiana może być na różnych rodzajach gleb (od gleb bielicowych do gleb organicznych). Ważne jest aby gleba miała odpowiednie właściwości, zawartość składników pokarmowych oraz odczyn. Gradziuk i współautorzy (2003) podają za Różanowskim (1993), że optymalny odczyn gleby dla wierzby to pH w granicach 5,5 – 6,5. Podobnie twierdzi Szczukowski i in. (2004), którzy podają, że wierzba toleruje odczyn gleby od kwaśnego do obojętnego (pH 5,5 – 7,0). Odpowiedni dobór klonu wierzby do warunków przyrodniczych: gleba, poziom wód gruntowych, nasłonecznienie, długość okresu wegetacyjnego, ukształtowania terenu pozwala na osiągnięcie wysokich plonów biomasy.

Jednym z głównych celów produkcji energii ze źródeł odnawialnych, nazywanych często czystymi źródłami energii, jest ograniczenie emisji do atmosfery gazów cieplarniowych, głównie CO₂, N₂O i CH₄. Biomasa roślin oprócz tego, że zaliczana jest do surowców odnawialnych jest również określana jako surowiec energetyczny neutralny pod względem emisji dwutlenku węgla (Matthews i Grogan 2001). Oznacza to, że ilość CO₂ powstająca przy spalaniu lub też współspalaniu biomasy jest podobna co ilość CO₂ asymilowanego przez rośliny w okresie wegetacji (Zabrocki, Ignacek 2007). O neutralności emisji CO₂ w przypadku energetycznego wykorzystywania biomasy roślinnej pisze także Volk i in. (2004) za Mann i Spath (1997), Matthews (2001), Heller i inni (2003). Podają oni, że ilość węgla emitowana do środowiska podczas produkcji, zbioru,

transportu i przerobu biomasy jest równa lub też większa od ilości węgla pobranego przez rośliny podczas wzrostu.

Według Börjesson (1996) 70% całkowitej emisji CO₂ uwalnianej podczas produkcji wierzby związane jest z użyciem paliwa potrzebnego do wykonywania zabiegów polowych oraz nawożeniem, a tylko około 1% związane jest z użyciem pestycydów. Transport samochodowy biomasy na odległość 50 km powoduje emisję około 10% całkowitej wielkości emisji CO₂ związanej z całym cyklem produkcyjnym. Zmiana środka transportu z samochodów ciężarowych na transport kolejowy może ograniczyć emisję CO₂ od 40 do 50%, a przy wykorzystaniu transportu rzeczno-żeglownego nawet o 70 – 80%. Przy wykorzystaniu dzisiejszych technologii transportu samochodowego pociętej biomasy wierzby na odległość około 250 km spowodowałyby emisję CO₂ równą wartości emisji związanej z całym cyklem jej produkcji. Dla porównania przy transporcie kolejowym odległość przewozu zwiększa się do 400 km, zaś przy transportach statkami do 900 km.

Istnieją również poglądy, iż produkcja ciepła z biomasy nie jest wcale neutralna pod względem emisji gazów cieplarnianych. Analizując cykl życia gazów cieplarnianych, emitowanych w całym cyklu produkcyjnym energii z biomasy wierzby i miska, następuje jedynie redukcja emisji tych gazów w porównaniu do produkcji energii cieplnej w sposób konwencjonalny (Styles, Jones 2008).

Do głównych gazów cieplarnianych związanych z produkcją roślinną i zwierzęcą zaliczamy: dwutlenek węgla (CO₂), podtlenek azotu (N₂O) oraz metan (CH₄). Na wielkość emisji do atmosfery gazów cieplarnianych z rolnictwa ma wpływ zarówno sposób użytkowania ziemi, rodzaj gleby oraz warunki klimatyczne (Chatskikh, Olesen 2007, Falloon i inni 1998). W doświadczeniach prowadzonych na piaskach gliniastych z uprawą jęczmienia jarego stwierdzono wyraźnie wyższe emisje N₂O na polach z uprawą konwencjonalną w porównaniu do uprawy zredukowanej oraz siewu bezpośredniego. Różnice te występowały zarówno przed uprawą i wzrastały po przeprowadzeniu zabiegów polowych, malały natomiast po zastosowaniu nawożenia (Chatskikh, Olesen 2007). Większe ilości emitowanego N₂O następują po nawożeniu azotem wilgotnych gleb mineralnych oraz bezpośrednio po przeoraniu nawozów organicznych

(Faber 2001, Gielen i inni 1999). Wielkość emisji N_2O zależna jest od warunków meteorologicznych i charakteryzuje się dużą zmiennością w skali Europy. Średnia wielkość emisji N_2O w Europie wynosi $3,2 \text{ kgN}_2\text{O-N /ha/rok}$. Największa emisja z gleb ornych jest w strefie umiarkowanej „Przedalpejskiej” i strefie borealnej ($5,7 \text{ kgN}_2\text{O-N /ha/rok}$), najmniejsza zaś w strefie śródziemnomorskiej ($0,7 \text{ kgN}_2\text{O-N /ha/rok}$) (Faber 2001 za Freibauer i Kaltschmitt 2000).

W kontekście zmian klimatycznych sekwestracja węgla, która umożliwia wiązanie w glebie pewnej ilości węgla zawartej w roślinach jest szczególnie istotna. Poprzez akumulację węgla w glebie następuje zmniejszenie emisji do atmosfery węgla w postaci CO_2 . Proces sekwestracji jest tym bardziej istotny, gdyż to właśnie CO_2 powszechnie uznawane jest za jeden z głównych gazów przyczyniających się do wzrostu temperatury na ziemi (IPCC 2000).

Ważnym zagadnieniem, które wiąże się z uprawą wierzby na plantacjach wieloletnich jest proces sekwestracji węgla. Polega on na przekształceniu węgla, pochodzącego z zasymilowanego przez rośliny CO_2 i znajdującego się w opadających liściach oraz obumarłych korzeniach, w próchnicę. Proces sekwestracji węgla powoduje, że około 20% węgla jest zatrzymywane w postaci względnie trwałej substancji organicznej gleby i nie oddawane jest do atmosfery w postaci CO_2 w procesie oddychania gleby (Faber 2001, Faber 2008, Lal 2007, Matthews i Grogan 2001). Na temat sekwestracji węgla oraz wpływu tego procesu na środowisko powstaje coraz więcej prac naukowych. W Polsce jest to zagadnienie dość nowe, a tym samym literatura z tego zakresu jest dość uboga.

Czynnikami wpływającymi na tempo oraz ilość akumulowanego węgla w glebie są: typ gleby, użytkowanie, warunki klimatyczne oraz produktywność roślin (Matthews i Grogan 2001). Według Grogan i Matthews (2002) gleby z początkową większą zawartością węgla posiadają większy potencjał sekwestracji tego pierwiastka. Podaje się, że aby produkcję danej rośliny i jej energetyczne wykorzystywanie uznać jako neutralną pod względem emisji gazów cieplarnianych niezbędna jest sekwestracja w glebie wielkości co najmniej $0,25 \text{ tC/ha/rok}$ (Volk i in. 2004). W swojej pracy Smith (2004) podaje za Freibauer i inni (2004), że potencjał sekwestracji węgla w glebie wynosi $0,62 \text{ t C/ha/rok}$ dla gruntów z uprawą roślin energetycznych i jest on podobny jak w przypadku TUZ oraz niemal dwukrotnie wyższy od potencjału sekwestracji

gruntów z zerową uprawą. Podobne wartości potencjalnej sekwestracji węgla dla gleb Europy użytkowanych jako łąki (0,6 tC/ha/rok) podaje w swojej pracy Freibauer i współpracownicy (2004). Badania prowadzone w Niemczech nad wierzbą i topolą wykazały, że na plantacjach tych roślin zakładanych na trwałych użytkach zielonych zachodzi przyspieszony proces mineralizacji materii organicznej, przy jednoczesnym spadku zawartości węgla w glebie dochodzącym nawet do 15 % (Jug i inni 1999). Duży potencjał wiązania węgla w glebie związany jest natomiast z przekształceniem gruntu ornego w trwały użytek zielony. Według Freibauera i współpracowników (2004) są to wartości rzędu 1,2-1,6 tC/ha/rok, natomiast przy przekształcaniu gruntu ornego w obszar zalesiony wielkość ta jest dwu-, trzykrotnie mniejsza (0,6 t C/ha/rok).

Innym gazem, zaliczanym do cieplarnianych, emitowanym do atmosfery podczas produkcji biomasy jest N_2O . Pomimo, że jest on uwalniany do atmosfery w mniejszej ilości to jest gazem bardzo szkodliwym, gdyż posiada duży potencjał cieplny (GWP – Global Warming Potential). Crutzen i inni (2008) w swojej pracy podaje za Prather i in. 2001, że jedna cząsteczka N_2O posiada 296 razy większy w okresie 100 lat potencjał cieplny od jednej cząsteczki CO_2 . Jorgensen i inni (1997) w swojej pracy na temat emisji N_2O z upraw roślin energetycznych przytaczają za Callander i inni (1995), że współczynnik potencjału ciepła dla N_2O wynosi 320. Natomiast w opracowaniu na temat gazów cieplarnianych przygotowanym przez Greenhouse Gas Inventory Program w Stanach Zjednoczonych w 2002 roku wartość GWP dla N_2O wynosi 310. Główne źródła emisji tego gazu w rolnictwie związane są mineralizacją azotu organicznego znajdującego się w glebie, resztkach poźniwnych oraz z przemiany nawozów wnoszonych do gleb. Szacuje się, że wielkość emisji N_2O jest to około 1,2% zastosowanej dawki azotu (Faber 2001 za Freibauer, Kaltschmitt 2000 i Janzen i inni 2001; Styles, Jones 2008 za IPCC 2001). Ograniczenie wielkości tej emisji możliwe jest poprzez zwiększenie efektywności nawożenia azotowego przy jednoczesnym zmniejszaniu dawek nawożenia. Pozwala to na ograniczenie wielkości emisji od 20 do 40% dla nawozów mineralnych, od 10 do 20% dla nawozów organicznych oraz od 15 do 25% przy zastosowaniu nowych technologii produkcji (Gielen i inni 1999). Należy jednak pamiętać, że około 25% azotu znajdującego się w jednej dawce nawozowej nie jest przyswajane przez

rośliny. Szacuje się, że około 10% azotu znajdującego się w puli nawozowej przypada na spływ powierzchniowy wód, zaś 15% przetwarzane jest przez bakterie denitryfikacyjne i też jest to azot niedostępny dla roślin (Gielen i inni 1999). Rośliny energetyczne uprawiane na plantacjach wieloletnich posiadają w porównaniu z uprawami tradycyjnymi większy współczynnik wykorzystania azotu. Wartości te wynoszą odpowiednio 0,85 (Nonhebel 2002) i 0,50 (Faber 2008). Zdolność bardziej efektywnego pobierania azotu przyczynia się do zmniejszenia wymywania azotu o około 25 kg/ha/rok z nienawożonych upraw wierzby w stosunku do gruntów ornych intensywnie użytkowanych (Faber 2008 za Makeschin 1994).

Kolejnym gazem przyczyniającym się do procesów ocieplania klimatu jest metan (CH_4). Ma on mniejszy potencjalny współczynnik cieplny niż N_2O , który wynosi 21 (Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values, 2002). Głównym źródłem emisji metanu jest sektor rolniczy. Wysokie emisje związane są z chowem zwierząt oraz przechowywaniem odchodów zwierzęcych. Emisje związane z produkcją roślinną są mniejsze, a duże ilości metanu uwalniane są jedynie przy produkcji ryżu (Faber 2001 za Freibauer, Kaltschmitt 2000).

Oszacowanie wielkości emisji poszczególnych gazów do atmosfery nie jest rzeczą prostą i wymaga przeprowadzenia szeregu pomiarów i analiz. Prostszy sposób określenia wielkości emisji jest wykorzystanie opracowanych już modeli matematycznych. Jednym z takich modeli jest model DNDC (DeNitrification – DeComposition) opracowany na Uniwersytecie w New Hampshire w Stanach Zjednoczonych. Model ten pozwala na przeprowadzenie komputerowych symulacji biogeochemicznego obiegu węgla i azotu w agroekosystemie przy użyciu dobowych danych meteorologicznych. Model ten można wykorzystać także do szacowania wielkości potencjalnych plonów roślin, określania temperatury gleby i wilgotności, dynamiki węgla w glebie oraz wielkości spływu azotu. Model DNDC zawiera również moduły pozwalające na szacowanie wielkości emisji N_2O , NO , NH_3 , CH_4 oraz CO_2 (User's Guide for the DNDC Model 2007).

Model DNDC został użyty do oszacowania wielkości sekwestracji węgla w glebie oraz emisji gazów cieplarnianych w trwałych użytkach zielonych dla Europy przez Levy i inni. (2007). Przeprowadzili oni symulacje dla okresu 20 lat

wykorzystując cyfrowy model terenu o rozdzielczości 50 km na 50 km. Europa została podzielona na 9 stref biogeograficznych i dla każdej strefy określono wielkość nawożenia azotem (kg N/ha/rok), a następnie oszacowano z modelu DNDC wielkość emisji gazów cieplarnianych. Wszystkie wartości podawane przez model są przeliczane i wyrażane w kg ekwiwalentu CO₂/ha użytku zielonego/rok. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że dla obszaru Polski całkowita wartość GWP dla trwałych użytków zielonych z wyłączeniem emisji metanu pochodzącego od zwierząt wynosi -500 kg ekw. CO₂/ha użytku zielonego/rok. Oznacza to, że dla obszarów pokrytych trwałą roślinnością trawiastą nie następuje emisja do atmosfery gazów cieplarnianych, zaś sekwestracja CO₂ wynosi 500 kg/ha (=136 kg C/ha). Inaczej kształtuje się ta wielkość, jeżeli uwzględnimy emisje metanu związaną z produkcją zwierzęcą. W sytuacji tej wielkość ta dla Polski wynosi od 0 do 500 kg ekw.CO₂/ha użytku zielonego/rok.

Wartości emisji gazów cieplarnianych, w tym szczególnie N₂O, mierzone w ciągu 22 lat z gleb intensywnie użytkowanych rolniczo Beheydt i współautorzy (2007) porównali do wartości obliczonych przy pomocy modelu DNDC. Symulacje przeprowadzono dla dwóch typów użytkowania gleb: gruntów ornych oraz użytków zielonych. Zmierzone wartości emisji N₂O mieściły się w przedziale 0,23 – 31,14 kg N₂O-N/ha/rok i był to podobny zakres jak wartości emisji N₂O oszacowane z modelu, które wynosiły 0,5 – 42,6 kg N₂O-N/ha/rok. Na podstawie analizy tych wyników stwierdzono, że głównym czynnikiem zwiększającym wartość emisji N₂O jest wzrost nawożenia azotem. Porównując wielkość emisji tego gazu z gleb różnie użytkowanych stwierdzono dużo większą zgodność wyników w przypadku gleb ornych niż trwałych użytków zielonych. Zarówno wartości uzyskane z modelu jak i z pomiarów rzeczywistych porównano dodatkowo z innymi modelami empirycznymi. Wyniki uzyskane ze wszystkich modeli były porównywalne, jednakże najlepsze rezultaty uzyskano przy modelowaniu wielkości emisji N₂O za pomocą modelu DNDC.

Czynnikami wpływającymi także na przyrost biomasy wierzby jest temperatura, nasłonecznienie oraz długość dnia. Niekorzystne dla wierzby są wczesnowiosenne przymrozki, powodujące czernienie i usychanie młodych pędów (Szcukowski i in. 2004). Nie powoduje to uszkodzenia całych karp,

a jedynie opóźnienie w pojawianiu się kolejnych młodych pędów. Dubas (2003) podaje, że krótkotrwałe przymrozki, nie przekraczające temperatury -10°C nie mają istotnego znaczenia zarówno na wzrost jak i rozwój wierzby.

Uprawa roślin z przeznaczeniem na cele energetyczne prowadzona jest na plantacjach wieloletnich. Według różnych autorów plantacja wierzby, przy prawidłowej agrotechnice, może być prowadzona kilkanaście lat. Gradziuk i współpracownicy (2003) oraz Kościk i współpracownicy (2003) podają za: Macek (1995), Perttu (1992) i Różanowskim (1993), że produkcja na tego typu plantacjach powinna odbywać się przez okres 15 – 20 lat. Natomiast Szczukowski i in. (2004) twierdzi, że żywotność prawidłowo założonej i prowadzonej plantacji wynosi od 20 do 25, a nawet 30 lat (Szczukowski i Budny 2003). Również według Dubasa (2003) całkowity okres użytkowania plantacji wierzby wynosi 27 – 30 lat, w zależności od odmiany i przeznaczenia roślin.

Zbiór wierzby na plantacjach może być prowadzony zarówno w cyklu jednorocznym, jak i dwu oraz trzyletnim (Szczukowski i inni 2000). Dubas (2003) podaje, że w cyklu corocznym pozyskuje się wierzbę gdy jest ona przeznaczona na granulaty opałowy (pelet) oraz zrzesy. W przypadku przeznaczenia biomasy na potrzeby energetyki zawodowej zbiór przeprowadzany powinien być co 2 – 3 lata. Pozyskiwanie surowca rozpoczyna się po około 3 – 5 latach. Przy czym zalecane jest w celu lepszego krzewienia się roślin wycięcie wszystkich pędów po pierwszym roku uprawy.

Plantacje wierzby są zakładane nie tylko w celu wykorzystania biomasy w energetyce, ale również znajdują zastosowanie w ochronie i rekultywacji gleb, wód i cieków wodnych, a nawet powietrza (Gradziuk 2003, Szczukowski i in. 2002). Niektóre gatunki wierzby są tolerancyjne na różnego rodzaju zanieczyszczenia przemysłowe, dlatego też mogą być sadzone w pobliżu zakładów przemysłowych tworząc pasy ochronne. Na zboczach pozbawionych naturalnej pokrywy roślinnej wierzba krzewiasta stanowi ochronę przed procesami erozji. W celu rekultywacji rośliny wierzby krzewiastej sadzone są również na glebach zanieczyszczonych metalami ciężkimi (Szczukowski i in. 2002, Dubas 2003).

Wyznaczenie korzystnych lokalizacji dla plantacji roślin wieloletnich z przeznaczeniem na cele energetyczne wymaga uwzględnienia wielu czynników

środowiskowych oraz ekonomicznych. Dzięki rozwojowi technik informatycznych pozwalających na tworzenie cyfrowych baz danych o środowisku możliwe jest szybkie pozyskiwanie i generowanie informacji o wybranych parametrach środowiskowych. Przykładami takich baz danych są Systemy Informacji Przestrzennej (SIP), System Informacji o Terenie (LIS) oraz Zintegrowany System Informacji o Rolniczej Przestrzeni Produkcyjnej w Polsce (ZSIRPP). Ten ostatni opracowany został w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach przy współpracy z Instytutem Geodezji i Kartografii oraz firmą Geosystems Polska (Jadczyński, Stuczyński 2001).

Prace nad rozwojem systemów informacji o środowisku są nadal rozwijane i stanowią ważny kierunek w badaniach środowiskowych. Przykładem prac wykorzystujących narzędzia GIS mogą być opracowanie wykonane w ostatnich latach w IUNG-PIB dla województwa podlaskiego (Stuczyński red. 2006), czy też gminy Korczyna (Gonet i inni 2005).

Narzędzia GIS przy wykonywaniu analiz środowiskowych zastosował także Fischer wraz ze współpracownikami (2005) przy określaniu warunków metodą stref agro-ekologicznych. Metoda ta używana jest do określania rolniczego potencjału zarówno w skali globalnej, regionalnej jak i krajowej.

Ważnym elementem związanym z zakładaniem plantacji roślin wieloletnich na cele energetyczne jest odpowiedni wybór ich lokalizacja. Aby dokonać dobrego wyboru należy uwzględnić zarówno elementy środowiskowe jak i ekonomiczne. Stworzenie dobrej bazy danych przestrzennych w środowisku Systemów Informacji Geograficznej (GIS) umożliwia stworzenie prostego systemu decyzyjnego przy wyznaczaniu lokalizacji plantacji wierzby energetycznej, a także innych roślin (Panichelli, Gnansounou 2008). System taki umożliwia w krótkim czasie wybranie z bazy danych takich obszarów które spełniają zadane kryteria, jakimi są np. warunki uprawowe dotyczące danej rośliny. GIS można więc scharakteryzować jako narzędzie komputerowe pozwalające wykonać analizy danych geograficznych oraz dokonać ich wizualizacji. System umożliwia także łączenie poszczególnych baz danych i generowanie „dynamicznych i inteligentnych map” pozwalających na szybką i czytelną analizę informacji (BIOSIT 2003). Mając na uwadze tego typu założenia odnośnie możliwości wykorzystania GIS we Włoszech opracowany

został projekt BIOSIT. Głównym celem projektu było opracowanie efektywnej i zrównoważonej strategii dla pozyskiwania biomasy na cele energetyczne. W ramach projektu opracowano algorytmy, które pozwalają na automatyczne analizowanie danych oraz generowanie map na podstawie danych wejściowych do systemu. W projekcie danymi wejściowymi były między innymi: cyfrowe mapy obszaru badań potencjalnych lokalizacji, sieci transportowej, a także dane dotyczące produktywności biomasy (koszty założenia plantacji, koszty produkcji, ilość wytworzonej energii). Jako efekt końcowy projektu otrzymano dane na temat potencjalnych możliwości lokalizacji plantacji roślin energetycznych, ich wielkości oraz kosztów produkcji, a także możliwości ich ograniczania.

Biomasa produkowana w gospodarstwach powinna być wykorzystywana w ich sąsiedztwie. Dlatego ważne jest w przypadku projektów związanych z roślinami bioenergetycznymi przeprowadzenie szczegółowych analiz mających na celu scharakteryzowanie warunków siedliskowych danego obszaru. Mając na uwadze powyższe kryteria od lat 80-tych przy tworzeniu projektów bioenergetycznych wykorzystywane są narzędzia GIS. Jednym z pierwszych był przestrzenny model szacujący potencjalną produkcję biomasy dla szybko rosnących drzew i lasów na Hawajach jako źródło paliw. W ramach projektu opracowano model do szacowania wielkości produkcji biomasy, zbiorów i kosztów transportu. Dane te były dostępne w postaci baz danych w środowisku GIS, przy pomocy którego tworzone były mapy, będące jednocześnie elementem wynikowym systemu (Rozakis i inni 2001 za Liu i inni 1992). Bardziej ambitne prace zostały podjęte podczas próby opracowania polityki bioenergetycznej na poziomie kraju w Wielkiej Brytanii. System ten działa nie tylko na podstawie danych ekonomicznych, ale także uwzględnia w większym stopniu dane o środowisku naturalnym dla potencjalnych źródeł biomasy z roślin energetycznych (Rozakis i inni 2001 za Cole i inni 1996).

Do szacowania potencjalnych możliwości produkcji energii z obszarów rolniczych wykorzystywane są systemy wspomaganie decyzji (DSS – Decision Support System) działające w środowisku GIS. System taki opracowany dla wyspy Kreta analizuje dostępność danego obszaru między innymi ze względu na potencjał technologiczny i ekonomiczny (Voivontas i inni 2001). Dane wprowadzone są do systemu GIS w postaci numerycznej i przechowywane są

w pojedynczych warstwach. Przeprowadzone analizy pozwalają na określenie czterech poziomów potencjałów biomasy: potencjał teoretyczny (szacuje całkowitą produkcję biomasy z rolnictwa i leśnictwa), potencjał dostępny (potencjalna ilość energii zawartej w biomacie i mogącej być wykorzystanej do produkcji energii), potencjał technologiczny (energia mogąca być wyprodukowana i związana w charakterystycznych procesach technologicznych) oraz potencjał ekonomiczny (ilość energii pochodząca z alternatywnych źródeł ekonomicznie opłacalna).

2. Obszar badań

Kanał Wieprz-Krzna jest to jeden z najdłuższych kanałów melioracyjnych w Polsce. Jego długość wynosi 140 km. Prace budowlane przy Kanale rozpoczęto 12 lipca 1954 roku (Łoś 1986). Początek Kanału znajduje się w Borowicy nad Wieprzem, zaś uchodzi on do Krzyny Północnej w Międzyrzecu Podlaskim. Budowa Kanału miała na celu pobranie, zmagazynowanie i rozprowadzenie wody doprowadzonej z Wieprza oraz nawodnienie i użyźnienie łąk na obszarze Polesia Lubelskiego. Rejon Kanału Wieprz-Krzna położony jest w całości w makroregionie Polesie Lubelskie. Część południowa znajduje się w obrębie dwóch mezoregionów: Obniżenie Dorohuskie i Równina (Pojezierze) Łęczyńsko-Włodawska, natomiast część północna położona jest w obrębie Równiny Parczewskiej i Zakłęsłości Łomaskiej (Łoś 1988b, Wilgat 1957).

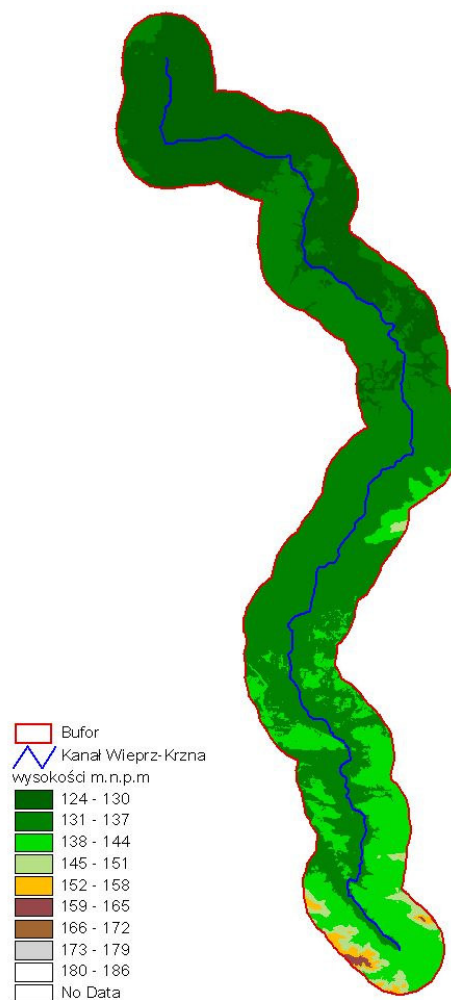
Obszar badań, o powierzchni 1400 km², został wyznaczony jako strefa o szerokości 10 km, której oś stanowi Kanał Wieprz-Krzna. Pod względem geograficznym cały obszar badań znajduje się w obrębie Polesia Lubelskiego, jedynie północno-zachodnie krańce obszaru badań zaliczane są do Wyżyny Lubelskiej (Wilgat 1957), zaś pod względem administracyjnym w całości położony jest w województwie lubelskim. Strefa kanału rozciąga się na powierzchni 9 powiatów i 30 gmin (Rys. 1). Są to: powiat krasnostawski (gminy: Krasnystaw, Łopiennik Górny, Fajslawice), powiat chełmski (gminy: Rejowiec Fabryczny, Siedliszcze), powiat świdnicki (gmina: Trawniki), powiat Łęczyński (gminy: Milejów, Cyców, Łęczna-Miasto, Łęczna-obszar wiejski, Puchaczów, Ludwin), powiat lubartowski (gminy: Ostrów Lubelski, Uścimów), powiat włodawski (gminy: Stary Brus, Wiryki), powiat parczewski (gminy: Sosnowica, Dębowa Kłoda, Podedwórze, Jabłoń, Milanów), powiat radzyński (gminy: Komarówka Podlaska, Wohyń, Kąkolewnica Wschodnia), powiat bialski (gminy: Rossosz, Łomazy, Drelów, Międzyrzec Podlaski-miasto, Międzyrzec Podlaski).

Pod względem hipsometrii teren badań jest mało urozmaicony (Rys. 2). Najwyżej położone tereny znajdują się w południowo-zachodniej części, gdzie wysokości dochodzą do 165 m n.p.m. Jest to związane z występowaniem tam krawędzi Wyżyny Lubelskiej. W części południowej Kanału wysokości wynoszą

od 140 do 145 m n.p.m. Niżej położone są obszary w północnej części, gdzie wysokości nie przekraczają 130 m n.p.m.



Rysunek 1. Obszar badań na tle podział administracyjnego województwa lubelskiego



Rysunek 2. Ukształtowanie powierzchni rejonu Kanału Wieprz-Krzna

Rejon Kanału Wieprz-Krzna jak i całe województwo lubelskie to tereny o charakterze rolniczym. Według danych z Powszechnego Spisu Rolnego (PSR) przeprowadzonego w 2002 roku użytki rolne w województwie lubelskim zajmują 87% powierzchni ogólnej. Z czego niemal 70% stanowią grunty orne a 8,4% ich powierzchni zajmują odłogi i ugory. Województwo lubelskie posiada jeden z większych udziałów % gruntów ornych odłogowanych i ugorowanych w Polsce.

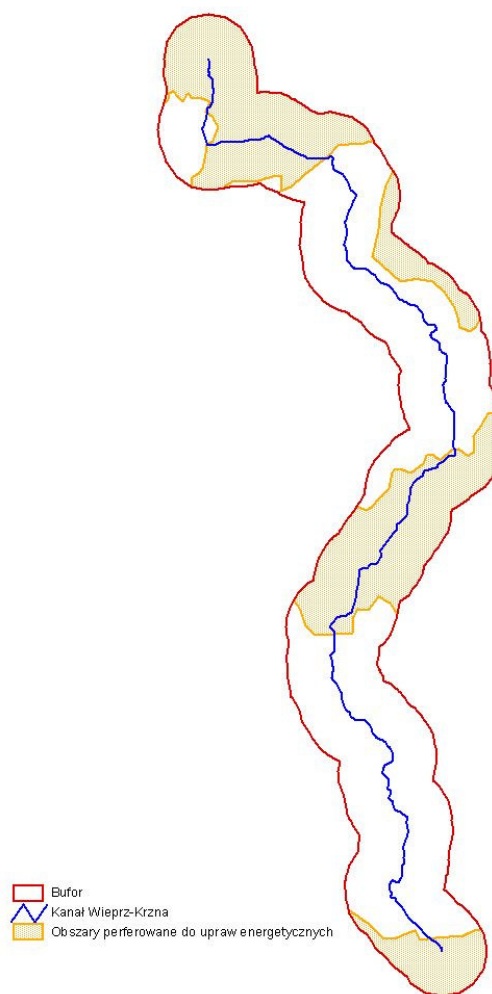
Biuro Planowania Przestrzennego w Lublinie w 2004 roku opublikowało Wojewódzki Program Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego, gdzie wskazuje kierunki rozwoju energetyki wykorzystującej

biomasę. Na terenie całego województwa wyznaczone zostały obszary o dużych i małych wymaganiach glebowych dla rozwoju upraw roślin energetycznych, obszary preferowane do rozwoju upraw energetycznych ze względu na udział ugorów i odłogów, nadwyżki siana oraz nadwyżki słomy (Rys. 3). Raport ten wskazuje także obszary niewskazane do rozwoju energetyki z biomasy ze względu na politykę przestrzenną województwa oraz obszary na których występują ograniczenia prawne w prowadzeniu tego typu działalności. Wszystkie inwestycje mogące negatywnie oddziaływać na środowisko nie mogą być prowadzone na obszarach wchodzących w skład różnych prawnych form ochrony przyrody.

Uwzględniając powyższe przesłanki do badań wybrany został rejon Kanału Wieprz-Krzna, który posiada wysoki odsetek gruntów ornych odłogowanych i ugorowanych w gminach położonych w pobliżu Kanału. Charakterystyka użytkowania terenu w tych gminach wykonana została na podstawie danych pochodzących z Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 r. Wybrane zostały gminy, których ponad połowa powierzchni znajduje się w wyznaczonej strefie badań. Są to: Międzyrzec Podlaski, Drelów, Kąkolewnica Wschodnia, Komarówka Podlaska, Milanów, Jabłoń, Podedwórze, Dębowa Kłoda, Sosnowica, Uścimów, Ludwin, Puchaczów, Milejów, Siedliszcze, Trawniki, Rejowiec Fabryczny oraz Łopiennik Górny.

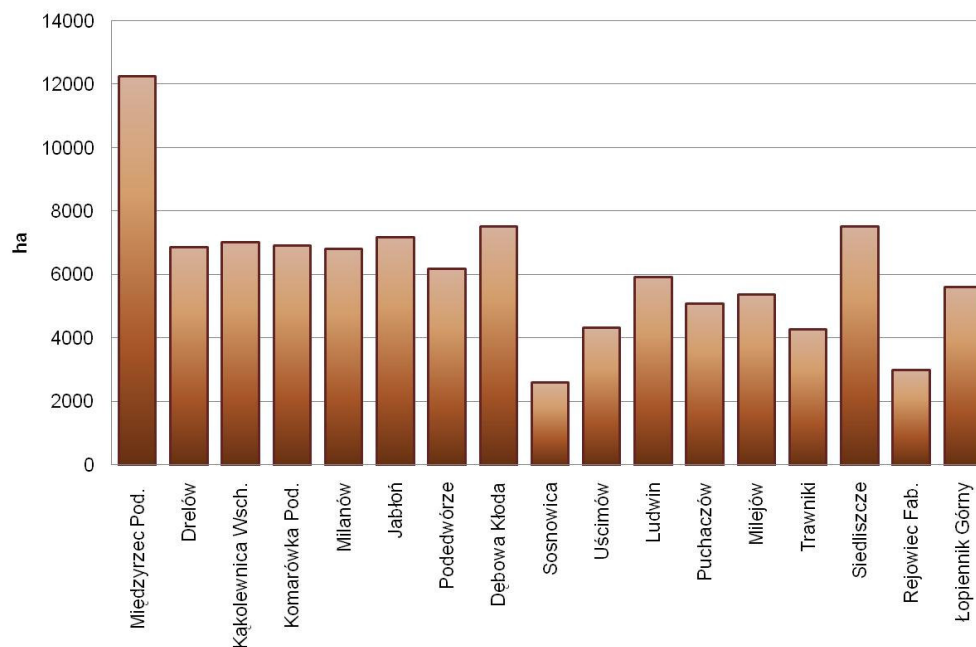
We wszystkich wyżej wymienionych gminach użytki rolne w powierzchni ogólnej zajmują ponad 80% (PSP 2002), jedynie w gminie Sosnowica wartość ta nie przekracza 70%. Mniejszy niż w gminach sąsiednich odsetek użytków rolnych w Sosnowicy jest spowodowany występowaniem na terenie gminy dużej ilości jezior. Najwyższa wartość użytków rolnych, ponad 90% powierzchni, jest natomiast w gminach: Milanów, Puchaczów, Siedliszcze i Łopiennik Górny. Udział gruntów ornych we wszystkich gminach jest wysoki i wynosi średnio ponad 75% (Rys. 4). Najmniejszy odsetek gruntów ornych, nie przekraczający 70%, mają gminy Drelów i Sosnowica. W trzech gminach tego rejonu wartość ta przekracza 80%, są to: Milanów, Trawniki i Łopiennik Górny. Zróżnicowanie w wybranych gminach występuje także pod względem udziału w użytkach rolnych trwałych użytków zielonych (Rys. 5). Najmniejszy odsetek łąk i pastwisk występuje w gminie Łopiennik Górny (9,5%), położonej w południowej części

rejonu badań. Z kolei największy odsetek trwałych użytków zielonych występuje w gminach z małym udziałem gruntów ornych, tj. w gminie Drelów (39%) i Sosnowica (34%).

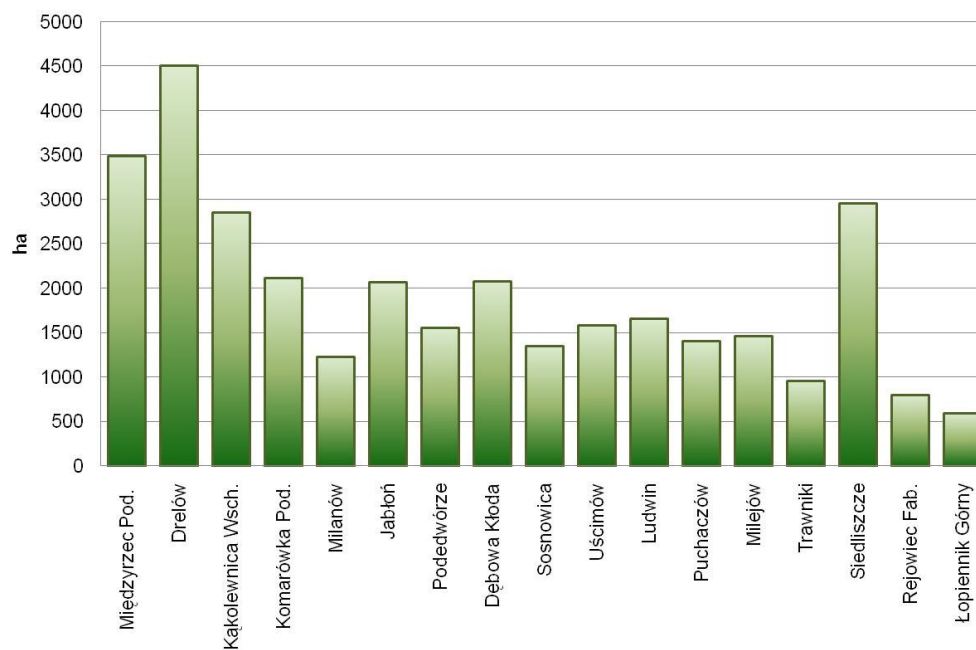


Rysunek 3. Obszary preferowane do rozwoju upraw energetycznych ze względu na udział ugorów i odłogów, ze względu na nadwyżki siana oraz ze względu na nadwyżki słomy

Źródło: Wojewódzki Program Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego. Raport III - Program, 2004, Biuro Planowania Przestrzennego, Lublin

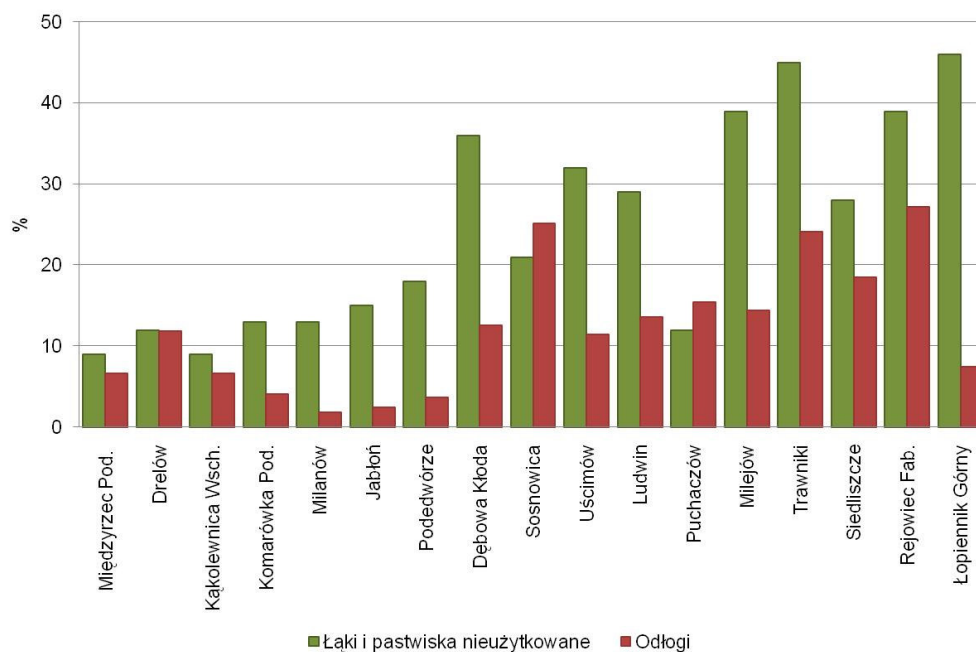


Rysunek 4. Udział gruntów ornych w gminach rejonu Kanału Wieprz-Krzna, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku



Rysunek 5. Udział trwałych użytków zielonych w gminach rejonu Kanału Wieprz-Krzna, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku

Zarówno udział gruntów ornych jak i trwałych użytków zielonych, poza kilkoma wyróżniającymi się gminami, jest równomiernie rozłożony na całym obszarze badań, to wyraźny podział na część południową i północną następuje przy analizie gruntów ornych odłogowanych i ugorowanych oraz trwałych użytkach zielonych nieużytkowanych (Rys. 6). Najmniejszy odsetek gruntów nieużytkowanych jest w części północnej. Odłogi na gruntach ornych nie przekraczają 10%, za wyjątkiem gminy Drelów, gdzie wartość ta wynosi ponad 11%. W gminach tych jest także najmniejszy odsetek nieużytkowanych łąk i pastwisk, który jest większy niż odsetek odłogów i ugorów i dochodzi w gminie Podedwórze do 17,5%. W części środkowej i południowej rejonu badań odsetek gruntów nie wykorzystywanych rolniczo wzrasta. Powierzchnia ugorów i odłogów na gruntach wzrasta w tych rejonach nawet do 25% (Sosnowica) – 27% (Rejowiec Fabryczny), zaś powierzchnia nieużytkowanych łąk i pastwisk dochodzi nawet do 45 % (Trawniki, Łopiennik Górny). Jedynie w gminie Puchaczów odsetek trwałych użytków zielonych nieużytkowanych wynosi zaledwie 12%.

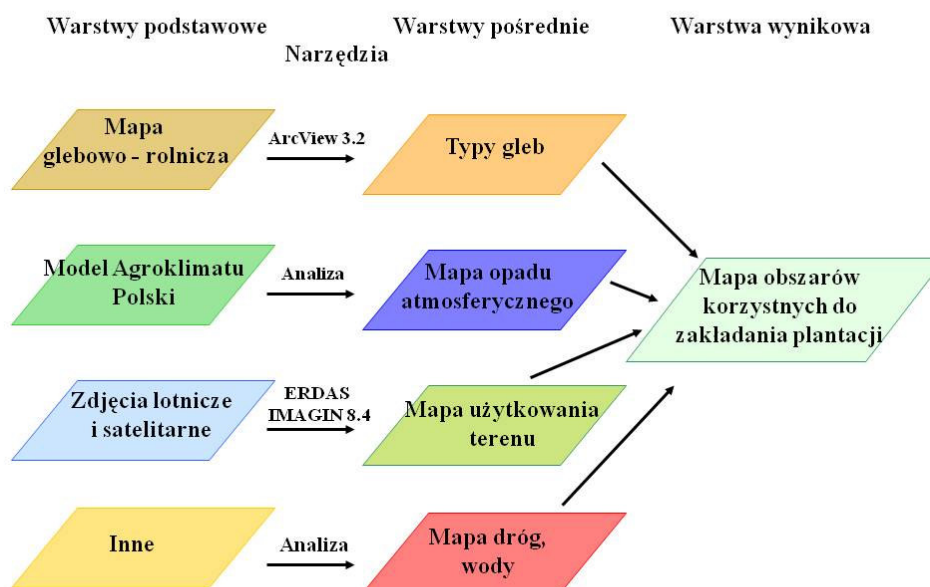


Rysunek 6. Odsetek gruntów ornych odłogowanych oraz odsetek trwałych użytków zielonych nieużytkowanych, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku

Wysoki odsetek gruntów ornych odłogowanych i ugorowanych, jak również duża ilość trwałych użytków zielonych nieużytkowanych pozwala sądzić, że na terenie tych gmin istnieje duża powierzchnia gruntów potencjalnie mogących być wykorzystana pod uprawę roślin energetycznych.

3. Materiały i metody

W celu wydzielenia obszarów korzystnych do uprawy wierzby opracowany został System Informacji Geograficznej (GIS) dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna. System ten został wykonany w środowisku GIS, a jego koncepcja została przedstawiona na rysunku 7. Do systemu wprowadzone zostały dane na temat środowiska rejonu badań, jako tak zwane warstwy początkowe. Warstwy te mogą być jednocześnie także warstwami pośrednimi lub mogą być przekształcane do warstw pośrednich za pomocą użycia różnych narzędzi do wykonania analiz. Tak utworzone warstwy pośrednie poprzez nałożenie ich na siebie dają warstwę końcową, która jest warstwą wynikową, wydzielającą obszary o korzystnych warunkach do uprawy wierzby.



Rysunek 7. Schemat budowy Systemu Informacji Geograficznej dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna

Budowa warstwowa systemu pozwala w prosty sposób na aktualizowanie i dodawanie do systemu kolejnych, nowych warstw. To sprawia, że system ma charakter otwarty, może być ciągle rozbudowywany, przez co warstwa końcowa jest stale uszczegóławiana i aktualizowana. Łączenie ze sobą różnych informacji umożliwia tworzenie nowych warstw, które mogą być zarówno warstwami pośrednimi jak też mogą stanowić warstwę końcową.

Tak stworzony System Informacji Geograficzne dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna pozwala nie tylko na wydzielanie terenów korzystnych do uprawy wierzby, ale może także stać się narzędziem decyzyjnym przy różnego rodzaju inwestycjach prowadzonych w tym rejonie.

Jednym z ważniejszych elementów systemu jest informacja glebowa. Do scharakteryzowania warunków glebowych wykorzystana została mapa glebowo-rolnicza w skali 1:25 000. Mapa ta została opracowana w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w latach 50-tych. Na podstawie badań terenowych określone zostały typy i rodzaje gleb oraz kompleksy przydatności rolniczej gleb i trwałych użytków zielonych. Typy gleb określone zostały według mapy glebowo rolniczej, dlatego też w dalszej części pracy stosowane będzie nazewnictwo gleb występujące na tych mapach.

Na mapie wydzielone zostały także kompleksy przydatności rolniczej gleb, które określają typ siedliska rolniczej przestrzeni produkcyjnej. Przy wyznaczaniu poszczególnych kompleksów uwzględnia się: właściwości gleby, warunki klimatyczne, ukształtowanie terenu, stosunki wilgotnościowe oraz przydatność lub nieprzydatność gleb pod użytki rolne (Zawadzki 1999). Dla trwałych użytków zielonych wydzielone zostały 3 kompleksy przydatności rolniczej:

- 1z - trwałe użytki bardzo dobre
- 2z - trwałe użytki zielone dobre
- 3z - trwałe użytki zielone słabe i bardzo słabe.

Dla gleb ornych wyznaczone zostało 14 kompleksów przydatności rolniczej:

- 1 – kompleks pszenno bardzo dobry
- 2 – kompleks pszenno dobry
- 3 – kompleks pszenno wadliwy
- 4 – kompleks żytni bardzo dobry

- 5 – kompleks żytni dobry
- 6 – kompleks żytni słaby
- 7 – kompleks żytni bardzo słaby
- 8 – kompleks zbożowo pastewny mocny
- 9 – kompleks zbożowo pastewny słaby
- 10 – kompleks pszenno-górski
- 11 – kompleks zbożowo-górski
- 12 – kompleks owsiano-ziemniaczany górski
- 13 – kompleks owsiano-pastewny górski
- 14 – gleby orne przeznaczone pod użytki zielone.

Ponadto na mapach wydzielone zostały lasy, zabudowa, wody, wodne nieużytki oraz nieużytki rolnicze.

Do określenia warunków glebowych rejonu Kanału Wieprz-Krzna wykorzystane zostało 15 arkuszy map glebowo-rolniczych. W celu wykorzystania mapy w środowisku GIS mapy z postaci papierowej zostały przekształcone do postaci cyfrowej. Proces digitalizacji przeprowadzono w programie ArcView 3.2. W projekcie utworzony został nowy temat charakteryzujący warunki glebowe obszaru badań. W rejonie Kanału Wieprz-Krzna utworzonych zostało ponad 12800 poligonów. W programie tym podczas tworzenia warstwy poligonowej automatycznie dodawana jest tabela atrybutów, w której zapisywane są dane dotyczące poszczególnych poligonów, między innymi dotyczące powierzchni, położenia i współrzędnych. Następnie każdy poligon dodatkowo został opisany informacjami znajdującymi się na mapie w wersji analogowej. Do utworzonej już tabeli dodane zostały kolumny opisujące typ gleby, jej rodzaj oraz numer kompleksu. Te informacje zostały wprowadzone ręcznie do systemu. Taki zapis danych umożliwia w bardzo prosty sposób generowanie warstw zawierających wybraną informację. W przypadku danych glebowych utworzone zostały pojedyncze warstwy dotyczące typu gleby, rodzaju oraz warstwa charakteryzująca kompleksy przydatności rolniczej gleb. Zapis danych glebowych w formie tabelarycznej posłużył do przeprowadzenia analiz statystycznych udziału poszczególnych typów, rodzajów i kompleksów gleb w rejonie badań. Taki zapis danych umożliwił wydzielenie obszarów o kompleksach przydatnych do uprawy wierzby.

Ważnym elementem przy lokalizowaniu plantacji wieloletnich wierzby jest poziom zalegania wody gruntowej. Do wyznaczenia korzystnych warunków wodnych w pracy wykorzystana została mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:300 000. Na mapie tej zostało wydzielonych 7 przedziałów głębokości występowania pierwszego poziomu wody gruntowej:

- 1 – poziom zalegania od 0 do 2m
- 2 – poziom zalegania od 2 do 5m
- 3 – poziom zalegania od 2 do 15m (tereny wydmore o urozmaiconej rzeźbie)
- 4 – poziom zalegania od 5 do 10m
- 5 – poziom zalegania od 5 do 20m
- 6 – poziom zalegania od 10 do 20m
- 7 – poziom zalegania powyżej 20m.

Dodatkowo w pierwszej kategorii wydzielone zostały obszary zabagnione. Ponieważ mapa ta została wykonana w postaci cyfrowej warstwa z informacją o pierwszym poziomie zalegania wody gruntowej została od razu wprowadzona do systemu. Dokonane zostało jedynie wycięcie tej mapy do granic obszaru badań.

Kolejnym elementem wprowadzonym do systemu jest Numeryczny Model Terenu (NMT) o rozdzielczości 30m. Dane NMT zapisane są w postaci warstwy danych rastrowych, z której można pozyskać informacje o dowolnym punkcie analizowanego obszaru.

Zgromadzony został materiał kartograficzny w postaci 13 arkuszy map topograficznych w skali 1:50 000. Mapy te zostały skalibrowane do układu „1942” i połączone w jeden blok. Do systemu dodane zostały także warstwy z podziałem administracyjnym na powiaty i gminy.

Kolejnym ważnym elementem systemu jest warstwa charakteryzująca wielkość opadu atmosferycznego. Średnia roczna wielkość opadu została policzona przy użyciu modelu sum opadów atmosferycznych w Polsce będącego częścią Modelu Agroklimatu Polski (MAP) (Górski, Zaliwski 2002). Model oblicza średnie wielkości opadu atmosferycznego za pomocą algorytmów opracowanych na podstawie wieloletnich danych rzeczywistych z około 1400 posterunków opadowych. Jako dane wejściowe do modelu potrzebne są współrzędne geograficzne punktów oraz ich wysokość nad poziom morza.

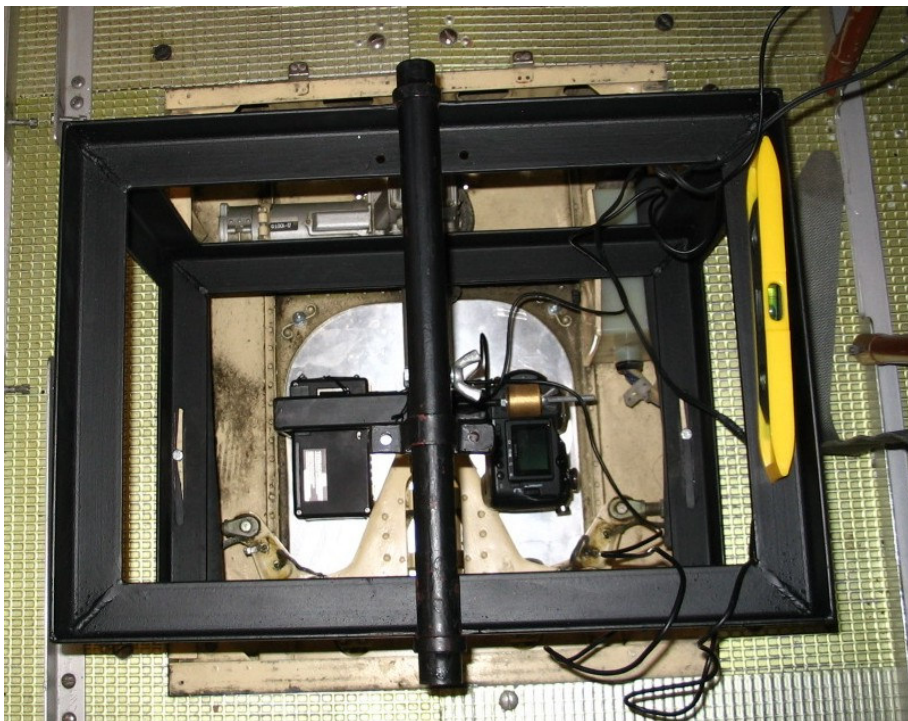
Przy zakładaniu plantacji wierzby należy także uwzględnić obszary chronione. W tym celu wykonana została mapa obszarów chronionych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna. Na podstawie mapy analogowej „Kierunki rozwoju energetyki z biomasy”, opublikowanej w Wojewódzkim Programie Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego (2004), wykonana została mapa cyfrowa obecnych i planowanych różnych form ochrony przyrody (parki narodowe, parki krajobrazowe, obszary chronionego krajobrazu, rezerwaty przyrody, obszary NATURA 2000) w rejonie badań. Mapa ta została wykonana w programie ArcView 3.2 przy użyciu tych samych narzędzi, co w przypadku wykonywania mapy glebowej. Lokalizacja plantacji na obszarach chronionych jest niewskazana.

Dodatkowo na podstawie tej samej mapy analogowej utworzona została w systemie warstwa przedstawiająca tereny korzystne do produkcji biomasy na cele energetyczne. Według raportu na mapie wydzielone zostały obszary preferowane do rozwoju upraw energetycznych: ze względu na udział ugorów i odłogów, ze względu na nadwyżki siana oraz ze względu na nadwyżki słomy. Ponadto na mapie wskazane są obszary o dużych i małych wymaganiach glebowych dla upraw roślin energetycznych. Utworzona w systemie warstwa z terenami korzystnymi nie uwzględnia podziału na jakość warunków glebowych.

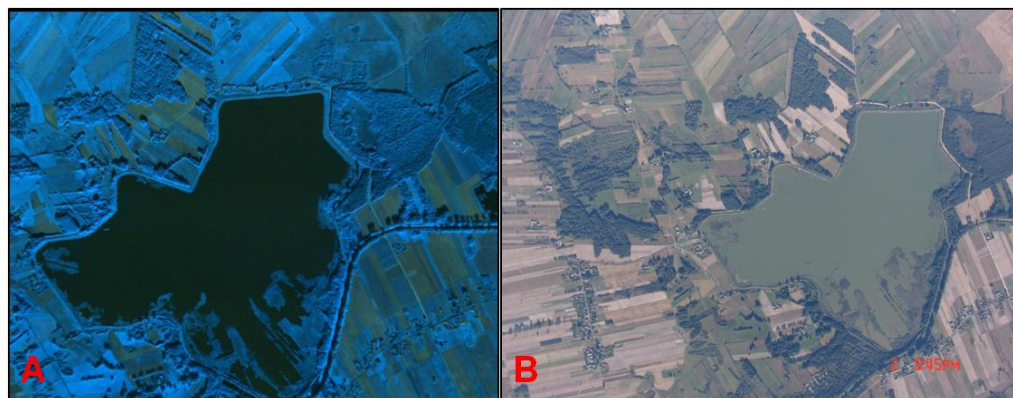
Biomasa jako surowiec energetyczny wykorzystywana jest w gospodarstwie lub jest transportowana do zakładu energetycznego. Dlatego też do projektu dodane zostały tematy z siecią drogową. Jeden z nich zawiera drogi krajowe przechodzące przez rejon Kanału Wieprz-Krzna, drugi zaś zawiera drogi powiatowe.

Kolejnym ważnym elementem systemu jest warstwa charakteryzująca aktualne użytkowanie terenu, powstała na podstawie zdjęć lotniczych. Zdjęcia zostały wykonane w dwóch terminach 30 lipca oraz 2 września 2005 roku. Zdjęcia wykonywano z samolotu AN-2 z wysokości 3000m przy użyciu specjalnie do tego celu skonstruowanej platformy, na której umieszczone były aparaty cyfrowe. Platforma przymocowana była do pokładu samolotu nad znajdującymi się w pokładzie lukami (Rys. 8). Zdjęcia wykonywane były równolegle dwoma aparatami (Rys. 9). Pierwszym był aparat Sony (DSC-F828 8M) o ogniskowej 28mm rejestrującym promieniowanie w trzech kanałach (RGB)

w zakresie widzialnym. Drugim aparatem była kamera ADC (Agriculture Digital Camera) firmy Tetracam o ogniskowej 3.1mm. Kamera ta rejestruje odbicie w trzech kanałach spektralnych: zielonym (Green 520-620 nm), czerwonym (Red 620-750 nm) oraz w bliskiej podczerwieni (NIR 750-950 nm). Z aparatu Sony uzyskano zdjęcia o rozdzielczości około 1m zaś z aparatu ADC o rozdzielczości około 3m.



Rysunek 8. Statyw z zamocowanymi aparatami kamerą ADC Tetracam i Sony DSC – F828

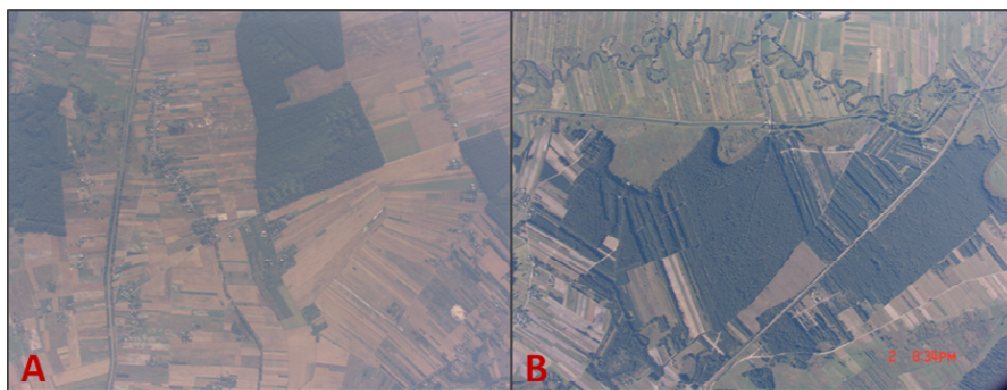


Rysunek 9. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna 2 września 2005 roku. Zdjęcie A wykonane kamerą ADC, zdjęcie B wykonane aparatem Sony

Trasy przelotu zarówno pierwszego jak i drugiego nalotu wytyczone zostały w granicach buforu jako równoległe ścieżki do przebiegu Kanału. Podczas pierwszego nalotu wytyczone zostały 4 ścieżki, a podczas drugiego liczba ta została zredukowana do 3. Zdjęcia wykonywane były jednocześnie dwoma aparatami w równych odstępach czasowych co 20 sekund. Był to czas, który umożliwiał zapisanie zdjęcia w pamięci aparatu.

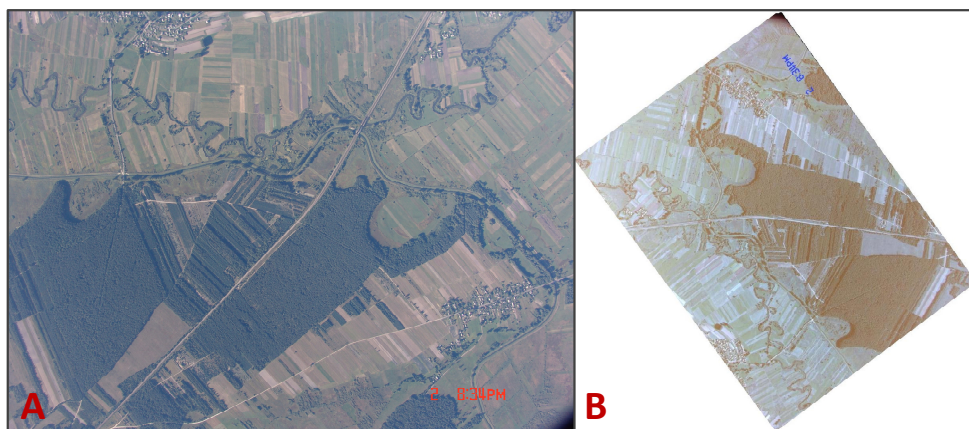
Podczas pierwszego nalotu wykonane zostało 503 zdjęcia aparatem Sony i 429 zdjęć kamerą ADC. W czasie drugiego nalotu otrzymano 389 zdjęć z aparatu Sony i 380 z kamery ADC.

Po dokonaniu wstępnej analizy wizualnej zdjęć okazało się, że zdjęcia wykonane podczas drugiego nalotu posiadają lepszą jakość (Rys. 10). Zdjęcia wykonywane w lipcu były wykonywane w dniu o niskiej przezroczystości powietrza. Podczas lotu zwiększało się także zachmurzenie, co spowodowało, że zdjęcia są mniej wyraźne od tych z drugiego terminu. Po przeanalizowaniu całego materiału podjęta została decyzja, że do dalszych prac związanych z obróbką zdjęć wykorzystany zostanie materiał wykonany we wrześniu.



Rysunek 10. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna. Zdjęcia A wykonane podczas pierwszego nalotu 30 lipca 2005, zdjęcie B wykonane 2 września 2005 roku

W celu dalszych prac nad materiałem fotograficznym wszystkie zdjęcia zostały zapisane w postaci pliku TIFF, a następnie w formacie IMG przy użyciu programu ERDAS IMAGIN 8.4 (ERDAS Field Guid 1998). W programie tym wykonywana była również ortorektyfikacja (korekcja geometryczna) zdjęć lotniczych. Proces korekcji geometrycznej zdjęć wykonany został w oparciu o pomiary punktów kontrolnych GPS, wykonane podczas prac terenowych. Ortorektyfikacja polegała na korekcie zniekształceń obrazu źródłowego spowodowanych deniwelacjami terenu oraz nachyleniem zdjęcia (Rys. 11). Proces zamiany zdjęć z rzutu środkowego na ortogonalny, wykonywany był w programie ERDAS IMAGINE 8.4, przy użyciu funkcji *Image Geometric Correction*. Zdjęcia ortorektyfikowane były na mapy topograficzne 1:50 000, a podstawę stanowiły punkty kontrolne GPS. Błędy RMSE ortorektyfikacji wyniosły średnio 3 piksele (dla rozdzielczości 1m). Błędy powstałe w trakcie tego procesu próbowano usunąć poprzez wprowadzenie dokładnych współrzędnych z map ewidencji gruntów budynków, pozyskanych w Starostwie Powiatowym w Parczewie dla obrębu geodezyjnego Dębowa Kłoda. Na wybranym polu testowym przeprowadzone próbę z nadawaniem współrzędnych z mapy ewidencji gruntów i budynków. Współrzędne nadawano punktom charakterystycznym, łatwym do zlokalizowania na mapie i zdjęciach (skrzyżowania dróg, przecięcia rowów melioracyjnych) i dodawano je ręcznie. Niestety okazało się, że metoda ta nie zlikwidowała powstałych błędów, jedynie nieznacznie je zmniejszyła.

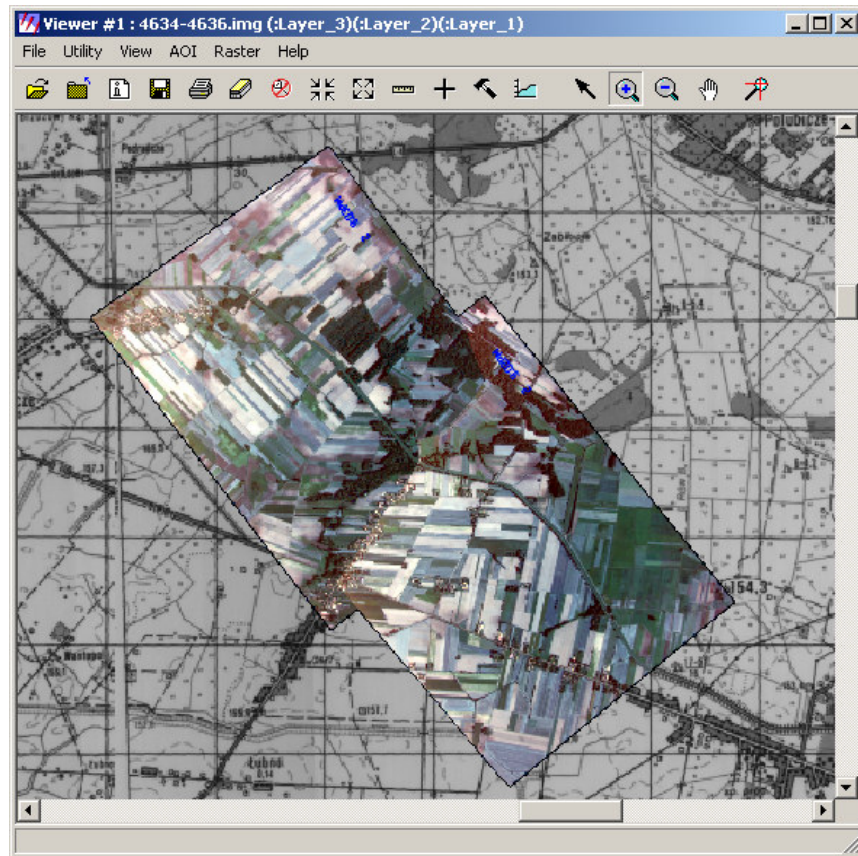


Rysunek 11. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna. Zdjęcie A przed ortorektyfikacją, zdjęcie B po ortorektyfikacji

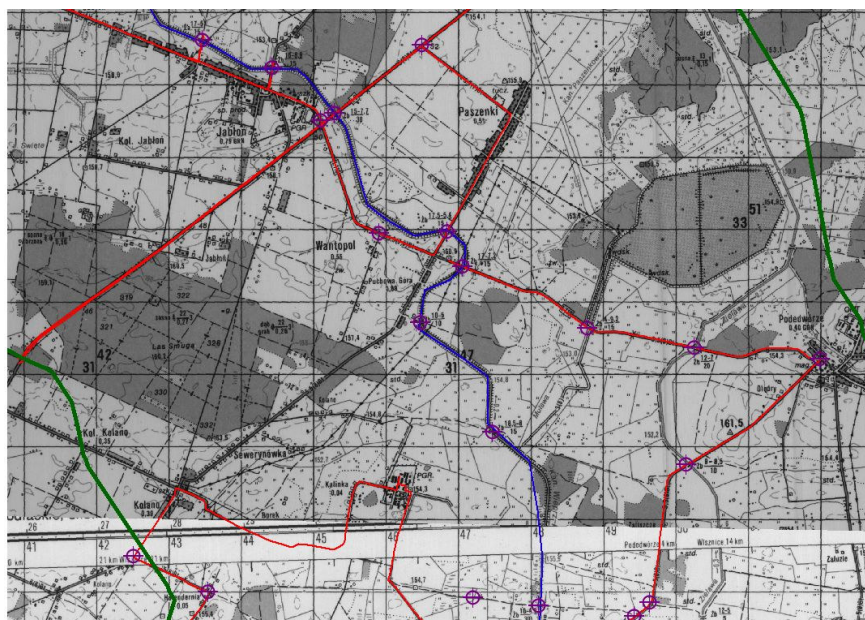
Zortorektyfikowane zdjęcia zostały następnie złączone przy użyciu narzędzia Mosaic Image w programie ERDAS IMAGINE 8.4. W wyniku przeprowadzonych prób okazało się, że najlepsze efekty barwne łączenia kolejnych zdjęć uzyskiwano podczas włączonych funkcji For All Imagines i Band By Band w oknie Matching Options. W przypadku zaś przecinania kolejno zachodzących na siebie zdjęć najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy zastosowaniu opcji Cutline Exist i Cut Only z okna Set Overlap Function (Rys. 12).

Pomiary punktów kontrolnych GPS wykonane zostały podczas prac terenowych prowadzonych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna w okresie od 26 do 29 sierpnia 2005 roku. Wykonano pomiary dla 226 punktów kontrolnych za pomocą odbiornika GERMIN GISMAP 76S. Pomiary były dokonywane w miejscach łatwych do zlokalizowania na zdjęciach lotniczych, najczęściej były to skrzyżowania dróg, mostki na rzekach, kanałach melioracyjnych. Punkty te były położone zarówno wzdłuż Kanału, jak i w samym Kanale. Ułatwieniem przy lokalizacji punktów na zdjęciu były wykonywane podczas pomiarów szkice terenowe. Każdy punkt został opisany za pomocą współrzędnych geograficznych, wysokości nad poziom morza oraz nazwy pomiaru i gminy na terenie którego jest położony. Punkty referencyjne oraz cała trasa przejazdu w rejonie Kanału Wieprz-Krzna zostały następnie naniesione na mapy topograficzne w skali

1:50 000 (Rys. 13). Podczas tych prac zebrana została także bogata dokumentacja fotograficzna obszaru badań. Wszystkie te zdjęcia zostały umieszczone w bazie danych, która liczy ponad 660 fotografii cyfrowych, wykonanych w 35 punktach. Zdjęcia wykonywano w wybranych punktach kontrolnych, tak więc każde zdjęcie ma przyporządkowany numer punktu, co ułatwia jego lokalizację na mapie. Na podstawie tych zdjęć wykonany został opis krajobrazu rejonu Kanału Wieprz-Krzna.



Rysunek 12. Fragment ortofotomapy z podkładem mapy topograficznej 1 : 50 000



Rysunek 13. Fragment mapy topograficznej z zaznaczoną trasą przejazdu oraz punktami kontrolnymi w rejonie badań

Podczas prac terenowych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna wykonane zostały pomiary wielospektralne aparatem ADC. Pomiary wykonano w 10 punktach, dla różnych typów użytkowania terenu w punktach łatwych do lokalizacji na zdjęciach lotniczych. Położenie punktów określone zostało metodą GPS i dodatkowo wykonane zostały szkice terenowe. Łącznie wykonano 42 zdjęcia spektralne dla 5 typów użytkowania gruntów: pastwisko, łąka kośna, ściernisko, nieużytek rolny, pole uprawne. Kamera ADC umieszczona była na przenośnym statywie, obiektywem skierowanym do dołu na wysokości około 2 metrów nad poziomem gruntu. Zakresy spektralne kamery ADC (Red, Green, NIR) są wykorzystywane przy określaniu stanu wegetacji roślin oraz przeprowadzaniu klasyfikacji terenu. Na podstawie analizy zdjęć z kamery ACD obliczone zostały cztery wskaźniki indeksów wegetacji: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), IPVI (Infrared Percentage Vegetation Index) oraz GREEN/RED, wykorzystywane przy klasyfikacji zdjęć wielospektralnych. Indeksy wegetacji uzyskuje się na drodze prostych działań arytmetycznych wykonywanych na wartościach natężenia

odbicia promieniowania w określonych długościach fali. Indeksy wegetacji obliczono na podstawie następujących wzorów:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L)$$

$$IPVI = \frac{NIR}{NIR + RED}$$

$$GREEN/NIR = \frac{GREEN}{NIR}$$

Według tych wzorów policzone zostały indeksy wegetacji dla różnych typów użytkowania terenu, przy użyciu oprogramowania dołączonego do kamery ADC Briv32. Program ten wylicza dla każdego zdjęcia średnia wartość danego wskaźnika, jak też ma możliwość podania wartości indeksu dla wskazanego punktu. Ponieważ zdjęcia obejmowały dany typ użytkowania terenu wykorzystana została tu średnia wartość danego indeksu podanego przez program. Ponadto przed przystąpieniem do obliczania wskaźników przeprowadzona została kalibracja każdego zdjęcia. Wykonywana ona była w oparciu o białą płytkę nie przepuszczającą światła. Kalibracja również dokonywana była automatycznie w programie Briv32.

Dla wyznaczonych terenów korzystnych do uprawy wierzby na cele energetyczne przeprowadzone zostało oszacowanie dla tych obszarów możliwych do uzyskania plonów. Symulacje wielkości plonów wykonano przy użyciu modelu The Denitrification-Decomposition (DNDC) wersja 9.1. Model ten został opracowany przez Institute for the Study of Earth, Oceans and Space na Uniwersytecie w New Hampshire. Prace nad powstaniem tego modelu rozpoczęte zostały w 1989. Model DNDC oprócz szacowania wielkości plonów symuluje obieg węgla w powiązaniu z procesami zachodzącymi w atmosferze i hydrosferze. Model był budowany w oparciu o kompleksowe łączenie interakcji

zachodzących pomiędzy podstawowymi elementami środowiska, takimi jak: klimat, gleba, roślinność, działalność człowieka, czynniki glebowe: temperatura, wilgotność, pH, potencjał oksydoredukcyjny oraz reakcjami biogeochemicznymi, które kontrolują przemianę i transport węgla i azotu w ekosystemie. Model DNDC składa się z kilku sub-modeli służących do określania wzrostu roślin, warunków klimatycznych gleby, dekompozycji, nityfikacji i denityfikacji. Model DNDC został opracowany dla różnych typów ekosystemów (łąki, grunty orne, lasy) oraz dla różnych skali czasowych. Umożliwia on przeprowadzanie analiz dla jednego roku, jak również dla dłuższego okresu, maksymalnie dla 150 lat. Do modelu wprowadzone zostały parametry dla kilkunastu roślin, ale istnieje również możliwość przeprowadzenia analiz dla nowej rośliny, po skalibrowaniu dla niej modelu. Model dla wierzby skalibrowano w IUNG-PIB, na podstawie prowadzonych doświadczeń polowych.

Przy użyciu modelu DNDC możemy wykonać analizy dla punktu oraz dla określonego obszaru. Do wykonania obliczeń w modelu potrzebne są dane meteorologiczne oraz dane geograficzne (szerokość, długość geograficzna, wysokość nad poziom morza) dla punktu lub danego obszaru. Ponieważ nie dysponowałam przestrzennymi danymi meteorologicznymi, wszystkie analizy w modelu DNDC zostały wykonane dla pojedynczego punktu, jakim była stacja meteorologiczna we Włodawie, położona najbliżej obszaru badań. Do analiz wykorzystano wartości dobowe maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza na 2m nad poziomem gruntu oraz sumy opadu atmosferycznego z lat 1998 – 2007. Dane te zostały zakupione w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Wykonując symulacje za pomocą modelu DNDC przyjęto pewne założenia dotyczące plantacji wierzby wiciowej. Długość trwania plantacji został określony na 10 lat, a cykl zbiorów przyjęto jako coroczny i wykonywany pod koniec października. Uprawa gleby została ograniczona tylko do płytkiego kultywatorowania (do 5 cm) na początku kwietnia i na ten sam termin zaplanowano nawożenie NH_4NO_3 w jednej dawce. Przyjęto, że w przypadku każdej gleby znajduje się w niej 60 kg azotu mineralnego. Dodatkowo zastosowano nawożenie azotem w czystym składniku w dwu różnych dawkach, 75 kg N/ha/rok oraz 115 kg N/ha/rok. Modelowanie przeprowadzone zostało więc

dla tych dwóch przypadków. Wielkość dawek nawożenia została ustalona na podstawie literatury. Według zaleceń podawanych przez Grabiński i inni (2006) wielkość nawożenia azotem w pierwszym roku uprawy powinna wynosić od 20 do 30 kg, zaś w kolejnych latach zalecane są wyższe dawki od 80 do 90 kg.

Na podstawie modelu DNDC w pracy została oszacowana wielkość plonów wierzby dla różnych rodzajów gleb występujących najpowszechniej w rejonie Kanału Wieprz-Krzna. Obliczenia wykonano dla następujących rodzajów gleb: piasek gliniasty, zajmujący największą powierzchnię ponad 190 km²; pyły zwykłe, o powierzchni ponad 170 km² oraz gliny lekkiej o powierzchni około 20 km². Dla tych gleb przyjęto następujące wielkości zawartości substancji organicznej (SOC): 0,01; 0,025; 0,015. Wszystkie analizy wykonywano dla pH gleby równego 6. Ponadto wykonane zostały obliczenia dotyczące obiegu węgla i azotu na plantacji wierzby oraz wielkości emisji gazów cieplarnianych.

4. Wyniki

4.1 Ocena warunków glebowych

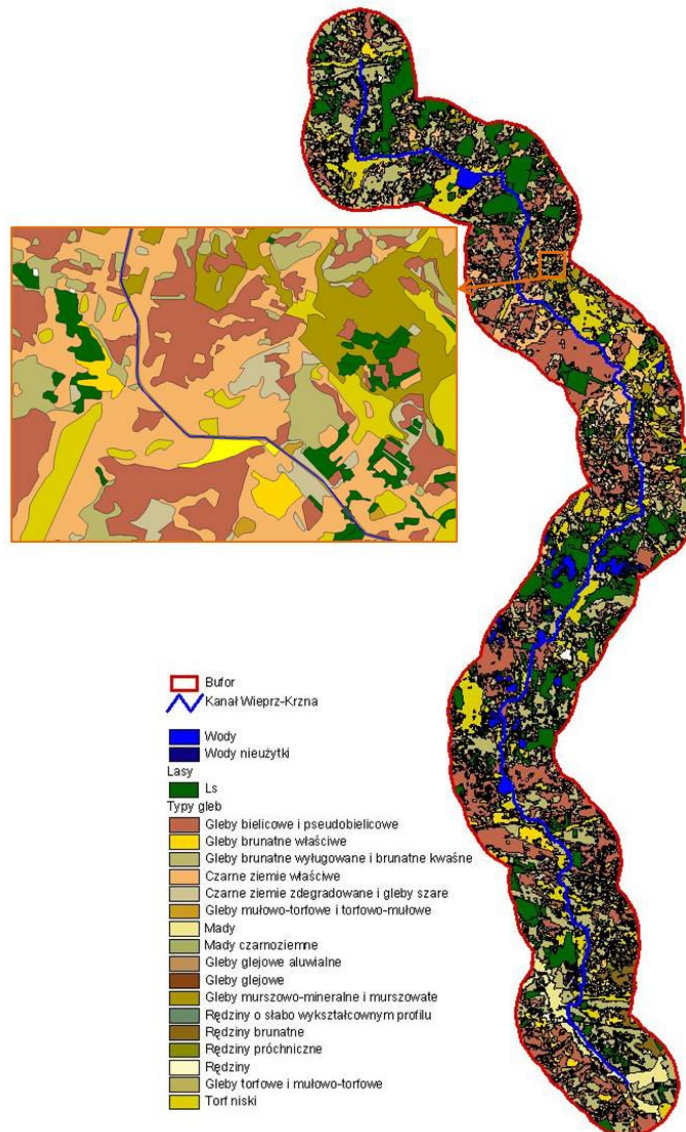
Ocena warunków glebowych wykonana została na podstawie mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000. Na podstawie cyfrowej mapy glebowej wykonane zostały obliczenia powierzchni zajmowanych przez poszczególne typy, rodzaje i kompleksy gleb.

Pokrywa glebowa rejonu Kanału Wieprz-Krzna jest urozmaicona, występują tu gleby zaliczane do różnych typów, rodzajów czy kompleksów przydatności rolniczej. Przestrzenne rozmieszczenie poszczególnych typów przedstawia rysunek 14, zaś kompleksów rysunek 15.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy największy udział w rejonie Kanału Wieprz-Krzna mają gleby brunatne wylugowane i gleby biellicowe i pseudobiellicowe, zajmujące po około 24% obszaru badań. Przeważająca część gleb brunatnych wytworzona została z piasków słabogliniastych (35%) i gliniastych lekkich (34%). Natomiast gleby typu biellicowego najczęściej w swoim podłożu zawierają pył zwykły (44%) oraz piasek gliniasty lekki (11%). Powierzchnie powyżej 10% obszaru badań stanowią gleby torfowe i mułowo torfowe, zaliczane do torfów niskich (12%) oraz czarne ziemie właściwe (10%), położone w większości na pyłach zwykłych (37%).

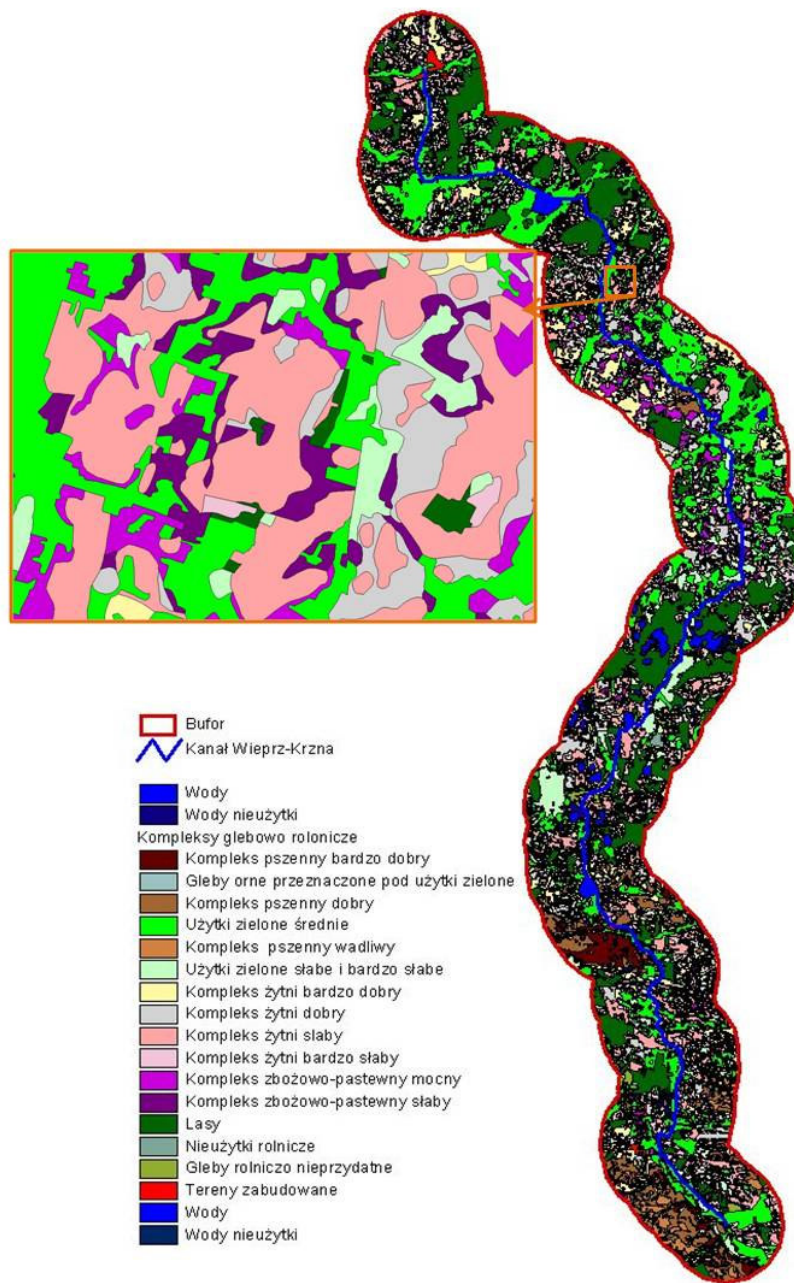
Gleby rejonu Kanału Wieprz-Krzna zaliczane są do dziewięciu kompleksów przydatności rolniczej gleb ornych oraz dwóch kompleksów trwałych użytków zielonych (Rys. 15). Największy udział wśród gruntów ornych mają kompleksy żytnie, od 4 do 7, zajmujące około 2/3 powierzchni wszystkich gruntów ornych. Kompleksy żytni dobry (5) i żytni słaby (6) mają największy udział, po około 24%, wśród wszystkich kompleksów. Grunty orne zaliczane do najlepszych kompleksów: pszenney bardzo dobry (1), pszenney dobry (2) oraz pszenney wadliwy (3) w rejonie Kanału Wieprz-Krzna stanowią łącznie niecałe 15% gruntów ornych. Gleby zaliczane do kompleksów zbożowo-pastewnego-mocnego (8) i zbożowo-pastewnego słabego (9) zajmują razem ponad 11% powierzchni wszystkich gruntów ornych.

Gleby kompleksów najlepszych położone są głównie w południowo-zachodniej części obszaru badań. Występowanie na tym obszarze dobrych gleb związane jest z położeniem geograficznym. Następuje tu przejście pomiędzy Wyżyną Lubelską a Polesiem Lubelskim, a co się z tym wiąże następuje zmiana skał macierzystych gleb. Gleby kompleksów żytnich: bardzo dobrego, dobrego, słabego i bardzo słabego znajdują się na całym obszarze badań. Kompleksy gleb ornych zbożowo-pastewnych mocnych i słabych występują przeważnie w części środkowej rejonu Kanału Wieprz-Krzna.



Rysunek 14. Typy gleb w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

Źródło: Mapa glebowo-rolnicza w skali 1 25 000, IUNG-PIB



Rysunek 15. Kompleksy glebowo rolnicze gleb ornych i trwałych użytków zielonych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

Źródło: mapa glebowo rolniczej w skali 1:25 000, IUNG-PIB.

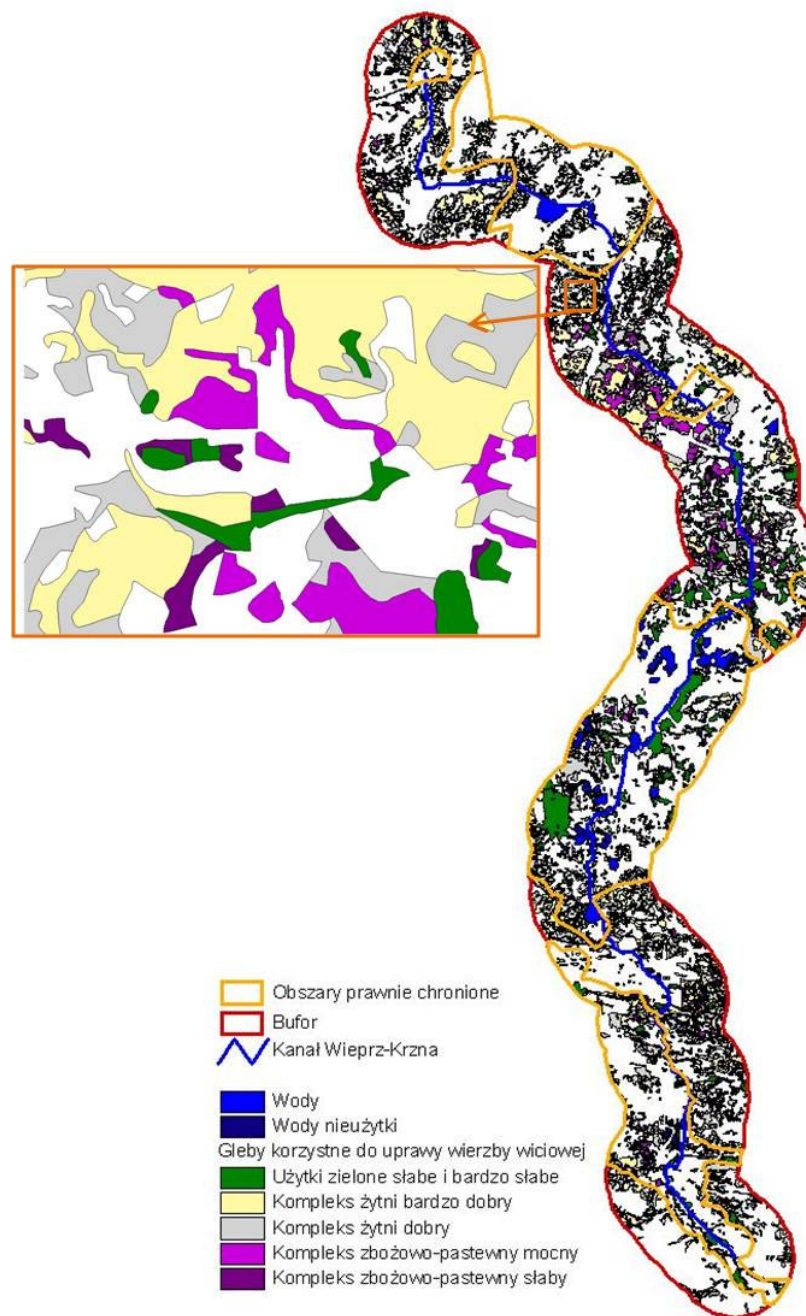
Trwałe użytki zielone według mapy glebowo-rolniczej zajmują około 30% powierzchni. W rejonie badań brak jest użytków zielonych bardzo dobrych i dobrych, natomiast trwałe użytki zielone słabe i bardzo słabe (3z) stanowią niecałe 30%. Pozostałe łąki i pastwiska zaliczone są do kompleksu użytków zielonych średnich (2z).

Większość użytków zielonych zlokalizowanych jest w części północnej rejonu Kanału Wieprz-Krzna. W części południowej udział łąk i pastwisk jest mniejszy i nie stanowią one dużych zwartych kompleksów. Tereny te zaliczane są do użytków zielonych średnich. Trwałe użytki zielone zaliczane do kompleksu słabego i bardzo słabego występują w większości w części środkowej Kanału.

Na podstawie zebranych danych literaturowych określone zostały wymagania glebowe dla uprawy wierzby wiciowej. Korzystne do uprawy wierzby na cele energetyczne są gleby zaliczane do stepujących kompleksów glebowych: żytni bardzo dobry (4), żytni dobry (5), zbożowo-pastewny mocny (8), zbożowo-pastewny słaby (9) oraz kompleks trwałych użytków zielonych słabych i bardzo słabych (3z). Pod produkcję roślin energetycznych na plantacjach wieloletnich wykluczone zostały grunty najlepsze, które powinny być przeznaczone pod produkcję żywności. W rejonie Kanału Wieprz-Krzna grunty korzystne zajmują powierzchnię 49000 ha, co stanowi 35% ogólnej powierzchni rejonu Kanału Wieprz-Krzna. Ponieważ z analiz wyłączone są tereny prawnie chronione, dlatego też potencjalna powierzchnia gruntów korzystnych do uprawy wierzby zmniejsza się niemal o połowę do 25800 ha. Stanowi to 18% powierzchni obszaru badań.

Wśród kompleksów korzystnych dla produkcji wierzby największą powierzchnię zajmuje kompleks żytni dobry (5) (10800 ha) oraz żytni bardzo dobry (4) (8200 ha). Najmniejszą powierzchnię wśród gruntów korzystnych (450 ha) mają trwałe użytki zielone zaliczane do kompleksu 3z – użytki zielone słabe i bardzo słabe. Pozostałe grunty o korzystnych warunkach glebowych (6300 ha) zaliczane są do kompleksów zbożowo-pastewnego mocnego i zbożowo-pastewnego słabego.

Potencjalne obszary z korzystnymi warunkami glebowymi dla uprawy wierzby energetycznej znajdują się w części północnej i południowo-wschodniej obszaru badań (Rys. 16).



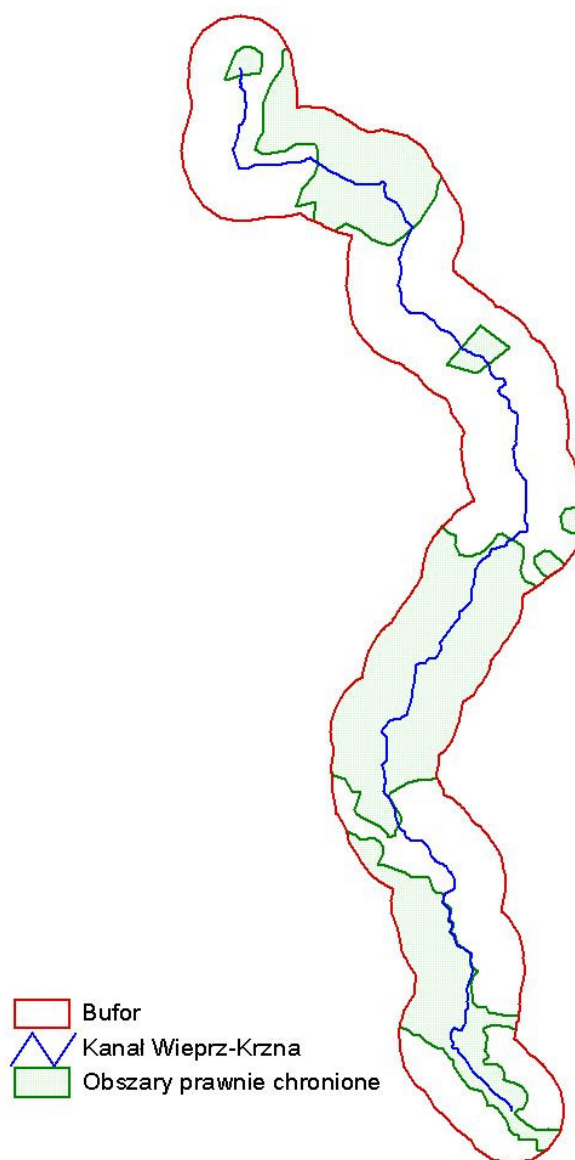
Rysunek 16. Obszary o korzystnych warunkach glebowych do uprawy wierzby wiciowej

4.2 Ocena warunków przyrodniczych i ograniczenia legislacyjne

Ze względu na bogate walory krajobrazowe tego terenu w gminach położonych w obrębie badań występują liczne formy ochrony przyrody. Należą do nich: Biański Obszar Chronionego Krajobrazu, Rezerwat Przyrody Starorzecze Krzny, lasy chronione w rejonie Rezerwatu Liski, korytarz ekologiczny Doliny Krzny (gm. Międzyrzec Podlaski), rezerwaty leśne (gm. Drelów),– Pawłowski Obszar Chronionego Krajobrazu (gm. Rejowiec Fabryczny),– Pawłowski Obszar Chronionego Krajobrazu, użytki ekologiczne z ochroną torfowisk (gm. Siedliszcze), Park Krajobrazowy Pojezierze Łęczyńskie (gm. Uścimów), Poleski Park Narodowy, Park Krajobrazowy Pojezierze Łęczyńskie (gm. Ludwin),– Nadwieprzański Park Krajobrazowy (gm. Milejów), Poleski Park Narodowy, Poleski Park Krajobrazowy, Poleski Obszar Chronionego Krajobrazu (gm. Sosnowica). Dodatkowo w rejonie badań istnieje duża ilość obszarów wchodzących w skład sieci NATURA 2000. Są to zarówno obszary specjalnej ochrony ptaków (OSO), jak i specjalne obszary ochrony siedlisk (SOO). Niektóre z tych obszarów utworzone są w obrębie już istniejących form ochrony.

Na mapie obszarów chronionych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna (Rys. 17) zaznaczone zostały wszystkie obszary objęte ochroną prawną wraz z terenami wchodzącymi w skład otuliny parków narodowych i krajobrazowych.

Zgodnie z ustawą o ochronie przyrody z dnia 16 kwietnia 2004 roku (Dz. U. nr 92 poz. 880) na obszarach objętych ochroną zabrania się między innymi: dokonywania zmian stosunków wodnych (art. 15 ust. 1 pkt 7, art. 17 ust. 1 pkt 6, art. 24 ust. 1 pkt 6), niszczenie gleby lub zmiany przeznaczenia i użytkowania gruntów (art. 15 ust. 1 pkt 9), wprowadzania gatunków roślin bez zgody ministra właściwego do spraw środowiska (art. 15 ust. 1 pkt 25), realizacji przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (art. 17 ust. 1 pkt 1, art. 24 ust. 1 pkt 2).



Rysunek 17. Obszary prawnie chronione w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

Źródło: Wojewódzki Program Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego. Raport III - Program, 2004, Biuro Planowania Przestrzennego, Lublin

Ograniczenia wynikające z Ustawy o ochronie przyrody spowodowały wyłączenie z analiz obszarów prawnie chronionych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna. Obszary te zajmują powierzchnię 59 tys. ha, co stanowi 42% całego obszaru badań.

Tereny chronione przeważają w części południowej rejonu badań. Duży udział ma tu Poleski Park Narodowy oraz Poleski Park Krajobrazowy znajdujące się na terenie Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego. Te formy ochrony zostały utworzone między innymi ze względu na występujące tu licznie jeziora, które dodatkowo podlegają ochronie jako obszary NATURA 2000.

4.3 Ocena warunków wodnych

Oś terenu badań stanowi Kanał Wieprz-Krzna, który wypływa z Wieprza i uchodzi do Krzyny Północnej. Kanał, który według planów miał stanowić ważny element systemu melioracji Polesia Lubelskiego nie spełnia już obecnie swoich funkcji. Na wielu odcinkach Kanał jest suchy (Fot. 1, 2), a cała infrastruktura wokół Kanału jest zniszczona i wymaga wielu prac naprawczych i konserwacyjnych. Jedynie w części południowej, w niedalekiej odległości od początku Kanału, istnieją dobrze utrzymane obiekty infrastruktury oraz sam Kanał (Fot. 3, 4). Na odcinku południowym Kanał Wieprz-Krzna jest przez cały rok wypełniony wodą. Na niektórych jego odcinkach w czasie wiosennych roztopów lub ulewnych deszczy tworzą się rozległe rozlewiska u podnóża wałów przeprowadzonych wzdłuż Kanału. Jak wynika z relacji okolicznych mieszkańców sytuacja taka ma miejsce od początku powstania Kanału (rozlewisko w okolicy wsi Wola Bielecka, fot. 5). W części północnej Kanał jest bardziej zaniedbany i zniszczony, koryto jest suche, porośnięte roślinnością trawiastą (Fot. 6, 7). Z powodu licznych zaniedbań związanych zarówno z infrastrukturą, jak również z utrzymaniem samego cieku, Kanał nie spełnia swojej pierwotnej funkcji jaką było nawodnienie obszaru Polesia Lubelskiego.



Fotografia 1. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Żelizna i Kresy, część północna



Fotografia 2. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Paszenki, część północna



Fotografia 3. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Borowica, początek Kanału, część południowa



Fotografia 4. Początek Kanału wieprz-Krzna w Borowicy, część południowa



Fotografia 5. Rozlewisko za wałem Kanału Wieprz-Krzna w okolicach wsi Wola Bielecka, część południowa



Fotografia 6. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Żelizna, część północna



Fotografia 7. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Pachole, część północna

Wody powierzchniowe zostały scharakteryzowane na podstawie map topograficznych w skali 1:50 000 (Rys. 18). W obrębie Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego w rejonie Kanału Wieprz-Krzna występują liczne jeziora. Do większych zalicza się: Dratów, Rogózno, Łukcze, Krasne-Krzczeń, Krasne, Staw Morawczyński, Zagłębocze, Uścimowiec, Maśluchowskie, Tomasznie, Skomielno, Czarne, Bialskie, Białe, Staw Hetman, Staw Anielski. Jeziora te oraz pozostałe zbiorniki wodne zajmują powierzchnie ponad 3070 ha, co stanowi nieco ponad 2% całego obszaru badań.

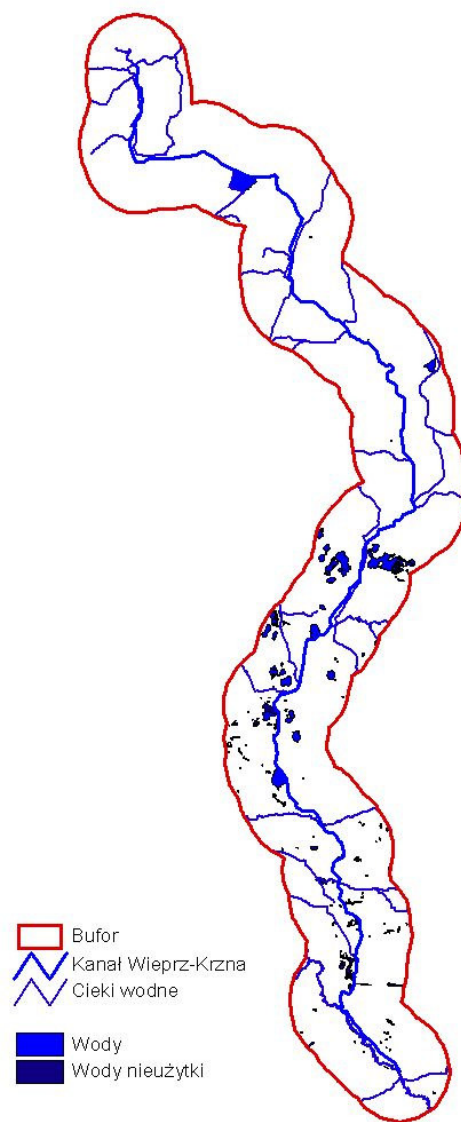
Większość cieków znajdujących się w rejonie Kanału Wieprz-Krzna należy do zlewni rzeki Wieprz. Jedynie cieki północnej części zaliczane są do zlewni rzeki Bug.

Największą rzeką w rejonie Kanału Wieprz-Krzna jest Wieprz, od której Kanał bierze swój początek. Koryto Kanału biegnie równoległe do Wieprza do miejscowości Trawniki. Następnie koryto Kanału zostało poprowadzone w kierunku północnym, zaś rzeka Wieprz dalej płynie licznymi meandrami i zakręca w kierunku północno-zachodnim. Na wysokości miejscowości Chojno Nowe Wieprz opuszcza obszar badań i płynie dalej wzdłuż granicy buforu.

Kolejną rzeką znajdującą się również w północnej części rejonu badań jest Świnka. Płyne ona ze wschodu na zachód i przecina się z Kanałem Wieprz-Krzna w miejscowości Brzeziny, znajdującej się na południowy-wschód od Puchaczowa. Rzeka Świnka wpada do Wieprza w miejscowości Łączna, która znajduje się tuż za granicą terenu badań.

Duży system rzeczny tworzy w środkowej części Kanału Piwonia, która jest prawostronnym dopływem Tyśmienicy. Piwonia swoje źródła ma poza obszarem badań w okolicach Jeziora Uściwierz i do miejscowości Komarówka płynie jako dwa ciek Piwonia Dolna oraz Piwonia Górna. Po połączeniu się w jeden ciek Piwonia płynie równoległe do Kanału Wieprz-Krzna, a w miejscowości Bohutyn przecina trasę Kanału i płynąc w kierunku północno-zachodnim opuszcza teren badań.

Zielawa jest prawostronnym dopływem Krzny i płynie w północnej części Kanału. Na teren badań wpływa poniżej miejscowości Hołowno i płynie w kierunku północnym, przy prawej granicy obszaru badań. Na wysokości miejscowości Jabłoń Zielawa opuszcza teren badań i płynie w kierunku północno-wschodnim.



Rysunek 18. Cieki wodne w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

Kolejną większą rzeką przepływającą przez północną część terenu badań jest Krzna. Płyynie ona z zachodu na wschód. Do miejscowości Międzyrzec Podlaski płynie jako Krzna Północna i łączy się z mniejszym ciekim Krzną Południową płynąc dalej na wschód jako Krzna. W Międzyrzecu Podlaskim do Krzny Północnej uchodzi Kanał Wieprz-Krzna.

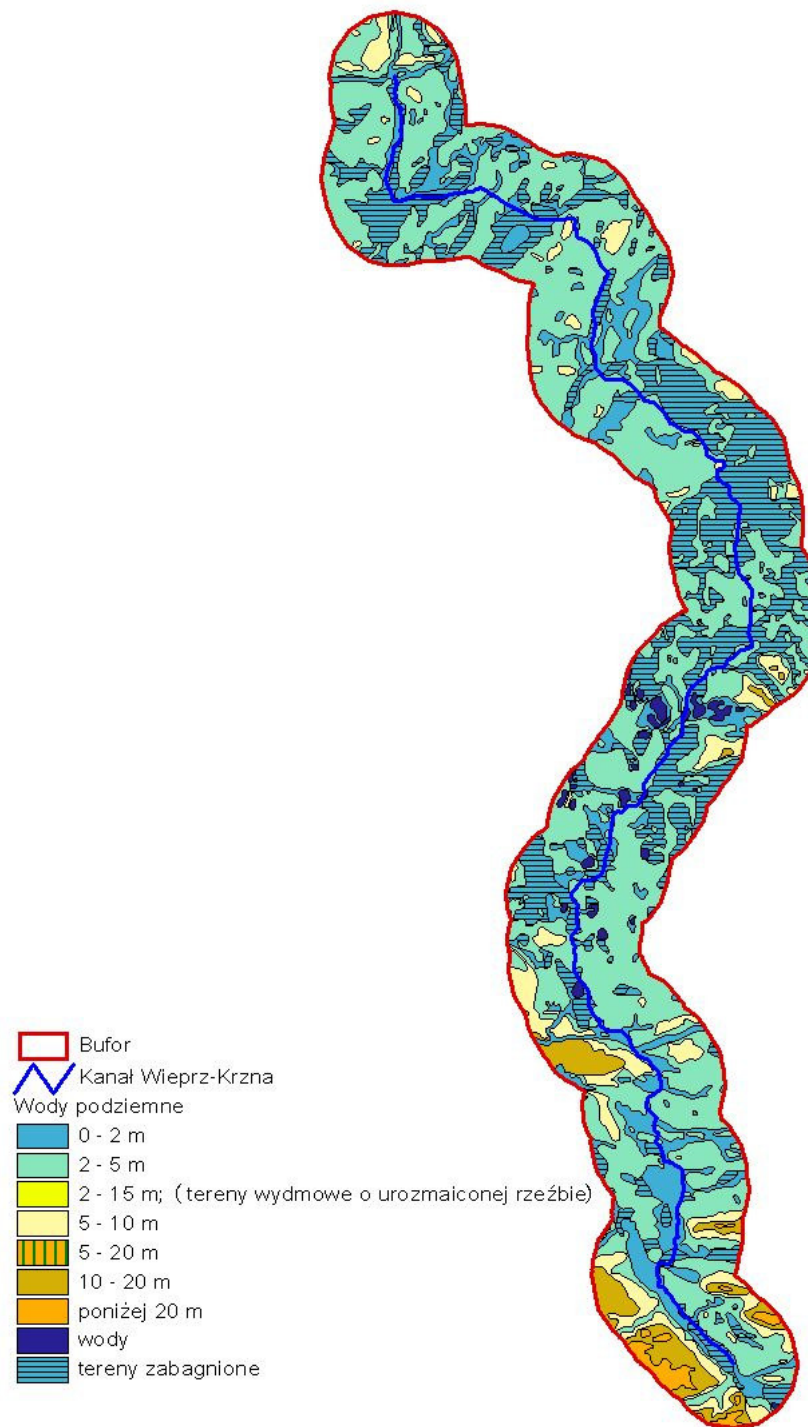
Do sieci wód powierzchniowych rejonu Kanału zaliczamy także mniejsze rzeki, między innymi takie jak: Łopa, Mogilnica, Tyśmienica, Murawa, Białka, Rudka. W rejonie tym istnieje również bogata sieć kanałów melioracyjnych, szczególnie gęsta na terenie Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego.

Część z tych kanałów obecnie nie spełnia już swojej funkcji, są suche i zarośnięte. Tylko niektóre z rowów melioracyjnych pozostają nadal wypełnione wodą i spełniają swoją funkcję.

Dla uprawy wierzby energetycznej ważnym elementem jest głębokość zalegania wody gruntowej. Poziomy wody gruntowej zostały wyznaczone na podstawie mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:300 000. Na mapie wyznaczone zostało 7 poziomów zalegania zwierciadła wody podziemnej.

W rejonie Kanału Wieprz-Krzna najwięcej gruntów posiada pierwszy poziom wód podziemnych na głębokości od 2 do 5m (Rys. 19). Grunty takie zajmują 50% powierzchni badanego obszaru. Tereny z poziomem wody gruntowej do 2m stanowią w rejonie Kanału około 36%, z czego ponad połowa to tereny sklasyfikowane jako tereny zabagnione. Pozostałe 12% powierzchni zajmują tereny z poziomem wody gruntowej od 5 do 10m (7,5%), od 10 do 20m (3,4%) oraz powyżej 20m (1%).

Tereny korzystne do zakładania wieloletnich plantacji wierzby powinny posiadać poziom wody gruntowej na głębokości do 2m. W rejonie badań tereny z wodami gruntowymi znajdującymi się do 2m pod poziomem gruntu zajmują powierzchnie 51 tys. ha. Więcej obszarów z niskim poziomem wody gruntowej znajduje się w części środkowej i północnej rejonu badań. W dużej mierze tereny te przylegają bezpośrednio do Kanału.



Rysunek 19. Poziomy zalegania wody gruntowej w rejonie Kanału Wieprz-Krzna
 Źródło: Mapa hydrologiczna Polski w skali 1:300 000

4.4 Ocena warunków drogowych

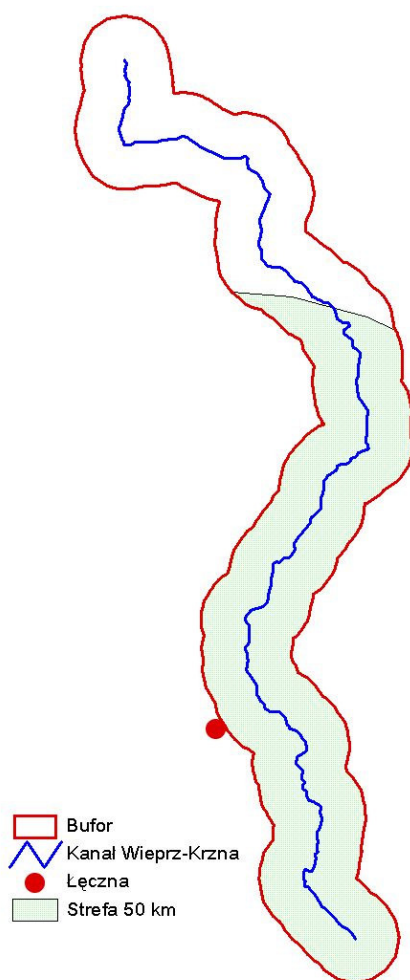
Jednym z ważniejszych czynników związanym z produkcją biomasy jest jej transport do odbiorców. Podaje się, że transport biomasy opłacalny jest na odległość do 50 km (Jasiulewicz 2007), co jest związane z małym ciężarem objętościowym tego surowca. Przewóz biomasy na dalsze odległości wiąże się ze zużyciem większej ilości energii, co jest kosztowne i zwiększa emisję gazów cieplarnianych. Dlatego też ważnym jest aby plantacje roślin energetycznych zakładane były w pobliżu zakładów przetwarzających ten surowiec.

Jednym z odbiorców biomasy z upraw energetycznych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna mogłaby być Energetyka Łęczyńska z Bogdanki. Spółka ta zajmuje się między innymi produkcją i dystrybucją energii cieplnej dla miasta Łęczna oraz odbiorców z rejonu kopalni „Lubelski Węgiel Bogdanka”. Obecnie głównym surowcem energetycznym spółki jest węgiel kamienny wydobywany w kopalni Bogdanka.

Produkcja biomasy na cele energetyczne dla Energetyki Łęczyńskiej może być prowadzona w części środkowej i południowej Kanału Wieprz-Krzna, gdyż obszar ten jest położony w promieniu 50 km od odbiorcy (Rys. 20).

Na opłacalność produkcji energii z biomasy roślinnej ma również wpływ możliwość transportu surowca do odbiorcy. Ważny element stanowi tu dobrze rozwinięta sieć drogowa. W rejonie Kanału Wieprz-Krzna analiza warunków drogowych wykonana została na podstawie cyfrowej mapy drogowej Polski (Rys. 21).

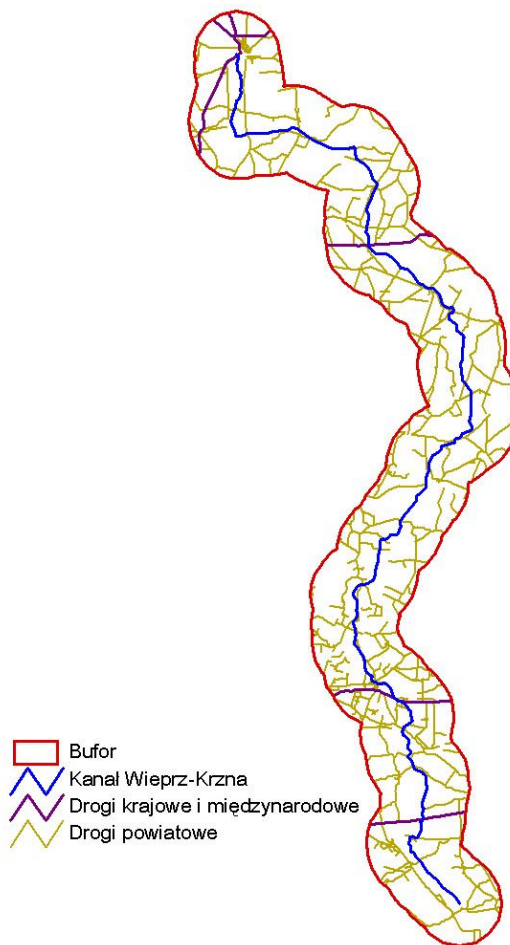
Przez teren badań przebiegają cztery drogi krajowe (DK nr 19, 63, 82, 12), z czego dwie z nich są fragmentami dróg międzynarodowych (DK 19 – E20, DK 12 – E373).



Rysunek 20. Obszary położone w promieniu 50 km od miejscowości Łęczna w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

Droga numer 19 znajduje się na północy rejonu badań. Jest to droga prowadząca z południa Polski do przejścia granicznego z Białorusią w Kuźnicy Białostockiej. Na teren badań droga wchodzi w okolicach Kąkolewnicy i biegnie w kierunku północno-wschodnim do Międzyrzecza Podlaskiego, gdzie łączy się z drogą międzynarodową E20, prowadzącą z zachodu na wschód do przejścia granicznego w Terespolu. Kolejną drogą znajdującą się w północnej części badań jest droga krajowa nr 63. Prowadzi ona z południa Polski do granicy państwa z Białorusią. Na obszarze badań droga ma przebieg równoleżnikowy i biegnie od miejscowości Derewiczna do miejscowości Polubicze. Obie drogi (DK 19 i 63)

znajdują się poza strefą wyznaczoną w promieniu 50 km od Energetyki Łęczyńskiej.



Rysunek 21. Drogi międzynarodowe oraz krajowe i drogi powiatowe w rejonie Kanału Wieprz Krzna

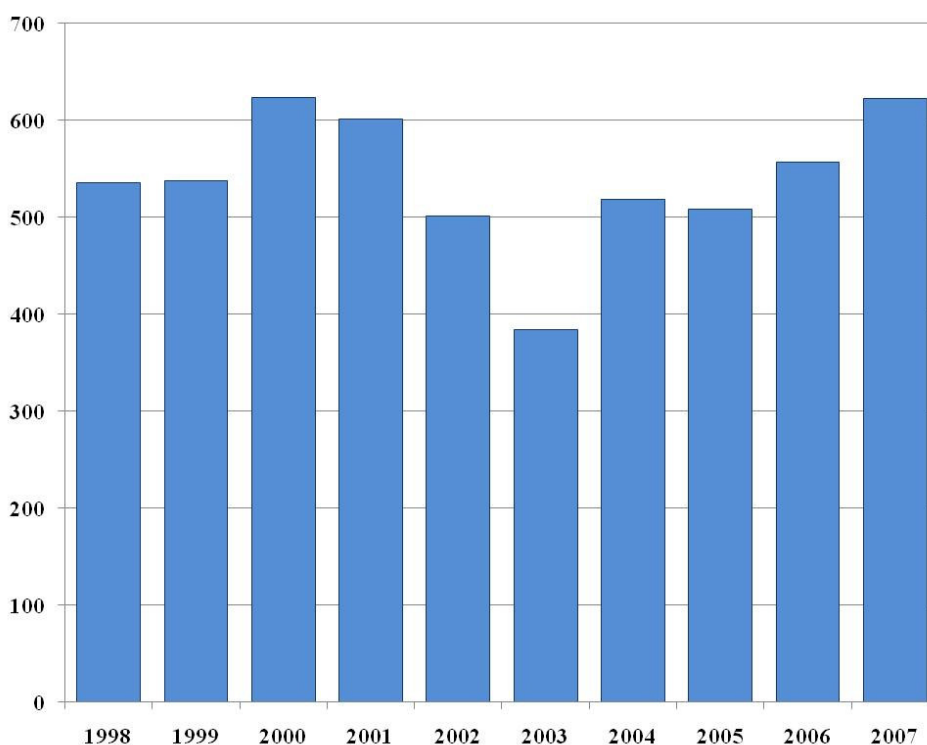
Kolejne dwie drogi krajowe znajdują się na południu rejonu Kanału Wieprz-Krzna i są to drogi numer 82 i 12. Obie drogi na terenie badań biegą z zachodu na wschód. Droga numer 82 prowadzi z Lublina przez Włodawę do granicy z Białorusią. Na terenie badań droga ta biegnie na odcinku Łączna - Głębokie. Droga krajowa numer 12 łącząca zachodnią granicę naszego państwa ze wschodnią stanowi fragment drogi międzynarodowej E373. Jest to jedna

z ważniejszych dróg prowadzących z zachodu Polski do przejścia granicznego w Dorohusku. W rejonie Kanału wieprz-Krzna droga biegnie na odcinku od Pełczyna do Lipówki.

Oprócz dróg krajowych na terenie badań istnieje gęsta sieć dróg powiatowych i gminnych. Drogi te są równomiernie rozłożone na obszarze badań, a ich przebieg zarówno południkowy jak i równoleżnikowy łączy ze sobą cały obszar badań.

4.5 Analiza danych meteorologicznych

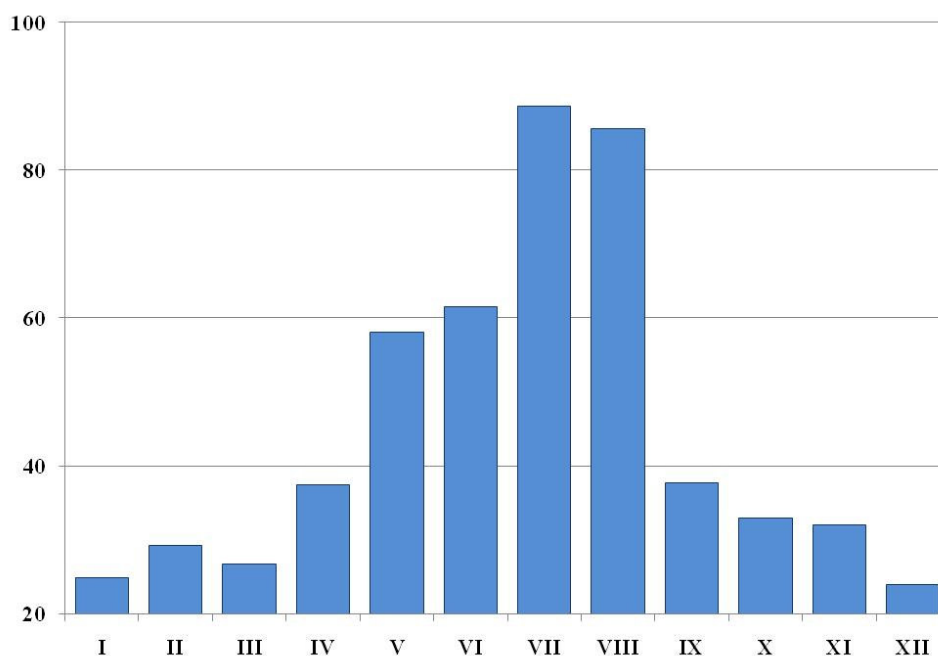
Warunki opadowe zostały scharakteryzowane na podstawie danych opadowych z lat 1998 – 2007 ze stacji meteorologicznej we Włodawie. Średnie roczne sumy opadu atmosferycznego w tym okresie wahały się od 384 mm (w 2003 roku) do 623 mm (w roku 2000) (Rys. 22). Średnia wartość z okresu dziesięciolecia wyniosła 537 mm. Wielkość optymalnej sumy rocznej opadu atmosferycznego dla wzrostu i rozwoju wierzby wiciowej została określona na poziomie około 500 mm. W analizowanym okresie tylko w roku 2003 suma opadu była niższa. W pozostałych latach wielkość opadu była wyższa lub równa 500 mm.



Rysunek 22. Roczne sumy opadu atmosferycznego w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie

Wielkość rocznej sumy opadu atmosferycznego została obliczona także na podstawie Modelu Agroklimatu Polski (MAP). Przeprowadzone analizy dla rejonu badań potwierdziły fakt, że nie ma przeciwwskazań do uprawy wierzby wiciowej w tym rejonie ze względu na wielkość opadu. Dla całego obszaru MAP podał wielkość opadu od 500 mm do 600mm.

Średnie miesięczne sumy opadu z okresu 1998 – 2007 przedstawione zostały na rysunku 23. Najwyższe sumy opadu występują w miesiącach letnich, lipcu i sierpniu, ponad 80 mm. Średnie miesięczne sumy opadu powyżej 40 mm wystąpiły także w maju i czerwcu. W pozostałych miesiącach wartości te były poniżej 40 mm. Najniższy opad natomiast przypada na miesiące zimowe styczeń i grudzień. W okresie 1998 – 2007 średnia miesięczna suma opadu dla tych miesięcy wyniosła 24 – 25 mm.



Rysunek 23. Średnie miesięczne sumy opadu atmosferycznego w latach 1998 – 2007 (mm) na stacji meteorologicznej we Włodawie

Analizując sumy miesięczne opadu w poszczególnych latach można zaobserwować dużą zmienność w poszczególnych latach, szczególnie w lipcu i sierpniu (Tab. 1). Różnice w tych miesiącach pomiędzy największą i najmniejszą sumą opadów dochodzą nawet do 145 mm (lipiec) i 245 mm (sierpień).

Tabela 1. Miesięczne sumy opadu atmosferycznego na stacji meteorologicznej we Włodawie w latach 1998 – 2007 (mm)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
1998	16,5	26,2	29,2	38,7	54,8	100,5	60,3	77,8	37,1	46,2	34,2	14,2	536
1999	10,7	35,3	21,8	90,9	38,2	85,4	55,7	48,4	47,5	35,1	44,2	23,8	537
2000	26,7	30,1	38,4	57,1	47,5	38,9	171,5	62,5	56,0	7,2	33,9	53,3	623
2001	32,7	9,7	25,5	32,8	29,9	83,0	149,8	79,8	95,5	23,1	28,1	11,3	601
2002	22,1	52,6	32,3	20,8	39,5	66,5	75,6	48,4	13,8	93,6	26,0	9,4	501
2003	18,4	17,5	14,9	27,8	67,0	60,1	45,7	28,7	14,4	47,5	17,7	24,3	384
2004	25,0	47,5	24,0	43,8	48,1	37,3	104,2	76,4	25,3	20,8	49,3	16,6	518
2005	26,9	31,3	27,8	20,3	82,5	48,7	80,0	96,5	8,2	4,8	22,4	58,3	508
2006	6,7	16,6	27,1	18,7	58,4	33,1	25,9	273,8	12,1	32,6	35,8	15,9	557
2007	63,3	25,8	26,5	23,0	114,6	61,3	117,4	63,1	67,1	18,4	28,7	13,0	622

Średnia roczna temperatura powietrza na stacji meteorologicznej we Włodawie w najchłodniejszym roku w analizowanym okresie wyniosła 7,8°C (1998 i 2003) zaś w najcieplejszym 9,1°C (2000) (Tab.2). Wprawdzie w 2007 r. średnia temperatura roku wyniosła 11,0°C, ale nie uwzględnia ona temperatury z pierwszych trzech miesięcy w roku.

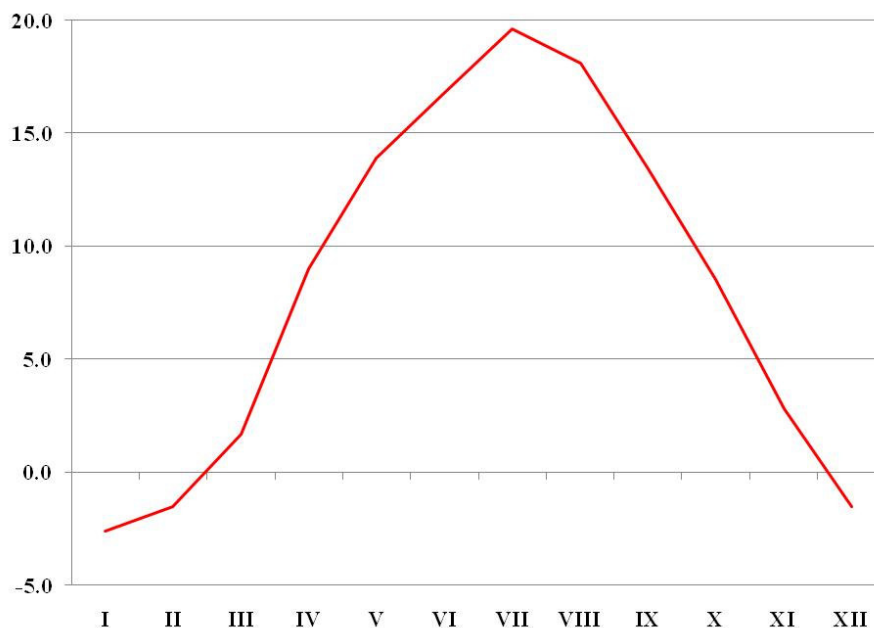
Tabela 2. Średnia miesięczna temperatura powietrza w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie oraz średnia z lat 1998 – 2006 (°C)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ROK
1998	0,1	2,9	1,1	9,8	13,8	17,8	17,6	16,3	12,9	7,2	-2,6	-3,9	7,8
1999	-0,6	-1,7	3,8	9,6	11,6	19,1	20,3	17,4	15,1	7,8	0,9	-0,2	8,6
2000	-2,4	1,1	2,7	11,9	14,8	17,3	16,7	17,9	11,2	10,6	6,3	1,4	9,1
2001	-1,0	-1,6	2,2	8,8	13,8	14,7	20,9	18,9	12,3	10,4	1,7	-6,5	7,9
2002	-1,8	3,1	4,2	8,6	16,7	17,0	21,2	20,2	12,7	7,1	4,2	-7,8	8,8
2003	-4,0	-6,5	1,4	6,8	15,7	16,9	19,9	18,7	13,7	5,4	4,7	0,4	7,8
2004	-5,6	-1,3	2,6	8,1	11,8	15,8	18,0	18,4	12,8	9,6	3,0	1,2	7,9
2005	0,0	-4,0	-0,9	8,8	13,0	15,6	20,5	17,3	14,6	8,9	2,4	-0,9	7,9
2006	-8,3	-5,2	-1,8	8,8	13,5	16,7	21,5	17,9	15,0	9,7	4,8	2,9	8,0
2007	.	.	.	8,2	14,9	18,1	18,9	18,6	13,1	7,8	0,8	-1,1	11,0*

. brak danych, *średnia od kwietnia do grudnia

Najcieplejszym miesiącem w ciągu roku jest lipiec (Rys. 24). Średnia temperatura powietrza dla tego miesiąca w wieloleciu 1998 – 2006 wyniosła dla Włodawy 19,6°C. Nieco chłodniejszym miesiącem jest sierpień ze średnią temperaturą w wysokości 18,1°C. Analizując wartości temperatury dla tych miesięcy w poszczególnych latach można zaobserwować dużą zmienność (Tab. 2). Najchłodniejszy lipiec był w roku 2000, kiedy średnia temperatura wyniosła 16,7°C, zaś najcieplejszy w 2006 roku z temperatura 21,5°C. Sierpień natomiast najchłodniejszy był w roku 1998 (średnia temperatura powietrza 16,3°C), a najcieplejszy w roku 2002 (20,2°C).

Najchłodniejszym miesiącem w analizowanym okresie był styczeń. W latach 1998 – 2006 średnia temperatura tego miesiąca wyniosła -2,6°C. Wartości temperatury w poszczególnych latach wykazują dużą zmienność (Tab. 2). Najcieplejszy styczeń zanotowano w 1998 roku, gdzie średnia temperatura była dodatnia i wyniosła 0,1°C. W analizowanym okresie jeszcze tylko w roku 2005 średnia temperatura stycznia była na poziomie 0,0°C. W pozostałych latach wartości temperatury są ujemne. Najchłodniejszy styczeń we Włodawie był w roku 2006, ze średnią temperaturą -8,3°C.



Rysunek 24. Średnia miesięczna temperatura powietrza na stacji meteorologicznej we Włodawie z wielolecia 1998 – 2006

Temperatury minimalne mają duże znaczenie szczególnie w okresie wczesnowiosennym, kiedy to po okresie występowania dodatnich temperatur następuje jej spadek poniżej zera. Rośliny, które już rozpoczęły proces wegetacji narażone są wtedy na przymrozki, po których następuje zahamowanie wegetacji, a czasem także uszkodzenie młodych pędów. W tabeli 3 przedstawiono najniższe minimalne temperatury w poszczególnych latach. Jak wynika z ich analizy przymrozki wiosenne mogące mieć wpływ na zahamowanie wegetacji wystąpiły w maju w czterech analizowanych latach. Najniższa temperatura odnotowana została w tym miesiącu w 2000 roku i było to $-1,7^{\circ}\text{C}$. Wystąpiły wtedy dwa dni z przymrozkami, podobnie jak w roku 2004. Po trzy dni z temperatura minimalna poniżej zera w maju wystąpiło w 1999 i 2007 roku. W kolejnych miesiącach, od czerwca do sierpnia, nie zanotowano występowania dni z ujemną temperaturą. Spadki temperatury poniżej zera zaczęły pojawiać się we wrześniu. Ujemne temperatury zanotowano w pięciu analizowanych latach i były to jednodniowe spadki temperatury poniżej zera. Jedynie w roku 1999 odnotowano wystąpienie dwóch dni z minimalną temperaturą poniżej zera.

Tabela 3. Najniższa minimalna temperatura powietrza w poszczególnych miesiącach w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie (°C)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1998	-11,3	-17,4	-8,3	-0,8	0,2	8,3	9,1	4,3	2,1	-2,2	-19,9	-20,7
1999	-15,7	-12,4	-4,6	-1,0	-1,2	5,8	9,3	4,1	-1,6	-3,1	-7,9	-13,4
2000	-22,1	-11,2	-7,2	-2,6	-1,7	1,8	6,3	7,1	-0,6	-3,7	-1,5	-8,9
2001	-10,3	-14,8	-*8,3	-2,6	0,6	4,3	11,4	5,7	0,8	-4,9	-6,3	-21,6
2002	-21,2	-7,8	-3,6	-5,6	2,2	5,9	7,8	8,0	-1,5	-5,0	-5,4	-25,8
2003	-25,3	-26,8	-8,7	-4,9	2,5	5,7	10,1	7,2	-2,0	-6,0	-3,7	-11,2
2004	-18,5	-15,3	-17,1	-5,0	-0,4	3,3	6,2	6,3	1,7	-3,4	-9,8	-6,1
2005	-11,6	-20,6	-18,4	-3,9	0,7	4,5	6,8	7,4	-0,3	-4,2	-8,9	-12,7
2006	-29,7	-19,9	-19,2	-2,9	2,6	3,5	8,3	8,9	5,9	-5,4	-11,6	-6,8
2007	-14,1	-15,0	-1,1	-6,1	-1,1	7,4	9,0	4,4	0,5	-2,7	-6,7	-11,4

4.6 Analiza użytkowania terenu

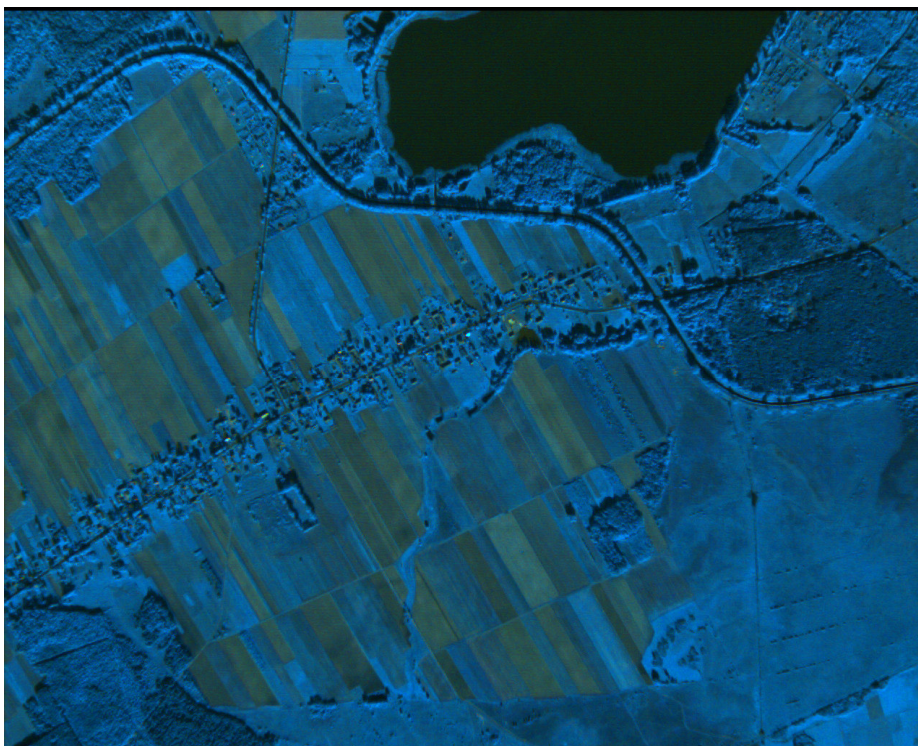
Na podstawie wykonanych zdjęć lotniczych opracowana została dla wybranych obszarów rejonu Kanału Wieprz-Krzna mapa użytkowania terenu. Po przeprowadzeniu wcześniejszych analiz, na podstawie których wyznaczone zostały obszary korzystne do uprawy wierzby wiciowej wyznaczono zostały obszary testowe dla których przeprowadzona została analiza użytkowania terenu.

Przed wykonaniem analizy użytkowania zdjęć lotniczych przeprowadzona została ortorektyfikacja, czyli korekcja geometryczna zdjęć. W wyniku tego procesu każdemu punktowi na zdjęciu nadane zostały współrzędne geograficzne.

Proces klasyfikacji nienadzorowanej zdjęć lotniczych wykonano dla zdjęć RGB oraz zdjęć wykonanych w podczerwieni. Zdjęcia obejmowały ten sam obszar w celu sprawdzenia, dla którego rodzaju zdjęć można uzyskać lepsze wyniki w procesie klasyfikacji nienadzorowanej (Fot. 8, 9). W odróżnieniu od klasyfikacji nadzorowanej zdjęć proces ten nie wymaga prac terenowych i może być wykorzystywany do szybkiej analizy użytkowania terenu.



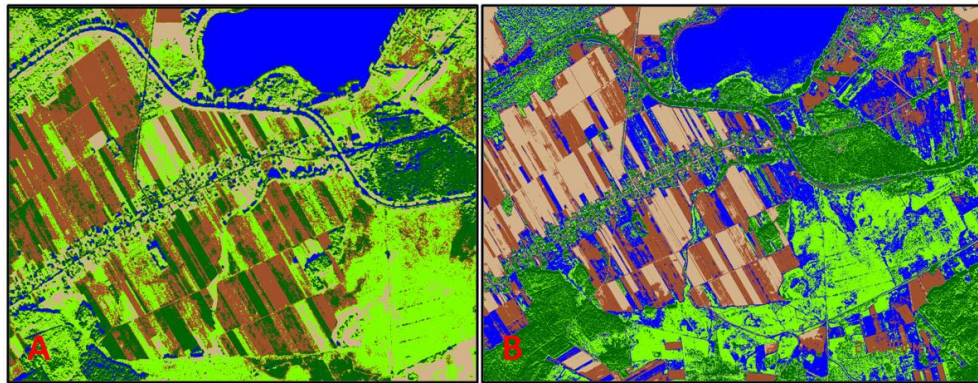
Fotografia 8. Zdjęcie RGB (wykonane aparatem Sony) poddane procesowi klasyfikacji nienadzorowanej



Fotografia 9. Zdjęcie wykonane w podczerwieni (wykonane aparatem ADC) poddane procesowi klasyfikacji nienadzorowanej

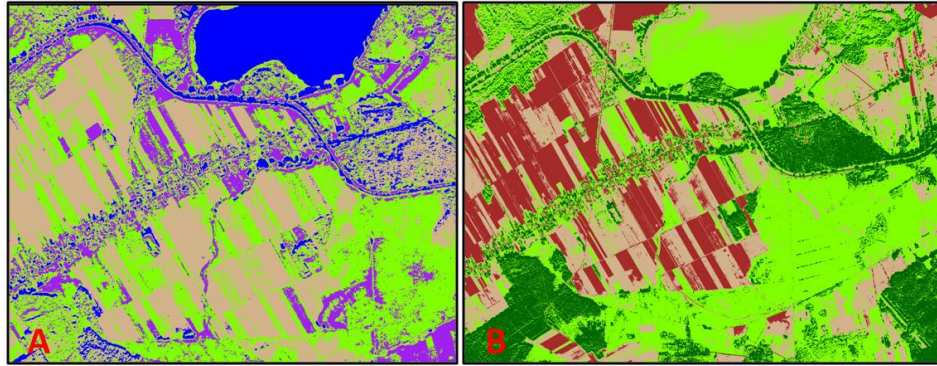
W przypadku obu rodzaju zdjęć zastosowano tą samą metodykę i wydzielono pięć klas użytkowania terenu (Rys. 25). Na zdjęciach RGB wystąpił problem z obszarami zakwalifikowanymi jako wody. Oprócz faktycznie istniejących zbiorników wodnych do klasy wody zaliczone zostały także tereny łąk i pastwisk. Na zdjęciach wykonanych w podczerwieni wyraźniej został wydzielony Kanał Wieprz-Krzna oraz istniejące ciekі rzeczne i kanały melioracyjne. Klasa lasy i zadrzewienia natomiast wyraźniej została sklasyfikowana na zdjęciach RGB, gdzie widać wyraźną różnicę pomiędzy zadrzewieniami a łąkami. W przypadku drugiego rodzaju zdjęć niektóre tereny zadrzewione zostały zaliczone do jednej klasy razem z łąkami. Na obu rodzajach zdjęć zabudowania, których jest niewiele na analizowanych zdjęciach, zostały zaliczone do jednej klasy z zadrzewieniami lub łąkami. Jest to związane z występowaniem na terenie siedlisk dużej liczny drzew i krzewów w pobliżu

zabudowań. Dodatkowo na zdjęciach w podczerwieni zabudowania lub też całe siedliska sklasyfikowane zostały jako wody. Pozostałe grunty, którymi na zanalizowanych zdjęciach były grunty orne zaliczone zostały do dwóch klas w zależności od tego czy były to pola z czarnym ugiem, czy też z występującą na polu roślinnością.



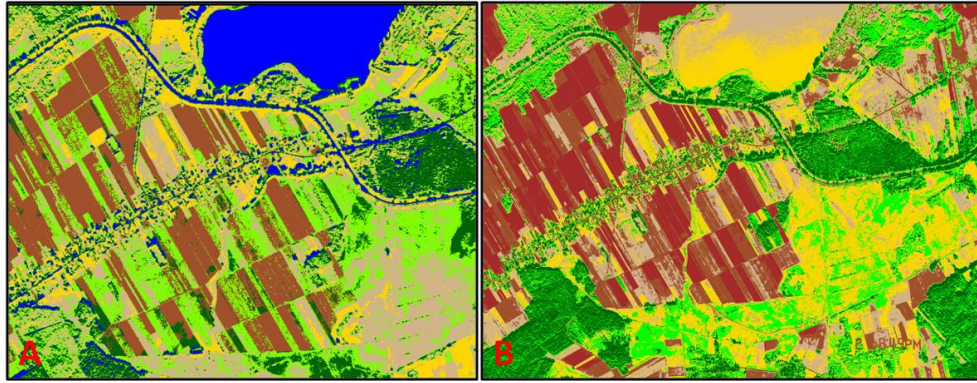
Rysunek 25. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na pięć klas

Dla tych samych obszarów i rodzajów zdjęć przeprowadzono klasyfikację nienadzorowaną, z podziałem na cztery klasy użytkowania (Rys. 26). W procesie tym lepsze wyniki uzyskano dla zdjęć wykorzystujących podczerwień. Na zdjęciach tych wydzielone zostały wody, tereny zielone, w tym: łąki i zadrzewienia, grunty orne oraz pozostałe obszary, do których zaliczone zostały tereny zabudowane oraz nieużytki. Na zdjęciach RGB przy wydzieleniu czterech klas użytkowania wydzielone zostały takie obszary jak: zadrzewienia, łąki oraz grunty orne zaliczone do dwóch klas. Na zdjęciach tych nie wydzielona została klasa wód, a zbiornik wodny widoczny na zdjęciu został zakwalifikowany częściowo do klasy łąki i grunty orne. Jest to związane z eutrofizacją tego zbiornika.



Rysunek 26. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na cztery klas

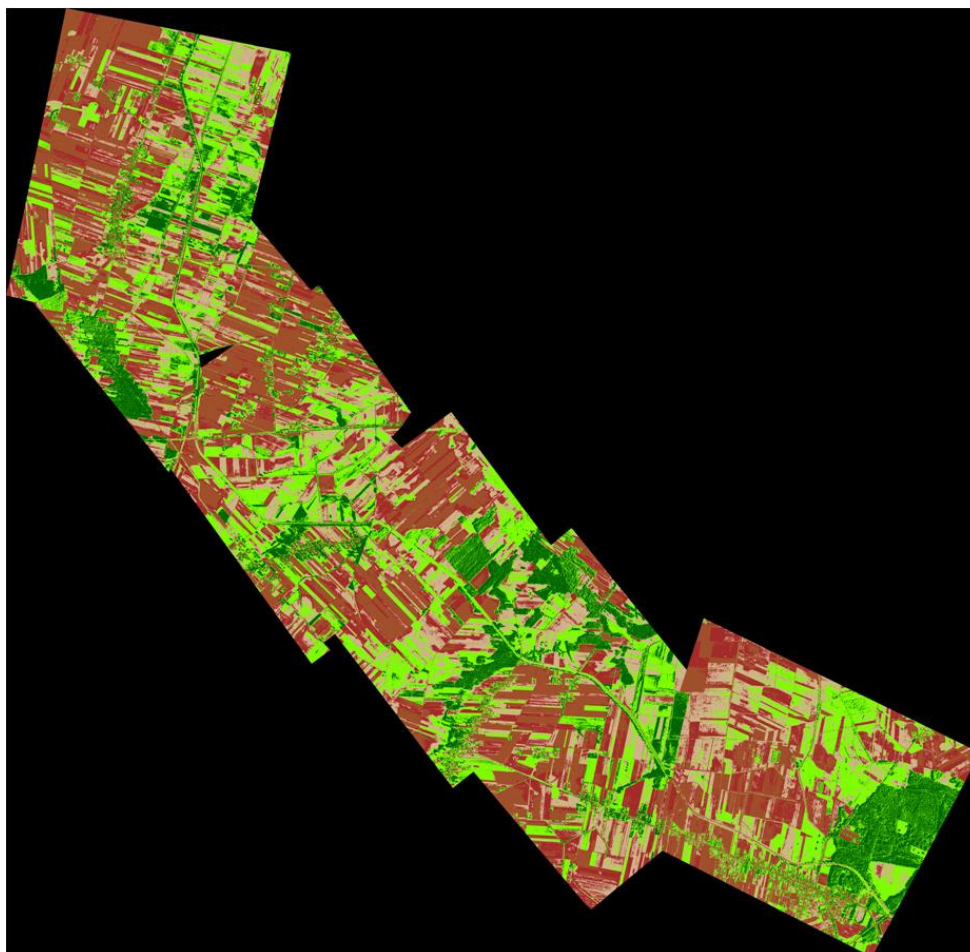
Zwiększenie liczby wydzielanych klas do sześciu nie przyniosło poprawy w procesie klasyfikacji dla zdjęć RGB (Rys. 27). Ponownie nie została wyodrębniona tu klasa wody, a zbiornik wodny zaliczony został do dwóch różnych klas: nieużytki i grunty orne. Ponadto na zdjęciach tych wydzielone zostały klasy: lasy, zakrzaczenia oraz łącznie łąki i grunty orne. Na zdjęciach wykonanych w podczerwieni przy klasyfikacji i wydzielaniu sześciu klas wyodrębnione zostały następujące formy użytkowania: wody, zadrzewienia, grunty orne, łąki, nieużytki oraz klasa pozostałe. Do tej ostatniej zaliczone zostały pojedyncze obiekty pól uprawnych, łąk i nieużytków. W przypadku tego rodzaju zdjęć podział na sześć klas użytkowania okazał się najbardziej odpowiedni. Pomimo, iż do kategorii nieużytki włączone zostały niektóre pola uprawne i łąki to wydzielenie sześciu klas najbardziej odpowiada rzeczywistemu obrazowi użytkowania terenu. Na zdjęciach z wydzielonymi sześcioma klasami wyraźnie odróżniają się tereny zadrzewione i lasy od łąk, co nie zawsze jest widoczne przy mniejszej liczbie wydzielanych form użytkowania.



Rysunek 27. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na sześć klas

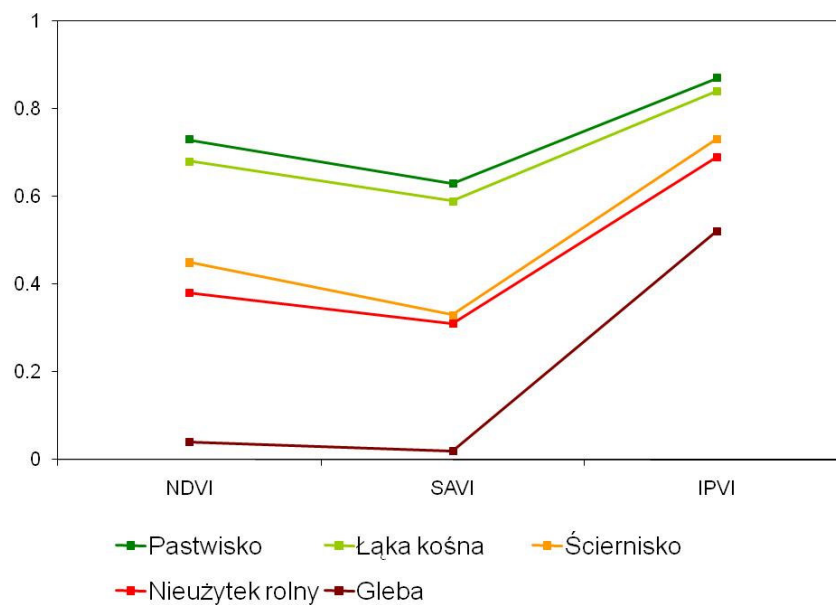
W procesie klasyfikacji nienadzorowanej najlepsze efekty uzyskano dla zdjęć RGB w przypadku wydzielenia pięciu klas form użytkowania terenu zaś dla zdjęć wykonanych w podczerwieni dla sześciu klas.

Dla wybranego fragmentu Kanału Wieprz-Krzna przeprowadzono proces klasyfikacji nienadzorowanej połączonych zdjęć RGB z podziałem na pięć klas użytkowania terenu (Rys. 28). Wydzielone zostały następujące klasy: zadrzewienia, łąki oraz trzy klasy gruntów ornych, które podzielone zostały ze względu na rodzaj podłoża. Wyodrębnione zostały pola pozbawione pokrywy roślinnej w zależności od stopnia uwilgotnienia. Gleby wilgotne posiadają ciemniejszą barwę na zdjęciach w porównaniu do gleb suchych, dlatego też zostały zakwalifikowane do oddzielnych klas. Na analizowanych zdjęciach nie wydzielona została klasa wody, gdyż Kanał Wieprz-Krzna na tym odcinku jest suchy, a jego koryto jest porośnięte roślinnością trawiastą. Przy brzegu Kanału znajdują się także liczne zadrzewienia i zakrzaczenia, co ma wpływ na zaliczenie Kanału do klasy łąki lub zadrzewienia. Na odcinkach, na których Kanał jest suchy i nie porośnięty roślinnością został zakwalifikowany do klasy grunty orne.



Rysunek 28. Użytkowanie terenu w północnej części Kanału Wieprz-Krzna

Dla poszczególnych form użytkowania terenu w punktach kontrolnych obliczono wartości indeksów wegetacji (Rys. 29). Najwyższe wartości wskaźnika NDVI posiadają łąki oraz pastwiska. Dla tych sposobów użytkowania wskaźnik zieloności wynosił około 0,7 i był minimalnie większy dla pastwisk. Kolejnym typem użytkowania dla którego obliczono NDVI były nieużytki rolne. Dla tych obiektów wartość NDVI wyniosła 0,38. Podobną wartość (większą jedynie o 0,07) posiadały Najniższy wskaźnik NDVI był dla gleb pozbawionych pokrywy roślinnej. Wartość tego wskaźnika dla tych obiektów wyniosła 0,04. Odmienne wartości ale te same zależności uzyskano dla pozostałych wskaźników (SAVI i IPVI).



Rysunek 29. Porównanie indeksów wegetacji dla pastwiska, łąki kośnej, ścierniska, nieużytku rolnego i gleby obliczone na podstawie pomiarów punktowych ze zdjęć spektralnych wykonanych kamerą ADC w rejonie Kanału Wieprz-Krzna

4.7 Plonowanie, obieg węgla i azotu oraz wielkość emisji gazów cieplarnianych

Symulacje w Modelu DNDC zostały wykonane dla trzech rodzajów gleb najpowszechniej występujących w rejonie Kanału wieprz-Krzna (Tab. 4).

Tabela 4. Rodzaje gleb w Kanale Wieprz-Krzna na podstawie mapy glebowo rolniczej 1:25 000, IUNG-PIB

Rodzaj gleby	Powierzchnia (ha)	Powierzchnia (%)
gl – glina lekka	1 025	0,7
glp – glina lekka pylasta	2 075	1,5
l – lessy i utwory lessowate	6 132	4,4
li – lessy utwory lessowate ilaste	1 968	1,4
pgl – piaski gliniaste lekkie	23 177	16,6
pglp – piaski gliniaste lekkie pylaste	6 670	4,8
pgm – piaski gliniaste mocne	6 611	4,7
pgmp – piaski gliniaste mocne pylaste	5 630	4,0
plz – pyły zwykłe	27 436	19,6
ps – piaski słabogliniaste	18 882	13,5
psp – piaski słabo gliniaste pylaste	1 540	1,1
pozostałe	38 854	27,7
razem	140 000	100

Pierwszym wynikiem uzyskanym w symulacjach są dane o wielkości uzyskanych plonów w poszczególnych latach na różnych glebach. Największe plony, niezależnie od poziomu nawożenia azotem, uzyskano dla pyłów zwykłych (Tab. 5). Przy niższej dawce nawożenia (75 kg N/ha/rok) średni plon z okresu 1998-2007 dla tej gleby wyniósł 10,8 t s.m/ha/rok. Najmniejsze plony uzyskano natomiast dla uprawa zlokalizowanych na glinach lekkich (8,1 t s.m/ha/rok). Największe plony dla wszystkich gleb odnotowano w roku 2006. Na pyłach zwykłych uzyskano wtedy plon wielkości 15,0 t s.m/ha/rok, na glinach lekkich 9,8 t s.m/ha/rok, zaś na piaskach gliniastych 10,9 t s.m/ha/rok.

Tabela 5. Plonowanie wierzby wiciowej w okresie 1998 – 2007, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t s.m/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	7,8	7,7	8,4	7,8	10,1	9,2	8,3	6,2	10,9	7,0	8,3
Pył zwykły	8,3	8,8	9,7	10,2	11,5	12,9	11,9	10,1	15,0	9,5	10,8
Glinna lekka	8,4	7,0	7,9	8,3	9,0	8,7	7,8	7,4	9,8	6,1	8,1
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	9,9	9,7	10,6	10,8	13,0	12,5	11,7	9,7	14,7	9,1	11,2
Pył zwykły	10,4	11,0	12,2	13,6	14,6	16,8	16,0	14,5	19,3	14,0	14,2
Glinna lekka	10,6	9,1	10,3	10,8	11,5	11,4	10,8	10,1	12,5	8,7	10,5

Przy zwiększonej dawce nawożenia, do poziomu 115kg N/ha/rok, uzyskano większe plony średnio od 2 do 4 ton. Na pyłach zwykłych wielkości symulowanych plonów, dla okresu dziesięciolecia 1998 -2007, były największe, co dawało średni plon 14,0 t s.m/ha/rok. Najmniejsze średnie plony 10,5 t s.m/ha/rok uzyskana na glinach lekkich. W całym okresie badań największe plony otrzymano w 2006 roku. Na pyłach zwykłych uzyskano 19,3 t s.m/ha/rok, zaś na piasku gliniastym – 14,7 t s.m/ha/rok, a na glinie lekkiej – 12,5 t s.m/ha/rok.

Na podstawie wielkości plonów obliczonych z modelu oszacowano wielkość zbioru wierzby wiciowej dla trzech rodzajów gleb, najpowszechniej występujących w rejonie badań. Ponieważ największą powierzchnie miał pył zwykły, na glebie tej zbiór suchej masy wierzby jest największy, bez względu na wielkość nawożenia azotem (Tab. 6). Na glebie tej w ciągu roku można zebrać prawie 133 tys. t s.m/rok. Około 40 tys. t s.m/rok mniej można otrzymać na piaskach gliniastych przy nawożeniu 75 kg N, a przy zwiększonej dawce nawożenia różnica ta może dochodzić nawet do niemal 50 tys. t s.m/rok. Łącznie dla trzech badanych gleb, korzystnych do uprawy wierzby wiciowej, można uzyskać około 230 tys. t s.m/rok, przy nawożeniu 75 kg N. Przy zwiększonym nawożeniu zbiory będą większe o około 80 tys. t s.m/rok.

Tabela 6. Wielkość zbioru wierzby wiciowej dla różnych gleb i przy różnych dawkach nawożenia (t s.m/rok)

	Plon t s.m/ha/rok	Powierzchnia ha	Zbiór t s.m/rok
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N		
Piasek gliniasty	8,3	11395,7	94584,3
Pył zwykły	10,8	12312,9	132979,3
Glinna lekka	8,1	1508,2	12216,4
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N		
Piasek gliniasty	11,2	11395,7	127631,8
Pył zwykły	14,2	12312,9	174843,2
Glinna lekka	10,5	1508,2	15836,1

Przy pomocy modelu DNDC uzyskano również wyniki dotyczące wielkości pobrania azotu przez rośliny (Tab. 7). Wystąpiły wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi glebami oraz dawkami nawożenia. W każdym przypadku następował wzrost pobrania azotu w kolejnych latach uprawy na pyłach zwykłych i piaskach gliniastych. Na glebach zaliczanych do rodzaju glin lekkich nie zaobserwowano tendencji wzrostu pobrania azotu. Na glebach tych rośliny pobierały dużo mniej azotu niż na pozostałych rodzajach gleb. Średnie pobranie tego składnika przy nawożeniu 75 kg N wyniosło 188 kg, zaś przy nawożeniu 115 kg N – 214 kg N. Po pierwszym roku uprawy nastąpił niewielki spadek pobrania azotu przez rośliny wierzby i w kolejnych latach utrzymywało się ono na względnie stałym poziomie, w przypadku mniejszej dawki nawożenia azotem. Przy zwiększonym nawożeniu również nastąpił niewielki spadek pobrania azotu po pierwszym roku, ale w kolejnych latach następował bardzo powolny i niewielki wzrost tego wskaźnika.

Tabela 7. Wielkość pobrania azotu przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	200	211	237	242	243	253	258	246	238	263	239
Pył zwykły	207	221	266	276	282	291	304	305	297	320	277
Glinna lekka	196	172	186	187	192	183	191	187	187	198	188
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	241	266	297	306	312	323	334	323	316	345	306
Pył zwykły	248	273	326	340	353	364	384	387	378	416	347
Glinna lekka	236	215	234	234	241	233	242	23	237	249	214

Niezależnie od wielkości nawożenia azotem największe pobranie tego składnika przez rośliny było na pyłach zwykłych. Przy mniejszym nawożeniu dla lat 1998 - 2007 średnio wyniosło one 277 kg N/ha/rok, zaś przy zwiększonej dawce azotu następował także zwiększone pobranie tego składnika i średnio wynosiło 347 kg N/ha/rok. Na glebie tej w ciągu 10 lat uprawy wierzby nastąpiło zwiększenie pobrania azotu z 207 do 319 kg (to jest o około 113 kg) przy nawożeniu 75 kg N, zaś przy zwiększonym poziomie nawożenia wzrost pobrania tego składnika wyniósł ponad 168 kg, od 248 do 416 kg.

Model pozwala także na oszacowanie wielkości uwalnianego podczas uprawy wierzby azotu w postaci amoniaku (NH_3), podtlenku azotu (N_2O), tlenku azotu (NO) oraz azotu cząsteczkowego (N_2). Wszystkie dane zostały przedstawione w tabelach 8, 9, 10, 11.

Tabela 8. Wielkości uwalnianego azotu w postaci amoniaku (NH₃) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	1,4	1,5	1,1	0,9	1,0	0,8	1,1	0,9	1,2	1,4	1,1
Pył zwykły	2,1	2,5	2,3	1,5	1,5	1,3	2,0	1,9	1,7	2,3	1,9
Glinna lekka	1,1	1,6	2,0	1,6	1,0	0,7	1,6	1,9	2,6	2,1	1,6
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	1,6	1,6	1,2	1,1	1,1	1,0	1,3	1,3	1,3	1,5	1,3
Pył zwykły	2,4	2,8	2,5	1,5	1,6	1,3	1,9	2,1	1,1	2,0	1,9
Glinna lekka	1,2	1,8	2,4	1,9	1,2	0,7	1,8	2,2	2,5	2,7	1,8

Tabela 9. Wielkości uwalnianego azotu w postaci podtlenku azotu (N₂O) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pył zwykły	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3
Glinna lekka	0,2	0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Pył zwykły	0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	1,3	0,9	0,5
Glinna lekka	0,2	0,2	0,6	0,6	0,8	0,3	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4

Tabela 10. Wielkości uwalnianego azotu w postaci tlenku azotu (NO) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,5	0,4	0,1
Pył zwykły	0,1	0,1	0,1	0,8	0,1	0,1	0,2	0,3	1,1	1,0	0,4
Glinna lekka	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,2
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,2
Pył zwykły	0,1	0,2	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2	0,4	1,5	1,3	0,5
Glinna lekka	0,1	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,2	0,9	0,8	0,3

Tabela 11. Wielkości uwalnianego azotu w postaci azotu cząsteczkowego (N₂) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Pył zwykły	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	1,0	0,6	0,4	0,9	0,7	0,5
Glinna lekka	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2
Pył zwykły	0,2	0,3	0,5	0,8	0,9	1,5	1,0	0,8	1,7	1,3	0,9
Glinna lekka	0,4	0,2	0,5	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,2	0,4

Spośród tych związków w największych ilościach uwalniany był azot w postaci amoniaku. Na pyłach zwykłych wartości te średnio wynosiły 1,9 kg N/ha/rok, niezależnie od wielkości nawożenia azotem. Największe ilości azotu w postaci amoniaku na tych glebach uwalniane były w pierwszych latach uprawy i wynosiły 2,1 – 2,5 kg N/ha/rok, przy nawożeniu dawką 75 kg N/ha oraz 2,5 – 2,8 kg N/ha/rok, przy nawożeniu 115 kg N/ha. W kolejnych latach wartości te malały i od 2003 roku nastąpił kolejny ich wzrost. Najmniejsze ilości azotu uwalniane w postaci NH_3 były na piaskach gliniastych i wyniosły w średnio 1,1 N kg/ha/rok w okresie 1998 – 2007 (dawka nawożenia azotem 75 kg N/ha) i 1,3 N kg/ha/rok (dawka nawożenia azotem 115 kg N/ha). Na glebach tych od pierwszego roku uprawy wierzby występował spadek ilości uwalnianego gazu, a od 2003 roku następował kolejny wzrost, osiągając w ostatnim roku analiz wartość początkową. Na piaskach gliniastych, jak również na glinach lekkich wystąpiły różnice w ilości uwalnianego z pod uprawy wierzby amoniaku do atmosfery w zależności od wielkości nawożenia. Na obu rodzajach gleb w przypadku większych dawek następował wzrost uwalnianego do atmosfery gazu średnio o 0,2 kg N/ha/rok.

Analizując wielkość uwalnianego z plantacji wierzby azotu w postaci podtlenku azotu (N_2O) widoczna jest różnica, zarówno pomiędzy glebami, jak też wielkością nawożenia (Tab. 9). W przypadku zastosowania większych dawek azotu następowało również większe uwalnianie tego pierwiastka o około 60% w porównaniu do gleb, gdzie zastosowano mniejsze dawki nawożenia. Azot w postaci N_2O uwalniany jest do atmosfery w mniejszych ilościach niż w postaci NH_3 . Średnio w okresie 1998 – 2007 największe uwalnianie następowało na pyłach zwykłych i wynosiło 0,29 kg N/ha/rok, przy nawożenia 75 kg N oraz 0,51 kg N/ha/rok przy nawożeniu 115 kg N.

Azot w postaci tlenku azotu (NO) oraz w postaci cząsteczkowej (N_2) na plantacjach wierzby uwalniane są w niewielkich ilościach (Tab. 10 i 11). W żadnym z przypadków wielkość ta nie przekroczyła 1 kg N/ha/rok. Średnie wartości NO i N_2 są podobne, różnią się jedynie w przypadku pyłów zwykłych, gdzie emisja N_2 jest większa o około 40%, przy nawożeniu 75 kg N i około 70% przy nawożeniu dawką 115 kg N/ha.

W tabeli 12 przedstawiono różnice w bilansie azotu w glebie pod plantacją wierzby w poszczególnych latach oraz średnią wartość z wielolecia 1998 – 2007. Wielkości te różniły się między sobą w zależności od rodzaju gleby i dawki nawożenia. Największe ilości azotu gromadzone były na pyłach zwykłych, zaś najmniejsze na glinach lekkich. W przypadku zwiększenia nawożenia zapasy azotu w glebie zwiększały się nawet o około 30%. Największa ilość azotu zgromadzona została w 2006 roku, który był dziewiątym rokiem symulowanej uprawy wierzby. Duże różnice wystąpiły pomiędzy glebami, największe pomiędzy pyłem zwykłym, który gromadził najwięcej azotu, a gliną lekką. Średnio różnice te wynosiły około 100 kg, przy mniejszej dawce nawożenia (75 kg N/ha/rok) i około 150 kg przy większym nawożeniu (115 kg N/ha/rok). W obu przypadkach największe różnice wystąpiły w 2006 roku i wyniosły odpowiednio 165 kg i 220 kg. Tylko w pierwszym roku symulacji na glinie lekkiej przy mniejszej dawce nawożenia odnotowano niekorzystny, ujemny bilans azotu w glebie, którego wartość wyniosła -6 kg.

Tabela 12. Bilans azotu (N) w glebie pod uprawą wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	96	125	116	116	151	118	93	72	158	97	114
Pył zwykły	101	143	125	148	168	163	136	120	207	121	143
Glinna lekka	-6	41	31	39	38	42	33	30	42	26	32
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	135	159	149	162	195	165	139	122	212	123	156
Pył zwykły	140	181	161	203	217	220	195	187	278	208	199
Glinna lekka	6,5	57	45	54	52	57	47	46	57	41	46

Model DNDC pozwala również na oszacowanie wielkości mineralizacji azotu w glebie pod uprawą wierzby. Podobnie jak w przypadku wyżej wymienionych form azotu wielkość mineralizacji zależy od gleby, jak również

wielkości nawożenia (Tab. 13). Największa mineralizacja następuje na pyłach zwykłych i wyniosła średnio 125 kg N/ha/rok, przy nawożeniu na poziomie 75 kg N i 156 kg N/ha/rok, przy nawożeniu 115 kg N. Najniższy poziom mineralizacji następuje na glinach lekkich i wynosi 45 kg N/ha/rok – przy niższym nawożeniu i ponad 54 kg N/ha/rok dla nawożenia wyższą dawką. Wartości te są około trzykrotnie mniejsze od mineralizacji na pyłach zwykłych i około dwukrotnie mniejsza niż na piaskach gliniastych. W każdym przypadku ilość mineralizowanego azotu wzrastała w kolejnych latach symulacji. W roku 2005 odnotowano niewielkie obniżenie się ilości zmineralizowanego azotu w stosunku do roku poprzedniego. Największy spadek odnotowano na piaskach gliniastych i wyniósł on 8 kg N/ha/rok – przy nawożeniu na poziomie 75 kg N i 7 kg N/ha/rok dla dawki 115 kg N. Jedynie na pyłach zwykłych, przy zwiększonej dawce nawożenia spadek poziomu mineralizacji nie nastąpił.

Tabela 13. Mineralizacja azotu w glebie pod uprawa wierzby wiciowej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	25	66	87	91	101	106	104	96	102	116	89
Pył zwykły	39	84	116	123	136	139	148	145	156	164	125
Glinna lekka	15	37	46	45	50	49	51	48	50	56	45
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	30	81	107	115	130	135	139	132	140	156	117
Pył zwykły	43	99	138	148	168	170	187	187	203	221	156
Glinna lekka	15	44	55	55	61	60	63	60	63	69	54

Nieco odmiennie od zawartości azotu mineralnego w glebie jest gromadzeni węgla pod uprawa wierzby. W przypadku tego procesu to właśnie w pierwszym roku uprawy poziom sekwestrowanego węgla jest najwyższy i maleje w kolejnych latach (Tab. 14).

Tabela 14. Sekwestracja węgla w glebie pod uprawą wierzby wiciowej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t C/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	2,7	2,4	2,0	1,8	2,4	1,7	1,2	0,6	1,6	0,6	1,7
Pył zwykły	1,9	1,6	1,3	1,7	1,9	2,0	1,4	1,1	1,6	0,8	1,5
Glinna lekka	1,1	0,8	0,5	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	-0,1	0,5
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	3,4	3,0	2,6	2,6	3,0	2,5	1,9	1,3	2,2	0,6	2,3
Pył zwykły	2,5	2,1	1,7	2,4	2,4	2,8	2,1	1,9	2,2	1,6	2,2
Glinna lekka	1,4	1,1	0,8	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,3	0,1	0,7

Największy poziom sekwestracji według modelu DNDC wystąpił na piasku gliniastym i wyniósł on w pierwszym roku symulacji 2,7 t C/ha/rok – przy niższej dawce nawożenia oraz 3,4 t C/ha/rok przy wyższej dawce nawożenia. Z kolei najmniejsza ilość akumulowanego węgla była na glinach lekkich, gdzie sekwestracja w pierwszym roku była na poziomie 1,1 t C/ha/rok – przy mniejszym nawożeniu oraz 1,4 t C/ha/rok, przy zwiększonym nawożeniu. We wszystkich analizowanych przypadkach najmniejsza sekwestracja była w ostatnim analizowanym roku 2007. W tym roku wystąpił też jedyny przypadek, gdzie sekwestracja nie nastąpiła wcale, a nawet wystąpił ujemny bilans węgla (-0,1 t C/ha/rok) na glinach lekkich przy mniejszym poziomie dawki nawożenia.

Wielkość emisji gazów cieplarnianych oszacowana przy użyciu modelu DNDC dotyczy trzech gazów: dwutlenku węgla (CO₂), podtlenku azotu (N₂O) i metanu (CH₄). Model ponadto podaje wielkości ogółem dla wszystkich gazów. Wartości te zostały przeliczone na ekwiwalent CO₂ w celu łatwego porównania.

Podczas uprawy wierzby energetycznej największy udział w emisji gazów cieplarnianych ma podtlenek azotu (N₂O). Wartości tej emisji w postaci ilości azotu są niewielkie i tylko w jednym przypadku przekraczają wartość 1 kg N/ha/rok (Tab. 9).

Tabela 15. Wielkość emisji podtlenku azotu (N₂O) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg ekwiwalentu CO₂/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	19	24	29	24	39	49	34	34	54	54	36
Pył zwykły	49	68	88	161	136	161	127	127	253	263	143
Glinna lekka	88	63	151	180	175	88	132	122	112	83	119
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	24	44	39	39	54	136	54	63	102	88	64
Pył zwykły	58	107	122	244	200	248	209	248	614	414	246
Glinna lekka	117	107	268	312	365	166	214	200	195	117	206

Jak wiadomo gaz ten posiada jeden z największych potencjałów tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) i po przeliczeniu tych wartości na ekwiwalent CO₂ emitowanego do atmosfery wartości te wzrastają do kilkuset kg CO₂-ekwiwalentu/ha/rok (Tab. 15). W okresie 1998-2007 największa emisja podtlenku azotu notowana była na pyłach zwykłych i wyniosła 143 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok – przy mniejszym nawożeniu, oraz 246 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok – przy zwiększonej dawce nawożenia. Emisja N₂O o podobnych rzędach wielkości była również na glinach lekkich (119 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok- przy mniejszym nawożeniu, 206 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok – przy dawce nawożenia zwiększonej). Dużo mniejsze wartości N₂O były na piaskach gliniastych i wyniosły odpowiednio: 36 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok oraz 64 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Na glebach tych emisja N₂O wzrastała w każdym roku, zaś na glinach lekkich wzrost ten następował do 2002 roku a w następnym roku jego wielkość spadła o połowę, niezależnie od wielkości nawożenia. W kolejnym roku nastąpił ponowny wzrost emisji N₂O, a następnie systematyczny spadek, aż do 2007 roku. W przypadku pyłów zwykłych wzrost emisji podtlenku azotu następował do 2003, po czym przez kolejne dwa lata nieznacznie spadł, a w 2006 roku odnotowano bardzo duży wzrost wartości

emitowanego N₂O. Przy mniejszej dawce nawożenia wzrost ten utrzymał się w kolejnym roku, zaś w przypadku dawki zwiększonej nastąpił kolejny znaczący spadek tej wartości.

W przypadku kolejnego gazu, jakim jest metan (CH₄) różnice wystąpiły pomiędzy poszczególnymi rodzajami gleb, natomiast nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy wielkością dawek nawożenia (Tab. 16).

Tabela 16. Wielkość emisji metanu (CH₄) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg ekwiwalentu CO₂/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	-9	-11	-13	-13	-15	-15	-15	-15	-17	-17	-14
Pył zwykły	-23	-25	-26	-24	-28	-27	-25	-26	-27	-27	-26
Glinna lekka	-17	-18	-19	-18	-20	-18	-19	-19	-20	-20	-19
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	-9	-11	-13	-14	-17	-16	-17	-18	-19	-20	-15
Pył zwykły	-23	-25	-26	-24	-28	-27	-26	-26	-28	-28	-26
Glinna lekka	-17	-18	-20	-18	-21	-20	-19	-20	-21	-20	-19

Wszystkie wartości podane przez model są wartościami ujemnymi, co oznacza, że podczas produkcji wierzby nie następuje emisja metanu. Najkorzystniejsze warunki pod względem ograniczenia wielkości emisji metanu występują na pyłach zwykłych, średnio -26 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok, co oznacza że taka ilość może zostać zaabsorbowana przez glebę. Najmniejsze ograniczenie występuje natomiast na piaskach gliniastych (średnio około -14 - -15 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok). Analizując wielkość tych wartości w poszczególnych latach zauważa się wzrost wielkości pochłaniania CH₄ w kolejnych latach uprawy wierzby. Największy wzrost w ciągu dziesięciu lat przeprowadzonych symulacji wystąpił na piaskach gliniastych (o 11 kg CO₂

ekwiwalentu/ha/rok), najmniejszy zaś na glinach lekkich (o 3 kg CO₂ ekwiwalentu/ha/rok).

Kolejnym gazem powodującym efekt cieplarniany jest dwutlenek węgla (CO₂). Według wyliczeń modelu DNDC wystąpiły wyraźne różnice pomiędzy poszczególnymi glebami, jak i dawkami nawożenia (Tab. 17). Wszystkie wartości podane przez model jako wartości ujemne oznaczają, że podczas uprawy wierzby nie następuje emisja do atmosfery CO₂. Wartości podane przez model jako wartości dodatnie podają wielkość emitowanego CO₂ związanego z uprawą wierzby.

Tabela 17. Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO₂) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t ekwiwalentu CO₂/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	-9,7	-8,8	-7,4	-6,5	-8,6	-6,2	-4,3	-2,2	-6,0	-2,1	-6,2
Pył zwykły	-6,8	-6,0	-4,8	-6,1	-6,9	-7,3	-5,1	-4,0	-6,0	-2,8	-5,6
Glinna lekka	-3,9	-3,0	-2,0	-2,5	-2,3	-2,0	-1,5	-1,2	-0,7	0,2	-1,9
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	-12,5	-11,2	-9,5	-9,5	-11,1	-9,0	-6,8	-4,8	-8,2	-2,1	-8,5
Pył zwykły	-9,2	-7,8	-6,3	-8,7	-8,8	-10,1	-7,6	-6,9	-7,9	-6,0	-7,9
Glinna lekka	-5,2	-4,1	-3,0	-3,4	-3,1	-2,8	-2,2	-2,0	-1,1	-0,2	-2,7

Największą zdolność do ograniczenia emisji CO₂ ma uprawa wierzby wiciowej na piaskach gliniastych, średnio 6,2 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok, przy nawożeniu 75 kg N oraz 8,5 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok, przy nawożeniu 115 kg N. Podobne wartości uzyskano dla pyłów zwykłych, odpowiednio 5,6 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok oraz 7,9 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Analizując wielkości ograniczenia emisji w kolejnych latach można zauważyć, że w pierwszych pięciu latach (od 1998 do 2002 roku) większe zdolności ograniczania emisji notowane są na plantacjach zlokalizowanych na piaskach gliniaste niż pyłach zwykłych, zaś od 2003 roku sytuacja ulega odwróceniu.

Dzieje się tak niezależnie od wielkości dawek nawożenia. Zdecydowanie najmniej korzystne warunki ograniczania emisji CO₂ występują na glinach lekkich. Przy nawożeniu 75 kg N średnia wartość wynosi 1,9 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok, zaś przy dawce 115 kg N - 2,7 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Na tym gatunku gleby w ostatnim analizowanym roku (2007), przy mniejszej dawce nawożenia uzyskano wartość z dodatnim znakiem 0,2 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Był to jedyny przypadek w ciągu analizowanych lat. Oznacza to, że w tym roku nie wystąpiło ograniczenie emisji, a nastąpiła natomiast emisja CO₂ z uprawy wierzby.

Na podstawie symulacji modelu DNDC otrzymano także wartość netto emisji gazów cieplarnianych na uprawach wierzby. Największe zdolności do ograniczenia emisji występują więc na piaskach gliniastych i pyłach zwykłych, najmniejsze zaś na glinach lekkich (Tab. 18).

Tabela 18. Wielkość emisji gazów cieplarnianych netto z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t ekwiwalentu CO₂/ha/rok)

Rok	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Średnia
Rodzaj gleby	Nawożenie 75 kg N										
Piasek gliniasty	-9,7	-8,8	-7,4	-6,5	-8,6	-6,2	-4,3	-2,1	-6,0	-2,1	-6,2
Pył zwykły	-6,8	-5,9	-4,7	-6,0	-6,8	-7,2	-5,0	-3,9	-5,7	-2,5	-5,5
Glinna lekka	-3,8	-2,9	-1,9	-2,3	-2,2	-1,9	-1,4	-1,1	-0,6	0,3	-1,8
Rodzaj gleby	Nawożenie 115 kg N										
Piasek gliniasty	-12,5	-11,1	-9,5	-9,5	-11,1	-8,9	-6,8	-4,8	-8,1	-2,1	-8,4
Pył zwykły	-9,2	-7,7	-6,2	-8,5	-8,6	-8,6	-7,4	-6,7	-7,3	-5,6	-7,6
Glinna lekka	-5,1	-4,1	-2,7	-3,1	-2,8	-2,7	-2,0	-1,9	-0,9	-0,1	-2,5

W przypadku mniejszej dawki nawożenia (75 kg N) średnia wartość ograniczenia wielkości emisji gazów cieplarnianych na piaskach gliniastych wyniosła 6,2 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok, pyłach zwykłych 5,6 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok i glinach lekkich 1,9 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Podobnie jak w przypadku emisji CO₂ w 2007 roku na glinie lekkiej, przy dawce nawożenia

75 kg N wystąpiła emisja gazów cieplarnianych do atmosfery i wyniosła ona 0,3 t CO₂ ekwiwalentu/ha/rok. Poza tym pojedynczym przypadkiem na wszystkich glebach, przy różnych dawkach nawożenia, wystąpiło ograniczenie wielkości emisji gazów cieplarnianych z uprawy wierzby energetycznej. Największy potencjał do ograniczania emisji, a tym samym zatrzymywania, mineralizowania i gromadzenia pierwiastków w glebie występował w pierwszych sześciu latach prowadzonych symulacji. W kolejnych latach następowało zmniejszanie się tych potencjalnych możliwości.

5. Dyskusja

Od wielu już lata działania Unii Europejskiej prowadzone są w kierunku zwiększania produkcji energii z odnawialnych źródeł energii, w tym z biomasy roślinnej. W literaturze często pojawia się stwierdzenie, że wysoki odsetek gruntów ornych odłogowanych i ugorowanych może być wykorzystany do produkcji biomasy (Szczukowski i in. 2000, Szczukowski i in. 2005, Jasiulewicz, Kiełczewski 2006, Jasiulewicz 2007, Jasiulewicz 2007a). Nie zawsze jednak są to grunty o korzystnych warunkach do zakładania plantacji roślin energetycznych.

Oszacowane wielkości produkcji wierzby wiciowej z przeznaczeniem na cele energetyczne oraz ocenę wpływu tej produkcji na środowisko trudno jest porównywać z innymi wynikami, gdyż do tej pory nikt nie prowadził badań z tego zakresu w rejonie Kanału Wieprz-Krzna. Wstępny szacunek powierzchni gruntów dostępnych do produkcji biomasy przedstawiono w „Wojewódzkim Programie Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego” opracowanym przez Biuro Planowania Przestrzennego w Lublinie w 2004 roku. Podana tam powierzchnia terenów korzystnych do rozwoju energetyki z biomasy w rejonie Kanału Wieprz-Krzna to ponad 55 tys. ha. Zastosowane kryteria do wydzielenia tych obszarów były inne od przyjętych w badaniach własnych. Jako obszary preferowane do rozwoju upraw energetycznych wybrane zostały gminy z wysokim odsetkiem gruntów ugorowanych i odłogowanych, gminy z nadwyżką produkcji siana oraz gminy z nadwyżką produkcji słomy. Ponadto w województwie lubelskim wyznaczone zostały strefy dla rozwoju upraw energetycznych o dużych i małych wymaganiach glebowych. Powyższe kryteria odnoszą się ogólnie do produkcji wszystkich roślin, których biomasa może być wykorzystana na cele energetyczne, nie tylko do spalania, ale także produkcji biogazu oraz biopaliw. Wydaje się, że zastosowanie jednakowych kryteriów do wydzielenia obszarów przydatnych do uprawy tak różnych roślin, jak wierzba, kukurydza czy rzepak nie jest dobrym podejściem. Zastosowanie takiej metodyki nie pozwala na wyznaczenie obszarów spełniających wymagania siedliskowe poszczególnych gatunków roślin.

Użycie uszczegółowionej metodyki w badaniach własnych pozwoliło wyszacować powierzchnie gruntów przydatnych do uprawy wierzby w rejonie Kanału Wieprz-Krzna na niecałe 26 tys. ha, tj. 18% terenu badań. Wyniki te można także przedstawić na tle danych publikowanych dla Polski czy też województwa lubelskiego. Jadczyszyn i inni (2008) podają, że potencjalna powierzchnia uprawy wierzby na cele energetyczne w Polsce to ponad 954 tys. ha, co stanowi 4,6% użytków rolnych. Dla województwa lubelskiego powierzchnie tą autorzy oszacowali na ponad 68 tys. ha, co stanowi 3% użytków rolnych województwa. Grunty przydatne do uprawy wierzby w rejonie Kanału Wieprz-Krzna stanowią 38%, które mogłyby być wykorzystane do uprawy tej rośliny w województwie lubelskim. Osiągnięcie 14% udziału odnawialnej energii w roku 2020 w bilansie energii pierwotnej (wg Strategii energetyki odnawialnej 2002) wymagałoby założenia wieloletnich plantacji roślin energetycznych na powierzchni 660 tys. ha. Zapewniłoby to pokrycie zapotrzebowania na biomasę przeznaczoną na paliwa stałe (Faber, Kuś 2007). Należy zapewnić jeszcze grunty do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji biopaliw płynnych. Potencjalną powierzchnie do uprawy roślin energetycznych dla Polski Faber (2008) szacuje na poziomie około 1 mln ha. Fischer i inni (2005) dokonali oszacowania wielkości obszarów bardzo korzystnych, korzystnych i średnio korzystnych do uprawy topoli, wierzby i miskanta na podstawie mapy użytkowania CORINE LAND COVER. Dla obszaru Polski obszary korzystne do uprawy tych roślin to ponad 2 mln ha. Autorzy tereny te szacowali z wyłączeniem terenów leśnych, zabudowy oraz gruntów o wysokiej przydatności do uprawy zbóż. W porównaniu do innych krajów wschodniej Europy więcej terenów korzystnych znajduje się jedynie w Rumuni, ponad 3 mln ha. Najmniejsze powierzchnie terenów korzystnych są natomiast na Słowacji (0,14 mln ha), w Estonii (0,35 mln ha) i Bułgarii (0,38 mln ha).

Za główny czynnik ograniczający uprawę roślin energetycznych, w tym wierzby, Faber (2008) podaje niekorzystne warunki wodne. Z tego względu obszar centralnej Polski nie posiada korzystnych warunków do zakładania wieloletnich plantacji roślin energetycznych (Faber 2005). Okolice Kanału Wieprz-Krzna również nie posiadają najlepszych warunków wodnych, szczególnie pod względem głębokości zalegania wody gruntowej. Biorąc pod

uwagę fakt, że plantacje wierzby mogą przyczyniać się do obniżenia głębokości zalegania wód gruntowych nawet o 1 m i zmniejszenie ich zasilania przez wody opadowe (Faber 2008) problem ten powinien być szczegółowy analizowany przed założeniem plantacji. Jest to szczególnie istotne ze względu na pojawianie się w ostatnich latach coraz częstszych susz, a co się z tym wiąże niekorzystnego, ujemnego klimatycznego bilansu wodnego (Górski 2006, Kędziora 2005).

Ważnym elementem związanym z opłacalnością produkcji biomasy jest wielkość uzyskiwanych plonów. Wielkość plonu oszacowana za pomocą modelu DNDC dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna wyniosła zależnie od rodzaju gleby średnio 8 – 10 t s.m/ha/rok przy niższym nawożeniu i 10 – 14 t s.m/ha/rok przy większej dawce nawożenia. Wielkość tych plonów nie odbiega znacząco od wielkości plonów podawanych w literaturze. W doświadczeniach polowych prowadzonych w latach 1996 – 1999, na które powołuje się Kisiel i współautorzy (2003) przy jednorocznym cyklu zbioru średni uzyskany plon wahał się od 12,8 do 16,7 t s.m/ha/rok, w zależności od gęstości obsady roślin. Średnia wielkość plonu wynosi zatem 14,8 t s.m/ha/rok. Jeżowski w 2003 roku podaje natomiast, że średni plon wierzby mieści się w granicach 8 – 12 t s.m/ha/rok, a początek pełnego plonowania następuje dopiero po 3 – 4 latach uprawy. Wielkość plonów wierzby zależy także od częstotliwości zbioru pędów, najmniejsze plony suchej masy uzyskiwane są przy corocznych zbiorach. Jak podaje Szczukowski i Tworkowski (2005) w swoich doświadczeniach, prowadzonych na madzie ciężkiej, okresowo nadmiernie uwilgotnionej, przy corocznym zbiorze uzyskali plon 14,9 t s.m/ha, przy zbiorze co dwa lata plon wzrósł do 16,1 t s.m/ha, zaś ze zbiór pędów trzyletnich uzyskali plon 21,6 t s.m/ha. Różnice związane z wielkością uzyskiwanych plonów spowodowane są różnymi warunkami glebowymi. Kalembasa i współpracownicy (2006) doświadczenia z wierzba prowadziła na glebie o składzie granulometrycznym piasku gliniastego lekkiego, dodatkowo wykorzystując różne klony. W obiektach kontrolnych, bez stosowania nawożenia plon suchej masy w zależności od klonu w pierwszym roku uprawy wyniósł od 0,7 do 5,0 t s.m/ha. W kolejnych dwóch latach uprawy plony były większe i w trzecim roku wyniosły od 7,8 do 25,1 t s.m/ha w zależności od klonu. Zastosowanie nawożenia azotem w różnych dawkach powodowało wzrost plonu, w niektórych przypadkach nawet o 10 t s.m/ha. Inne wyniki odnośnie plonowania

otrzymano dla wierzby uprawianej na glebie biellicowej, o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (Kalembasa i in. 2006). Średnio dla różnych klonów wierzby, w zależności od wielkości dawek nawożenia azotem, otrzymano plony w wielkości od 7 do 11 t s.m/ha w drugim roku uprawy oraz od 13 do 21 t s.m/ha w czwartym roku uprawy. Różnice w wielkości plonu pomiędzy poszczególnymi klonami dochodziły nawet do 10 t s.m/ha. W doświadczeniach prowadzonych na glebie kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego o klasie bonitacyjnej IIIb (Szczukowski i in. 2005) plon suchej masy jednorocznych pędów wyniósł średnio 16,1 t s.m/ha. W zależności od klonu wierzby plon wahał się od 13 do 19 t s.m/ha. W doświadczeniu tym autorzy wykazali także zależność wielkości plonu od obsady roślin. Zwiększenie obsady z 20 do 40 tys. roślin/ha powodował wzrost plonu od około 1 do 2 t s.m/ha w zależności od klonu.

W pracy van Dam i inni (2007) oszacowali wielkości plonów roślin energetycznych dla poszczególnych krajów Europy Środkowo-Wschodniej z podziałem na grunty o bardzo korzystnych, korzystnych, średnio korzystnych i marginalnie korzystnych warunkach z uwzględnieniem różnych systemów produkcji. Wierzba najwyżej plonowała na gruntach najbardziej korzystnych i w systemie uprawy wysoko nakładowym oraz zaawansowanym technologicznie. Uzyskiwano tam plony wielkości 19,6 t s.m/ha/rok. Przy tej samej technologii uprawy, ale na gruntach średnio korzystnych plony były mniejsze o 10 t, zaś na gruntach najslabszych o około 16 t. W technologii tej najwyższe plony, ponad 20 t s.m/ha/rok uzyskano w Bułgarii. Wierzba w warunkach Polski najniżej plonowała w tradycyjnym systemie uprawy. Na glebach o najkorzystniejszych warunkach uzyskano u nas plon w wysokości 10,6 t s.m/ha/rok, zaś na glebach średnio korzystnych plon był o połowę niższy. Na gruntach marginalnych wielkość plonu nie przekraczała 2 t s.m/ha/rok. W tym systemie uprawy podobne wielkości plonów uzyskano w Rumunii. W systemie produkcji ekologicznej natomiast plony były o 1 – 2 tony większe niż w systemie tradycyjnym.

Podobną klasyfikację gruntów pod względem przydatności do uprawy roślin energetycznych (grunty bardzo korzystne, korzystne, średnio korzystne i marginalnie korzystne) zastosowali w swojej pracy Fischer i in. (2005). Dla każdej klasy gruntów oszacowali wielkość możliwych do uzyskania plonów

na terenie wschodniej Europy. Na gruntach najlepszych wielkość potencjalnego plonu to od 13,8 do 18,1 t s.m/ha/rok, na gruntach korzystnych wartości te wynoszą 11,0 – 13,1 t s.m/ha/rok, średnio korzystnych 7,3 – 8,4 t s.m/ha/rok. Na gruntach najslabszych wielkość potencjalnego plonu autorzy oszacowali na poziomie 3,9 – 4,8 t s.m/ha/rok.

Ericsson i in. (2006) w swojej pracy podali, że możliwy do uzyskania plon wierzby na glebach o średnio korzystnych właściwościach w Polsce to 5,2 t s.m/ha/rok, przy pierwszym zbiorze po czterech latach uprawy. W kolejnych latach jeżeli zbiory będą dokonywane w cyklu trzyletnim uzyskany plon autorzy szacują na 9 t s.m/ha/rok.

Plony w wysokości 10-12 t s.m/ha/rok w zależności od klonu wierzby uzyskali, w doświadczeniach prowadzonych na terenie południowej Finlandii, na glebie mineralnej Tahvanainen i Rytkonen (1999).

Wzrost wielkości plonowania wierzby wraz ze wzrostem nawożenia azotem uzyskała Kalembasa i współpracownicy (2006) prowadzący badania nad zależnością plonowania od wielkości nawożenia azotowego osadami ściekowymi. Obiekty doświadczalne nawozili osadem ściekowym w dawkach zawierających 100, 150 i 200 kg N/ha, dodatkowo obiekty te nawozili mocznikiem – 50 kg N/ha. Badania prowadzili dla dwóch klonów wierzby, ale w każdym przypadku największy plon uzyskiwali na obiektach nawożonych największą dawką azotu (200 kg N/ha). Wraz ze wzrostem dawki nawożenia wzrastała także zawartość azotu w pędach wierzby. W wynikach uzyskanych dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna wraz ze wzrostem dawki nawożenia azotem także wzrastała wielkość pobrania tego składnik przez rośliny. Można zatem sądzić, że następował także wzrost zawartości azotu w pędach wierzby wiciowej. Badania prowadzone przez Kalembasa i współpracowników (2006) potwierdzają także możliwość wykorzystania osadów ściekowych do nawożenia wierzby wiciowej. W literaturze spotyka się też zastosowanie wierzby, jako filtru przy oczyszczaniu ścieków oraz do bioremediacji pól zanieczyszczonych metalami ciężkimi (Dimitriou, Aronsson 2004, Ericsson i in. 2006, Nilsson i in. 2006).

Zastępowanie paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii, między innymi biomasa, prowadzi do ograniczenia emisji do atmosfery gazów cieplarnianych (Grogan, Matthews 2002, Jorgensen i in. 1997, Kisiel i in. 2003,

Nilsson 2006, Styles, Jones 2008). Uprawy roślin energetycznych, w tym wierzby, umożliwia zwiększenie sekwestracji węgla w glebie, co powoduje zmniejszenie wielkości emisji CO₂ do atmosfery. Jest to jeden z procesów przeciwdziałających zmianom klimatu. Według Volk i inni (2004) sekwestracja węgla w glebie na poziomie 0,25 t C/ha/rok pozwala określić spalanie rośliny jako neutralne dla środowiska pod względem emisji gazów cieplarnianych. Na podstawie modelu DNDC ilość sekwestrowanego węgla w rejonie Kanału Wieprz-Krzna wynosi od 0,5 do 1,7 t C/ha/rok w zależności od rodzaju gleby przy mniejszej dawce nawożenia. Można zatem przyjąć, że uprawa wierzby wiciowej w rejonie Kanału nie ma negatywnego wpływu na środowisko pod względem emisji gazów cieplarnianych.

Wielkości sekwestrowanego węgla oszacowane za pomocą modelu DNDC są porównywalne z wynikami otrzymanymi przez innych autorów. Według danych Lal (2007) potencjał sekwestracji węgla w glebach użytkowanych rolniczo wynosi od 0,3 do 0,5 t C/ha/rok. Potencjalna wielkość sekwestracji węgla na gruntach rolniczych pod uprawami roślin energetycznych w Europie oszacowana została na poziomie 0,6 t C/ha/rok (Freibauer i in. 2004). Grogan i Matthews (2002) poziom sekwestracji węgla w glebie pod uprawą wierzby określili na poziomie 0,4 t C/ha/rok.

Levey i in. (2007) przy wykorzystaniu modelu DNDC oszacowali wielkość emisji gazów cieplarnianych oraz sekwestracji węgla w glebie dla użytków zielonych w Europie. Według tych autorów łąki na obszarze Polski mogą zatrzymać w glebie około 0,3 – 0,5 t C/ha/rok.

Badania na temat wykorzystania wierzby oraz miskanta do produkcji energii cieplnej oraz związanej z tym emisji gazów cieplarnianych prowadzone były w Irlandii (Styles, Jones 2008). Autorzy tych badań określili maksymalny potencjał sekwestracji węgla w glebie pod uprawą roślin energetycznych na poziomie 1,8 t C/ha/rok dla wierzby i ponad dwukrotnie wyższy dla miskanta.

Gazem cieplarnianym o największym współczynniku cieplnym, emitowanym do środowiska z terenów rolniczych jest podtlenek azotu (N₂O). Według modelu DNDC wielkość emisji tego gazu z uprawy wierzby w zależności od wielkości nawożenia wynosi od 36 do 206 kg ekwiwalentu CO₂/ha/rok.

Wielkość ta jest porównywalna z ilością emitowanego N_2O z użytków zielonych w Polsce, oszacowaną także na podstawie modelu DNDC (Levey i in. 2007).

Ten sam model został użyty do oszacowania wielkości N_2O na glebach intensywnie użytkowanych rolniczo (Beheydt i in. 2007). Otrzymane przez tych autorów wielkości to 0,5 – 42,6 kg N_2O -N/ha/rok. Badania prowadzone nad wielkością emisji N_2O z uprawy jęczmienia jarego na glinie piaszczystej wykazały, że znacząco wyższą emisję tego gazu w uprawie konwencjonalnej niż uprawie zredukowanej i siewie bezpośrednim (Chatskikh, Olesen 2007).

Według Jorgensena i in. (1997) wielkość emisji N_2O z gleb użytkowanych rolniczo odpowiada ilościowo 0,5 – 1,5% dawki nawożenia azotem. Badanie te były prowadzone dla miskanta oraz żyta.

Wielkość emisji N_2O z uprawy wierzby wiciowej według Rebelo de Mira i Kroeze (2006) zależy przede wszystkim od wielkości nawożenia, częstości zbioru, rodzaju gleby oraz wielkości plonu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że przy zastosowaniu dawki nawożenia 120 kg N/ha/rok i przy pięcioletnim cyklu zbioru większa emisja N_2O będzie na glebach organicznych niż mineralnych o około 40%.

W badaniach własnych nie stwierdzono emisji CH_4 z uprawy wierzby. Podobny wynik otrzymali autorzy prowadzący badania nad użytkami zielonymi dla Europy oraz Polski przy wykorzystaniu modelu DNDC (Levy i in. 2007). Duża emisja CH_4 związana jest z produkcją trzody chlewnej i bydła oraz użytków zalewanych wodą (gleba w warunkach redukcyjnych). Przy tego typu produkcji emisja metanu może wynieść nawet około 1 tC/ha/rok.

Według Rebelo de Mira i Kroeze (2006) użycie wierzby do produkcji energii nie zawsze jest korzystniejsze dla środowiska w porównaniu z użyciem paliw kopalnych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że znaczący wzrost emisji gazów cieplarnianych następuje w przypadku wierzby uprawianej na glebie organicznej, przy zastosowaniu nawożenia powyżej 120 kg N/ha/rok oraz stosunkowo długim okresie zbioru (średnio co 4 – 5 lat).

Wyznaczenie obszarów przydatnych do uprawy roślin energetycznych wymaga uwzględniania co najmniej kilku charakterystyk środowiska. Większa ilość informacji pozwala na uzyskanie bardziej szczegółowej informacji zwrotnej. W celu powiązania ze sobą baz danych o różnej tematyce oraz wybierania z nich

pojedynczych informacji został użyty w pracy System Informacji Geograficznej. Pozwala on po wprowadzeniu baz danych na szybkie wydzielenie obszarów spełniających zadane kryteria. Podobny model został wykorzystany do wyznaczenia obszarów potencjalnie przydatnych do uprawy wierzby i ślazuwca pensylwańskiego na cele energetyczne w Polsce przez Jadczyzna i in. (2008). Po wprowadzeniu do systemu baz danych, które stanowiły mapy różnej treści, autorzy otrzymali mapy przedstawiające obszary korzystne do uprawy danej rośliny.

Nieco inne podejście do tego zagadnienia zaprezentowali w swojej pracy Ostrowski i Gutkowska (2008). Do wyznaczenia obszarów korzystnych do uprawy poszczególnych roślin energetycznych zastosowali model diagnostyczny, którego podstawę stanowiła tabela relacyjna. Autorzy założyli, że tak zbudowany model pozwoli na zbudowanie algorytmów, za pomocą których typowane będą grunty przydatne do uprawy roślin energetycznych z zastosowaniem technik komputerowych.

Podobne założenia jak w badaniach własnych zastosowali Voivontas i in. (2001) do oszacowania potencjału biomasy do produkcji energii. W oparciu o system GIS zbudowany został model warstwowy, gdzie poszczególne warstwy zawierały informacje charakteryzującą badany obszar. Model ten działał jako system wspomagania decyzji przy produkcji roślin na cele energetyczne.

W oparciu o system informacji geograficznej opracowany został model do szacowania potencjalnej ilości produkowanej biomasy pochodzącej z roślin energetycznych na terenie wybranych obszarów Stanów Zjednoczonych (Graham i in. 2000). System ten zawiera kilka „submodeli”, które umożliwiają między innymi wskazanie obszarów korzystnych do uprawy danej rośliny, określenie wielkości możliwych do uzyskania plonów oraz wskazanie rejonów w których produkcja ta jest opłacalna pod względem ekonomicznym. Warstwą wynikową tego systemu, podobnie jak w innych modelach opartych o GIS, są mapy przedstawiające uzyskane wyniki.

6. Wnioski

1. Zdjęcia lotnicze umożliwiają wykonanie szybkiej klasyfikacji użytkowania terenu. Wykonanie tego procesu za pomocą klasyfikacji nienadzorowanej pozwala opracować mapę użytkowania terenu i wyznaczyć obszary potencjalnie przydatne.
2. Systemy Informacji Geograficznej oraz istniejące cyfrowe bazy danych o środowisku umożliwiają wskazanie obszarów przydatnych do uprawy roślin energetycznych.
3. Gleby przydatne do uprawy wierzby wiciowej w rejonie badań zajmują powierzchnie 49 tys. ha, ale produkcja może być prowadzona tylko na obszarze 28 tys. ha ze względu na różne ograniczenia.
4. Wierzba w rejonie badań nie może być uprawiana na obszarach chronionych oraz tam gdzie poziom zalegania wody gruntowej jest głębszy niż 2m.
5. Plony możliwe do uzyskania, obliczone przy użyciu modelu DNDC, to 8 – 10 t s.m/ha/rok przy nawożeniu na poziomie 75 kg N/ha/rok w zależności od rodzaju gleby. Przy zwiększonym nawożeniu do 115 kg N/ha/rok plony wynoszą 10 – 14 t s.m/ha/rok.
6. Uprawa wierzby wiciowej daje sekwestrację węgla rzędu 0,5 – 1,7 t C/ha/rok, co sprawia, że wykorzystanie wierzby do spalania jest neutralne dla środowiska pod względem emisji gazów cieplarnianych, gdyż sekwestracja węgla pod uprawą wierzby jest wyższa od 0,25 t C/ha/rok.

7. Wykaz piśmiennictwa

1. ArcView GIS. Podręcznik użytkownika. 1997. Environmental Systems Research Institute
2. Beheydt D., Boeckx P., Sleutel S., Li C., Van Cleemput O., 2007: Validation of DNDC for 22 long-term N₂O field emission measurements. Atmospheric Environment, 41, 6196-6211
3. BIOSIT. GIS based methodology and algorithm. Release 1.0. The handbook. ETA Renewable Energies - September 2003, Florence, Italy, <http://www.etaflorence.it/biosit>
4. Börjesson P. I., 1996: Emissions of CO₂ from biomass production and transportation in agriculture and forestry. Energy Convers. Mgmt vol. 37, 1235-1240
5. Chatskikh D., Olesen J. E., 2007: Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. Soil & Tillage Research 97, 5-18
6. Crutzen P. J., Mosier A. R., Smith K. A., Winiwarten W., 2008: N₂O release from agrobiofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmos. Chem. Phys., 8, 386-395
7. Dimitriou I., Aronsson P., 2004: Nitrogen leaching from short-rotation willow coppice after intensive irrigation with wastewater. Biomass and Bioenergy 26, 433-441
8. Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Commission of the European Communities. Presented by the Commission, COM(2008) 30 final
9. Dubas J. W., 2006: Przegląd możliwości wykorzystania biomasy wierzbowej oraz najbliższa przyszłość jej zastosowania. Energia Odnawialna, nr 2/3, 31-36
10. Dubas J., W. 2003: Wierzba. [w:] Kościak B. (red.), Rośliny energetyczne. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin, 57-78
11. Dziennik Ustaw nr 92 poz. 880 z dnia 30 kwietnia 2004 roku

12. Elowson S., 1999: Willow as a vegetation filter for clearing of polluted drainage water from agricultural land. *Biomass and Bioenergy* 16, 281-290
13. Energia ze źródeł odnawialnych w 2007 roku. GUS, Warszawa 2008
14. ERDAS Field Guid. Przewodnik geopatyczny. 1998. ERDAS Inc. Atlanta. USA. Wydanie polskie GEOSYSTEMS, Warszawa
15. Ericsson K., Rosenqvist H., Ganko E., Pisarek M., Nilsson L., 2006: An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass and Bioenergy* 30, 16-27
16. Faber A., 2001: Emisja gazów cieplarnianych oraz retencjonowanie węgla przez rolnictwo. *Fragmenta Agronomica* 4(72), 102-117
17. Faber A., 2005: Potencjał uprawy roślin energetycznych w Polsce. *Wiś Jutra* 7(84), 21-22
18. Faber A., 2008: Przyrodnicze skutki uprawy roślin energetycznych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, z. 11, 43-52
19. Faber A., Kuś J., 2007: Rośliny energetyczne dla różnych siedlisk. *Wiś Jutra*, nr 8-9(109-110), 11-12
20. Falloon P. D., Smith P., Smith J.V., Szabo J., Coleman K., Marshall S., 1998: Regional estimates of carbon sequestration potential: linking the rothamsted Carbon Model to GIS database. *Biol. Fertil. Soils* 27, 236-241
21. Fischer G., Prieler S., van Velthuizen H., 2005: Biomass potential of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia. *Biomass and Bioenergy* 28, 119-132
22. Freibauer A., Rounsevell M., Smith P., Verhagen J., 2004: Carbon sequestration in the agriculture soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23
23. Gielen D., J., Bos A., J., M., de Feber M., A., Gerlagh T., 1999: Greenhouse gas emission reduction in agriculture and forestry. A Western European system engineering perspective. <http://www.cdmcentral.org/docs/lulucf/05.pdf>
24. Gonet Z., Kozyra J., Kuś J., Madej A., Mizak K., Pudełko R., Stalenga J., 2005: Położenie geograficzne, klimat, gleby i struktura agrarna gminy Korczyna. *IUNG-PIB Puławy*, s. 80

25. Górski T., 2006: zmiany warunków agroklimatycznych i długość okresu wegetacji roślin w ostatnim stuleciu. [w:] Gutry-Korycka M., Kędziora A., Starkiel L., Ryszkowski L. (red.) Długookresowe przemiany krajobrazu Polski w wyniku zmian klimatu i użytkowania ziemi. Poznań
26. Górski T., Zaliwski A., 2002: Model Agroklimatu Polski. Pam. Puł., 130/I, 251-260
27. Grabiński J., Książak J., Nieróbca P., Szeleźniak E., 2006: Uprawa wierzby wiciowej i ślazuwca pensylwańskiego na cele energetyczne. Instrukcja upowszechnieniowa nr 116, Wyd. IUNG-PIB Puławy, s. 57
28. Gradziuk P., 2003: Alternatywne wykorzystanie gruntów rolniczych na cele nie związane z produkcją żywności ze szczególnym uwzględnieniem energetyki. [w:] Kościk B. (red.), Rośliny energetyczne. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin, 9-27
29. Gradziuk P., Grzybek A., Kowalczyk K., Kościk B., 2003: Biopaliwa. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa, s. 160
30. Graham R. L., English B. C., Noon C. E., 2000: A Geographic Information System – based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock. Biomass and Bioenergy 18, 309-329
31. Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values, 2002, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, EPA 430-R-02-003,
[http://www.yosemite.epa.gov/oar/GlobalWarming.nsf/UniqueKeyLookup/SHSU5BUM9T/\\$File/ghg_gwp.pdf](http://www.yosemite.epa.gov/oar/GlobalWarming.nsf/UniqueKeyLookup/SHSU5BUM9T/$File/ghg_gwp.pdf)
32. Grogan P., Matthews R., 2002: A modeling analysis of the potential for soil carbon sequestration under short rotation coppice willow bioenergy plantations. Soil Use and Management 18, 175-183
33. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? European Environment Agency Report, 7/2006
34. IPCC 2000: IPCC special report on Impacts, Adaptation and Vulnerability
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm

35. Jadczyzyn J., Faber A., Zaliwski A., 2008: Wyznaczanie obszarów potencjalnie przydatnych do uprawy wierzby i ślazuca pensylwańskiego na cele energetyczne w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, z. 11, 55-65
36. Jadczyzyn J., Stuczyński T., 2001: zastosowanie pomiarów GPS w rolnictwie. *Pam. Pul. Materiały Konferencji*, 124, 197-210
37. Jasiulewicz M., 2007: Rozwój lokalny w oparciu o biomasę z rolnictwa. *SERIA, Roczniki Naukowe*, t. IX, z. 1, 193-197
38. Jasiulewicz M., 2007a: Wykorzystanie gruntów odłogowanych do produkcji biomasy i stworzenie lokalnych centrów energetycznych. [w:] *Biomasa dla energetyki i ciepłownictwa szanse i problemy*. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa, 122-132
39. Jasiulewicz M., Kiełczewski R., 2006: Założenie plantacji wierzby na gruncie odłogowanym. *Roczniki Naukowe SERIA*, t. VIII, z. 1, 52-56
40. Jeżowski S., 2003: Rośliny energetyczne – produktywność oraz aspekt ekonomiczny, środowiskowy i socjalny ich wykorzystania jako ekobiopaliwa. *Postępy Nauk Rolniczych*, 3, 61 – 73
41. Jorgensen R. N., Jorgensen B. J., Nielsen N. E., Maag M., Lind A. M., 1997: N₂O emission from energy crop fields of *Miscanthus "giganteus"* and Winter Rye. *Atmospheric Environment* vol. 31, no. 18, 2899-2904
42. Jug A., Makeschin F., Rehfuess K.E., Hofmann-Schielle C., 1999: Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects. *Forest Ecology and Management* 121, 85-99
43. Kalembasa D., Malinowska E., Siewniak M., 2006: Wpływ nawożenia na plonowanie wybranych gatunków wierzby krzewiastej, *Acta Agrophysica*, 8(1), 119-126
44. Kalembasa D., Szczukowski S., Cichuta R., Wysokiński A., 2006: Plon biomasy i zawartość azotu w wierzbie (*Salix viminalis*) przy zróżnicowanym nawożeniu azotem. *Pam. Pul.* 142, 171 – 178
45. Keoleian G.A., Volk T.A., 2005: Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 385-406

46. Kędziora A., 2005: Przyrodnicze podstawy gospodarowania wodą w Polsce. [w:] Ryszkowski L., Kędziora A., (red.) Ochrona środowiska w gospodarce przestrzennej. Poznań
47. Kisiel R., Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., 2003: Energochłonność i efektywność energetyczna uprawy wierzby krzewiastej. *Fragmenta Agronomica* 3(79), 87-97
48. Kościk B., Kowalczyk-Juśko A., Kościk K., 2003: Uprawa i wykorzystanie roślin na cele energetyczne. *Pam. Pul.* 132. 203-210
49. Lal R., 2007: Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* 12. 303-322
50. Levy P.E., Mobbs D. C., Jones S.K., Milne R., Campbell C., Sutton M.A., 2007: Simulation of fluxes of greenhouse gases from European grasslands using the DNDC model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 186-192
51. Lorenc H. (red.), 2005: Atlas Klimatu Polski. IMGW, Warszawa, s. 116
52. Łoś M., 1986: Kanał Wieprz-Krzna – warunki powstania, obecny stan, perspektywy rozwoju. *Gospodarka Wodna*, nr 4
53. Łoś M., 1988b: Kształtowanie środowiska w rejonie Kanału Wieprz-Krzna. Część II. *Wiadomości melioracyjne i łąkarskie*, nr 2
54. Łoś M., 2008: Perspektywy rozwoju melioracji i łąkarstwa w warunkach nowej polityki energetycznej. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, nr 1
55. Matthews R. B., Grogan P., 2001: Potential C-sequestration rates under short-rotation coppiced willow and *Miscanthus* biomass crops: a modeling study. *Aspects of Applied Biology* 65. *Biomass and Energy Crops II.* 303-312
56. Nilsson L., Pisarek M., Buriak J., Oniszk-Popławska A., Bućko P., Ericsson K., Jaworski Ł., 2006: Energy Policy and the role of bioenergy in Poland. *Energy Policy* 34, 2263-2278
57. Nonhebel S., 2002: Energy yields in intensive and extensive biomass production systems. *Biomass & Bioenergy* 22, 159-167
58. Ochrona środowiska 2008, GUS, Warszawa 2008

59. Ostrowski J., Gutkowska A., 2008: Model diagnostyczny typowania gruntów przydatnych do uprawy roślin energetycznych. *Problemy Inżynierii Rolniczej* nr 2, 145-152
60. Panichelli L., Gnansounou E., 2008: GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery cost and resources competition between facilities. *Biomass and Bioenergy*, 32, 289-300
61. Polityka energetyczna Polski do 2030 roku (projekt z dnia 2009-03-05). Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, marzec 2009
62. Rebelo de Mira R., Kroeze C., 2006: Greenhouse gas emissions from willow-based electricity: a scenario analysis for Portugal and The Netherlands. *Energy Policy* 34, 1367-1377
63. Rozakis S., Soldatos P. G., Kallivroussis L., Nicolaou I., 2001: Multiple Criteria Analysis of Bio-energy Projects: Evaluation of Bio-Electricity Production in Farsala Plain, Greece. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, vol. 5(1), 49-64
64. Różanowski B., 1993: Czy wierzba zastąpi węgiel? *Ekopartner*, nr 5
65. Smith P., 2004: Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 20, 229-236
66. Stolarski T., 2006: Opłacalność uprawy wierzby na cele energetyczne. *Regionalne Forum energetyki Odnawialnej. Kujawsko-Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Przysiek*, 6 maja 2006, 46-48
67. Strategia rozwoju energetyki odnawialnej, 2000, Ministerstwo Środowiska, Warszawa
68. Stuczyński T. red., 2006: Wdrożenie Zintegrowanego Systemu Informacji o Rolniczej Przestrzeni Produkcyjnej Dla Potrzeb Ochrony Gruntów w Województwie Podlaskim. *Urząd Marszałkowski Województwa Podlaskiego, IUNG-PIB, Puławy – Białystok*, s. 240
69. Styles D., Jones M., B., 2008: Miscanthus and willow heat production-An effective land-use strategy for greenhouse gas emission avoidance in Ireland? *Energy Policy* 36, 97-107
70. Szczukowski S., Budny J., 2003: Wierzba krzewiasta – roślina energetyczna. *Wyd. GPWODR, Olsztyn*, s. 37

71. Szczukowski S., Tworkowski J., 2005: Perspektywy produkcji wierzby wiciowej w Polsce. *Więś Jutra*, 7(84), 28-30
72. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M. J., 2004: Wierzba energetyczna. Wyd. Plantpress, Kraków, s. 46
73. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M. J., 2000: Biomasa krzewiastych wierzb (*Salix sp.*) pozyskiwana na gruntach ornych odnawialnym źródłem energii. *Pam. Puł.* 120/II, 421-428
74. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Grzelczyk M., 2005: Produktywność wierzb krzewiastych pozyskiwanych w jednorocznych cyklach zbioru. *Acta Sci. Pol., Agricultura*, 4(1), 141-151
75. Szczukowski S., Tworkowski J., Wiwart M., Przyborowski J., 2002: Wiklina. Uprawa i możliwości wykorzystania. Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn, s. 60
76. Tahvanainen L., Rytkonen V.-M., 1999: Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy* 16, 103-117
77. User's Guide for the DNDC Model (Version 9.1), 2007, Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, <http://www.dndc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC91.pdf>
78. Użytkowanie gruntów i ich jakość. Powszechny Spis Rolny w 2002 roku, GUS, Warszawa 2003
79. van Dam J., Faaij A. P. C., Lewandowski I., Fischer G., 2007: Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 31, 345-366
80. Voivontas D., Assimacopoulos D., Koukios E. G., 2001: Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. *Biomass and Bioenergy* 20, 101-112
81. Volk T. A., Verwijst T., Tharakan P. J., Abrahamson L. P., White E. H., 2004: Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Front Ecol. Environ.* 2(8), 411-418
82. Wilgat T., 1957: Stosunki geomorfologiczne i hydrograficzne w strefie kanału Wieprz-Krzna. *Przegląd Geograficzny*, t. XXIX, z. 2

83. Wojewódzki Program Rozwoju Alternatywnych Źródeł Energii dla Województwa Lubelskiego. Raport III-Program. Biuro Planowania Przestrzennego, Lublin, 2004
84. Wróbel J., 2006: Wpływ zróżnicowanych warunków glebowych na produktywność wierzby wiciowej (*Salix viminalis*). Energia Odnawialna, nr 2/3, 6-10
85. Zabrocki R., Ignacek G., 2007: Wykorzystanie wierzby energetycznej w gospodarce rolnej. Roczniki Naukowe SERIA, t. IX, z. 3, 234-238
86. Zawadzki S. (red.), 1999: Gleboznawstwo. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 560 s.

Spis rysunków

Rysunek 1. Obszar badań na tle podział administracyjnego województwa lubelskiego _____	22
Rysunek 2. Ukształtowanie powierzchni rejonu Kanału Wieprz-Krzna _____	23
Rysunek 3. Obszary preferowane do rozwoju upraw energetycznych ze względu na udział ugorów i odłogów, ze względu na nadwyżki siana oraz ze względu na nadwyżki słomy _____	25
Rysunek 4. Udział gruntów ornych w gminach rejonu Kanału Wieprz-Krzna, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku _____	26
Rysunek 5. Udział trwałych użytków zielonych w gminach rejonu Kanału Wieprz-Krzna, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku _____	26
Rysunek 6. Odsetek gruntów ornych odłogowanych oraz odsetek trwałych użytków zielonych nieużytkowanych, według danych Powszechnego Spisu Rolnego z 2002 roku _____	27
Rysunek 7. Schemat budowy Systemu Informacji Geograficznej dla rejonu Kanału Wieprz-Krzna _____	29
Rysunek 8. Statyw z zamocowanymi aparatami kamerą ADC Tetracam i Sony DSC – F828 _____	34
Rysunek 9. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna 2 września 2005 roku. Zdjęcie A wykonane kamerą ADC, zdjęcie B wykonane aparatem Sony _____	35
Rysunek 10. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna. Zdjęcia A wykonane podczas pierwszego nalotu 30 lipca 2005, zdjęcie B wykonane 2 września 2005 roku _____	36
Rysunek 11. Zdjęcia wykonane podczas nalotu nad Kanałem Wieprz-Krzna. Zdjęcie A przed ortorektyfikacją, zdjęcie B po ortorektyfikacji _____	37
Rysunek 12. Fragment ortofotomapy z podkładem mapy topograficznej 1 : 50 000 _____	38
Rysunek 13. Fragment mapy topograficznej z zaznaczoną trasą przejazdu oraz punktami kontrolnymi w rejonie badań _____	39
Rysunek 14. Typy gleb w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	44
Rysunek 15. Kompleksy glebowo rolnicze gleb ornych i trwałych użytków zielonych w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	45

Rysunek 16. Obszary o korzystnych warunkach glebowych do uprawy wierzby wiciowej _____	47
Rysunek 17. Obszary prawnie chronione w rejonie Kanału Wieprz-Krzna ____	49
Rysunek 18. Cieki wodne w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	57
Rysunek 19. Poziomy zalegania wody gruntowej w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	59
Rysunek 20. Obszary położone w promieniu 50 km od miejscowości Łęczna w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	61
Rysunek 21. Drogi międzynarodowe oraz krajowe i drogi powiatowe w rejonie Kanału Wieprz Krzna _____	62
Rysunek 22. Roczne sumy opadu atmosferycznego w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie _____	64
Rysunek 23. Średnie miesięczne sumy opadu atmosferycznego w latach 1998 – 2007 (mm) na stacji meteorologicznej we Włodawie _____	65
Rysunek 24. Średnia miesięczna temperatura powietrza na stacji meteorologicznej we Włodawie z wielolecia 1998 – 2006 _____	68
Rysunek 25. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na pięć klas _____	72
Rysunek 26. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na cztery klas _____	73
Rysunek 27. Sklasyfikowane zdjęcie wykonane w podczerwieni (A) oraz zdjęcie RGB (B) z rejonu Kanału Wieprz-Krzna z podziałem na sześć klas _____	74
Rysunek 28. Użytkowanie terenu w północnej części Kanału Wieprz-Krzna __	75
Rysunek 29. Porównanie indeksów wegetacji dla pastwiska, łąki kośnej, ścierniska, nieużytku rolnego i gleby obliczone na podstawie pomiarów punktowych ze zdjęć spektralnych wykonanych kamerą ADC w rejonie Kanału Wieprz-Krzna _____	76

Spis fotografii

Fotografia 1. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Żelizna i Kresy, część północna _____	52
Fotografia 2. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Paszenki, część północna_	52
Fotografia 3. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Borowica, początek Kanału, część południowa _____	53
Fotografia 4. Początek Kanału wieprz-Krzna w Borowicy, część południowa _	53
Fotografia 5. Rozlewisko za wałem Kanału Wieprz-Krzna w okolicach wsi Wola Bielecka, część południowa _____	54
Fotografia 6. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Żelizna, część północna __	54
Fotografia 7. Kanał Wieprz-Krzna w okolicach wsi Pachole, część północna__	55
Fotografia 8. Zdjęcie RGB (wykonane aparatem Sony) poddane procesowi klasyfikacji nienadzorowanej _____	70
Fotografia 9. Zdjęcie wykonane w podczerwieni (wykonane aparatem ADC) poddane procesowi klasyfikacji nienadzorowanej _____	71

Spis tabel

Tabela 1. Miesięczne sumy opadu atmosferycznego na stacji meteorologicznej we Włodawie w latach 1998 – 2007 (mm) _____	66
Tabela 2. Średnia miesięczna temperatura powietrza w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie oraz średnia z lat 1998 – 2006 (°C) _____	67
Tabela 3. Najniższa minimalna temperatura powietrza w poszczególnych miesiącach w latach 1998 – 2007 na stacji meteorologicznej we Włodawie (°C)	69
Tabela 4. Rodzaje gleb w Kanale Wieprz-Krzna na podstawie mapy glebowo rolniczej 1:25 000, IUNG-PIB _____	77
Tabela 5. Płonowanie wierzby wiciowej w okresie 1998 – 2007, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t s.m/ha/rok) _____	78
Tabela 6. Wielkość zbioru wierzby wiciowej dla różnych gleb i przy różnych dawkach nawożenia (t s.m/rok) _____	79
Tabela 7. Wielkość pobrania azotu przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	80
Tabela 8. Wielkości uwalnianego azotu w postaci amoniaku (NH ₃) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	81

Tabela 9. Wielkości uwalnianego azotu w postaci podtlenku azotu (N_2O) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	81
Tabela 10. Wielkości uwalnianego azotu w postaci tlenku azotu (NO) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	82
Tabela 11. Wielkości uwalnianego azotu w postaci azotu cząsteczkowego (N_2) przez rośliny wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	82
Tabela 12. Bilans azotu (N) w glebie pod uprawą wierzby wiciowej, przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	84
Tabela 13. Mineralizacja azotu w glebie pod uprawą wierzby wiciowej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg N/ha/rok) _____	85
Tabela 14. Sekwestracja węgla w glebie pod uprawą wierzby wiciowej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t C/ha/rok) _____	86
Tabela 15. Wielkość emisji podtlenku azotu (N_2O) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg ekwiwalentu CO_2 /ha/rok) _____	87
Tabela 16. Wielkość emisji metanu (CH_4) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (kg ekwiwalentu CO_2 /ha/rok) _____	88
Tabela 17. Wielkość emisji dwutlenku węgla (CO_2) z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t ekwiwalentu CO_2 /ha/rok) _____	89
Tabela 18. Wielkość emisji gazów cieplarnianych netto z uprawy wierzby energetycznej przy różnych dawkach nawożenia według Modelu DNDC (t ekwiwalentu CO_2 /ha/rok) _____	90