

Kraków, 17.09.2026

Dr hab. inż. Wojciech Kraj, prof. URK
Katedra Ochrony Ekosystemów Leśnych
Wydział Leśny
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja
w Krakowie
Al. 29-Listopada 46
31-425 Kraków
email: wojciech.kraj@urk.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Joanny Kopaczyk zatytułowanej

**„Biochemiczne i molekularne podstawy procesu ksylogenezy w siewkach sosny
zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. w warunkach deficytu wody”**

wykonanej w Katedrze Użytkowania Lasu Wydziału Leśnego i Technologii Drewna
Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu

pod kierunkiem prof. dr hab. Tomasza Jelonka

1. Podstawa prawna wykonania recenzji

Podstawą prawną wykonania recenzji jest uchwała nr 210/RNDNL/25/26 podjęta w dniu 10 lipca 2026 przez Radę Naukową Dyscypliny Nauki Leśne Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w sprawie powołania recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauki rolniczej, dyscyplinie nauki leśnej Pani mgr inż. Joannie Kopaczyk.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Kopaczyk zatytułowanej „Biochemiczne i molekularne podstawy procesu ksylogenezy w siewkach sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. w warunkach deficytu wody”. Przedstawiona do recenzji rozprawa została wykonana w Katedrze Użytkowania Lasu Wydziału Leśnego i Technologii Drewna

Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu pod kierunkiem prof. dr hab. Tomasza Jelonka. Rozprawa ma charakter monografii obejmującej 113 stron i została napisana w typowym dla pracy eksperymentalnej formacie. Praca składa się z siedmiu rozdziałów: Wstępu (który jest właściwie przeglądem literatury) obejmującego 30 stron, Celu pracy i hipotez badawczych – 1 strona, Materiału i metod – 18 stron, Wyników – 19 stron, Dyskusji – 14 stron, Wniosków – 3 strony. Rozprawa zawiera również spis literatury obejmujący 144 pozycje, spis ilustracji – 3 strony (47 rycin) i spis tabel – 1 strona (4 tabele). Układ pracy oraz tytuły rozdziałów spełnia więc wymogi stawiane pracy naukowej.

3. Ocena ogólna

Ocena tematyki i zakresu rozprawy doktorskiej

Podjęcie badań dotyczących wpływu deficytu wody na funkcjonowanie i ksylogenezę młodych siewek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) jest uzasadnione rosnącym znaczeniem suszy jako jednego z głównych czynników ograniczających wzrost i przeżywalność drzew w warunkach współczesnych zmian klimatu. Wzrost temperatury oraz zwiększająca się częstość i intensywność okresów niedoboru opadów wpływają nie tylko na funkcjonowanie dojrzałych drzewostanów, lecz również na proces odnowienia lasu. Szczególnie wrażliwym etapem rozwoju są pierwsze tygodnie i miesiące życia siewek, kiedy ich system korzeniowy oraz tkanki przewodzące nie są jeszcze w pełni rozwinięte, a możliwość kompensowania okresowych niedoborów wody jest ograniczona. Z tego względu poznanie mechanizmów kontrolnych na poziomie komórki i tkanki oraz odpowiedzi młodych siewek sosny zwyczajnej na postępujące odwodnienie ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i potencjalne znaczenie praktyczne dla oceny zdolności odnowień do funkcjonowania w warunkach coraz częściej występujących okresów suszy.

Sosna zwyczajna, będąca obiektem zainteresowania Doktorantki, jest jednym z najważniejszych gatunków lasotwórczych nie tylko w Polsce, ale również w Europie, charakteryzującym się bardzo szerokim zasięgiem geograficznym i znaczną zdolnością przystosowania do zróżnicowanych warunków siedliskowych. Pomimo tej plastyczności obserwuje się jednak coraz więcej przypadków ograniczenia wzrostu tego gatunku i pogorszenia kondycji drzewostanów w następstwie długotrwałych lub powtarzających się okresów suszy. Znaczna część dotychczasowych badań nad reakcją *P. sylvestris* na niedobór wody dotyczyła starszych sadzonek i dojrzałych drzew, w tym sezonowej aktywności kambium, dynamiki przyrostu radialnego oraz anatomii drewna. Stosunkowo słabiej poznana

pozostaje natomiast odpowiedź bardzo młodych siewek, u których dopiero kształtuje się funkcjonalny system przewodzący. W tym okresie nawet krótkotrwały deficyt wody może wpływać zarówno na gospodarkę wodną całej rośliny, jak i na proces różnicowania komórek ksylemu.

Wydaje się w związku z tym, że istotnym zamiarem Doktorantki w niniejszych badaniach było powiązanie odpowiedzi siewek sosny na odwodnienie z procesem ksylogenezy. Tworzenie ksylemu jest procesem wieloetapowym, obejmującym podziały komórek merystematycznych, ich wzrost i różnicowanie, odkładanie wtórnej ściany komórkowej, lignifikację oraz dojrzewanie elementów przewodzących. Poszczególne etapy tego procesu mogą różnić się wrażliwością na niedobór wody, a ich zaburzenie może wpływać na późniejsze właściwości hydrauliczne i mechaniczne tworzących się tkanek. Badanie kilkudniowych siewek pozwala więc analizować wpływ suszy w okresie, w którym wiązki przewodzące ulegają dynamicznym zmianom i intensywnie się rozwijają.

Nowość przeprowadzonych badań nie polega przede wszystkim na zastosowaniu pojedynczej, nowej metody, lecz na integracji kilku poziomów odpowiedzi biologicznej w jednym doświadczeniu. W tym samym układzie eksperymentalnym analizowano zmiany stanu wodnego siewek, wybrane parametry związane ze stanem redoks i oksydacyjnymi zmianami lipidów, mikrostrukturę rozwijających się tkanek oraz względną ekspresję genów związanych zarówno z odpowiedzią na odwodnienie, jak i z procesami mogącymi uczestniczyć w regulacji ksylogenezy. Takie podejście pozwoliło spojrzeć na reakcję młodych sosen na deficyt wody nie tylko jako na zmianę pojedynczego parametru fizjologicznego, lecz także jako na złożony proces obejmujący jednocześnie poziom komórkowy, biochemiczny i molekularny.

Dodatkowym elementem wyróżniającym doświadczenie była analiza zmian w kolejnych terminach postępującego odwodnienia. Umożliwiło to obserwację dynamiki odpowiedzi, a nie tylko porównanie dwóch stanów: rośliny kontrolnej i rośliny po zakończeniu okresu suszy. Natomiast włączenie do doświadczenia etapu ponownego nawodnienia umożliwiło ponadto ocenę wczesnej odwracalności obserwowanych zmian oraz porównanie tempa odpowiedzi poszczególnych organów, a także zmian natężenia analizowanych parametrów po ustąpieniu czynnika stresowego.

Pozytywną cechą badań było uwzględnienie ekspresji genu DHN1, związanego przede wszystkim z odpowiedzią na odwodnienie, oraz genów potencjalnie związanych z różnymi elementami regulacji rozwoju tkanek przewodzących. Analiza ekspresji COMT, PIN1 i HDZ33 umożliwiła natomiast odpowiedź na pytanie, czy zmianom typowym dla stresowej odpowiedzi

wywołanej niedoborem wody towarzyszą zmiany w ekspresji genów uczestniczących w lignifikacji, regulacji transportu auksyn oraz różnicowaniu tkanek przewodzących. Cennym elementem pracy jest częściowe wypełnienie luki wynikającej z dominacji badań dotyczących mechanizmów ksylogenezy na roślinach modelowych lub drzewach okrytonasiennych. Mechanizmy te nie mogą być automatycznie przenoszone na drzewa iglaste, których drewno charakteryzuje się odmienną organizacją anatomiczną i jest zbudowane głównie z cewek. Uzyskanie danych bezpośrednio dla *Pinus sylvestris* ma więc znaczenie dla weryfikacji, które elementy odpowiedzi molekularnej są konserwatywne, a które mogą być swoiste dla nagonasiennych. Uzasadnieniem przeprowadzonych badań jest również niedostateczne rozpoznanie u nagonasiennych zależności między zmianami statusu redoks będącego skutkiem niedoboru wody a rozwojem ksylemu u młodych siewek. Biorąc pod uwagę podwójną funkcję ROS polegającą z jednej strony na przekazywaniu sygnałów, a z drugiej na potencjalnych uszkodzeniach oksydacyjnych w komórkach przy nadmiernej ich akumulacji, analiza akumulacji reaktywnych form tlenu może ułatwić sformułowanie wniosków dotyczących zależności między odpowiedzią stresową a przebiegiem ksylogenezy. Istotną i pozytywną cechą planu badawczego realizowanego przez Doktorantkę była również analiza odpowiedzi siewek sosny na ponowne ich uwodnienie. Uwzględnienie tego procesu pozwoliło wykazać różną dynamikę odpowiedzi na ustąpienie deficytu wody.

Ocena merytoryczna

Do najważniejszych walorów rozprawy należy zaliczyć szerokie, integracyjne podejście do badanego problemu. Doktorantka podjęła próbę powiązania zmian zachodzących na kilku poziomach organizacji biologicznej – od gospodarki wodnej, poprzez wskaźniki związane z homeostazą reaktywnych form tlenu i oksydacyjnymi zmianami lipidów, po obserwacje struktury rozwijającego się ksylemu oraz analizę ekspresji wybranych genów. Takie podejście należy uznać za wartościowe, ponieważ umożliwia analizowanie reakcji siewek na deficyt wody nie jako pojedynczego procesu fizjologicznego, lecz jako złożonej odpowiedzi obejmującej jednocześnie mechanizmy fizjologiczne, biochemiczne, strukturalne i molekularne.

Wstęp przedstawionej dysertacji ma szeroki i ambitny zakres. Łączy fizjologię stresu suszy z gospodarką wodną, biochemiczną i regulacyjną rolą ROS, systemem antyoksydacyjnym, jak również anatomią ksylemu i procesem ksylogenezy oraz jego lignifikacją, regulacją

hormonalną i molekularną. Przegląd literatury charakteryzuje się jednak miejscami zbyt szerokim zakresem w stosunku do bezpośredniego celu pracy, co prowadzi do pewnych uproszczeń w odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy na temat stresu suszy. Dotyczy to m. in. regulacji rozwoju ksylemu przez fitohormony czy roli reaktywnych form tlenu (ROS). Przedstawiony we wstępie udział ABA w reakcji na niedobór wody jest traktowany głównie jako sygnał korzeń-pęd. Współczesne ujęcie powinno jednak obejmować również lokalną biosyntezę ABA, sygnały hydrauliczne, ROS a także rozbudowany udział hormonów w tych reakcjach.

Cel biologiczny pracy jest właściwie sformułowany i dobrze łączy dwie części pracy tj. odpowiedź na niedobór wody i związaną z ksylogenezą odpowiedź roślin na stres. Przedstawione hipotezy są możliwe do testowania, tworzą logiczną sekwencję i wynikają z przedstawionego stanu wiedzy. Wątpliwość wzbudza jednak hipoteza 1, której druga część wskazuje, że jej funkcją jest potwierdzenie skuteczności modelu doświadczalnego. Bardzo dobrze sformułowana jest natomiast hipoteza 4, która łączy fizjologię stresu z procesami rozwojowymi ksylemu. Pewne zastrzeżenia budzi również zbyt szeroki lub przyczynowy charakter części hipotez w stosunku do możliwości zastosowanych metod. Szczególnie ostrożnie należy traktować hipotezy zakładające bezpośredni związek pomiędzy zmianami poziomu ROS a uszkodzeniem błon komórkowych oraz pomiędzy ekspresją pojedynczych genów a przebiegiem złożonych procesów ksylogenezy. Uważam, że niektóre z hipotez trudno jest potwierdzić z wystarczającą pewnością nawet w przypadku pozytywnego wyniku przedstawionych analiz ze względu na złożoność analizowanych procesów.

Rozdział dotyczący materiału badawczego i metod prezentuje stosunkowo szeroki zakres procedur analitycznych. Mocną stroną układu doświadczalnego było prowadzenie obserwacji w kolejnych etapach postępującego odwodnienia oraz uwzględnienie fazy ponownego nawodnienia. Umożliwiło to określenie dynamiki reakcji na niedobór wody oraz ocenę wczesnych zmian zachodzących po ustąpieniu jej deficytu. Za jedno z najważniejszych ograniczeń metodycznych pracy należy natomiast uznać brak ilościowej charakterystyki intensywności zastosowanego deficytu wody. Stres wywoływano poprzez zaprzestanie nawadniania, jednak nie prowadzono równoległe pomiarów zawartości wody w podłożu ani jego potencjału wodnego, nie oznaczano też potencjału wody w tkankach roślinnych. W konsekwencji kolejne terminy doświadczenia charakteryzują przede wszystkim czas, jaki upłynął od zaprzestania podlewania, a nie precyzyjnie zdefiniowane poziomy stresu wodnego.

Istotnym problemem wymagającym wyjaśnienia jest sposób określenia parametru opisywanego w pracy jako względna zawartość wody (RWC). Jeżeli obliczano go wyłącznie na podstawie świeżej i suchej masy materiału, bez oznaczenia masy po pełnym uwodnieniu, nie odpowiada on klasycznej definicji RWC. Dlatego też w wynikach uzyskano wartości RWC przekraczające 100%, co dodatkowo wskazuje, że zastosowany parametr miał inny charakter. Uzyskane wyniki dobrze dokumentują dynamikę zmian uwodnienia poszczególnych części siewek, jednak parametr ten powinien zostać prawidłowo nazwany i interpretowany.

Na pozytywną ocenę zasługuje włączenie do pracy analiz mikroskopowych. Umożliwiły one powiązanie wyników biochemicznych i molekularnych ze zmianami zachodzącymi w rozwijających się tkankach. Zastosowane metody barwienia preparatów pozwoliły na jakościową ocenę organizacji ścian komórkowych i rozmieszczenia struktur lignifikowanych. Ograniczeniem tej części jest jednak brak ilościowej analizy morfometrycznej. Na podstawie zastosowanych metod nie można określić zmian zawartości celulozy, ligniny ani ilościowo potwierdzić zmian grubości ścian komórkowych. Z tego względu wyniki histologiczne powinny być interpretowane przede wszystkim jako jakościowe.

Zastosowany zestaw analiz TBARS, NBT i H_2O_2 należy uznać za umożliwiający wieloaspektową ocenę zmian statusu redoks siewek. Mocną stroną jest wykorzystanie kilku metod oraz obserwowanie ich dynamiki w czasie trwania doświadczenia i po ponownym uwodnieniu. Należy jednak wziąć pod uwagę ograniczoną specyficzność niektórych z tych metod. TBARS jest pośrednim wskaźnikiem peroksydacji lipidów i nie może być traktowany jako bezpośrednie oznaczenie MDA. Podobnie oznaczenie z wykorzystaniem NBT nie stanowi bezpośredniego pomiaru bezwzględnego stężenia anionorodnika ponadtlenkowego.

Do interesujących elementów rozprawy należy zaliczyć analizę ekspresji genów DHN1, COMT, PIN1 i HDZ33. Szczególne znaczenie miał dobór analizowanych genów, który pozwolił na próbę połączenia klasycznej odpowiedzi na odwodnienie z procesami związanymi z metabolizmem fenylopropanoidów, transportem auksyny oraz rozwojem tkanek przewodzących. Szczególnie interesujące są obserwowane zmiany względnej ekspresji DHN1. Jednocześnie część rozprawy dotycząca ekspresji genów jest obciążona istotnymi ograniczeniami metodycznymi. Najważniejszym z nich jest bardzo mała liczba powtórzeń biologicznych, wynosząca trzy. Liczebność ta znacząco ogranicza możliwość statystycznej weryfikacji obserwowanych różnic. Z tych względów uzyskane wyniki należy traktować przede wszystkim jako dane wskazujące potencjalne kierunki zmian, wymagające potwierdzenia w kolejnych doświadczeniach.

Rozdział prezentujący wyniki umożliwia prześledzenie przebiegu odpowiedzi siewek w kolejnych terminach doświadczenia. Do jego mocnych stron należy przedstawienie dynamiki zmian oraz wyodrębnienie odpowiedzi po ponownym nawodnieniu. Szczególnie czytelne są wyniki dotyczące zmian uwodnienia poszczególnych części siewek. Interesujące są także jakościowe obserwacje struktury tkanek oraz profile względnej ekspresji badanych genów. Ograniczeniem jest jednak brak potwierdzenia statystycznego różnic w zakresie TBARS, H_2O_2 , NBT i ekspresji genów.

W dyskusji Doktorantka podjęła próbę całościowej interpretacji wyników fizjologicznych, biochemicznych, anatomicznych i molekularnych oraz odniesienia ich do szerokiego tła literaturowego. Należy to uznać za niewątpliwą zaletę pracy. Autorka omawia poszczególne analizy w kolejności przedstawionej w rozdziale Wyniki. Ułatwia to śledzenie powiązań między wykonanymi analizami. Cenną jest część dyskusji poświęcona omówieniu ekspresji genów będących przedmiotem analiz. Jednocześnie właśnie w tej części oraz w części poświęconej stresowi oksydacyjnemu w pewnych miejscach rozprawy pojawia się tendencja do formułowania wniosków wykraczających poza możliwości zastosowanych metod i siłę uzyskanych danych. Dotyczy to m. in. utożsamiania wzrostu TBARS z potwierdzonym uszkodzeniem błon, zmian poziomu H_2O_2 z wystąpieniem stresu oksydacyjnego, czy zmian ekspresji COMT i PIN1 z bezpośrednimi zmianami lignifikacji i transportu auksyny.

Za trafne należy uznać wyodrębnienie części dotyczącej ograniczeń i perspektyw dalszych badań. Świadomość ograniczeń układu eksperymentalnego jest ważnym elementem przedstawionej rozprawy. Wydaje się, że rozdział ten powinien jednak obejmować pełny zakres najważniejszych ograniczeń, w tym brak ilościowej charakterystyki stresu wodnego, problem związany z oznaczeniem RWC oraz pośredni charakter niektórych metod biochemicznych. Według mnie rozdział obejmujący stwierdzenia i wnioski powinien być podporządkowany wynikom uzyskanym w pracy. W zaprezentowanej formie niektóre wnioski są zbyt rozbudowane i przechodzą od opisu wyników do spekulacji dotyczących aktywacji systemu antyoksydacyjnego, procesów naprawczych czy regulacji transportu hormonalnego. Tego rodzaju interpretacje powinny być przedstawione w Dyskusji, natomiast wnioski końcowe powinny w możliwie syntetyczny sposób przedstawiać jedynie te zależności, które bezpośrednio wynikają z przeprowadzonych badań. Po ograniczeniu tego rodzaju sformułowań wnioski będą lepiej odpowiadały rzeczywistej sile uzyskanych danych.

Analiza niniejszej rozprawy nasuwa kilka pytań wymagających dodatkowego wyjaśnienia:

1. W jaki sposób zdefiniowano i kontrolowano intensywność stresu wodnego w przeprowadzonym eksperymencie, skoro stres wywoływano poprzez zaprzestanie nawadniania?
2. Z czego wynikały wartości parametru określanego jako RWC przekraczające 100% i czy zastosowany sposób jego obliczania odpowiada klasycznej definicji względnej zawartości wody w tkankach?
3. W jaki sposób zweryfikowano swoistość starterów oraz wiarygodność identyfikacji produktów amplifikacji w analizach qPCR, zwłaszcza w przypadku starterów zaprojektowanych na podstawie sekwencji pochodzących od innych gatunków rodzaju *Pinus*?
4. Czy po jednym dniu od ponownego nawodnienia można mówić o regeneracji siewek, czy właściwsze byłoby określenie obserwowanych zmian jako wczesnej odpowiedzi na rehydratację?

Dobór literatury należy ocenić pozytywnie. Wykaz piśmiennictwa obejmuje 144 pozycje, wśród których zdecydowanie dominują publikacje zagraniczne, pochodzące z recenzowanych czasopism naukowych. Ponad 90% pozycji to pozycje zagraniczne, co jest właściwą proporcją w stosunku do pozycji polskich dla rozprawy z zakresu fizjologii i biologii molekularnej. Cytowane publikacje odnoszą się bezpośrednio do głównych zagadnień rozprawy, takich jak fizjologia stresu wodnego, ksylogeneza, budowa i funkcjonowanie ksylemu, metabolizm reaktywnych form tlenu, biosynteza ściany komórkowej oraz molekularna regulacja rozwoju tkanek przewodzących. Na uwagę zasługuje uwzględnienie zarówno klasycznych prac stanowiących podstawę wiedzy o ksylogeniezie i regulacji hormonalnej, jak również publikacji dotyczących rodzaju *Pinus* i innych drzew iglastych, co dobrze odpowiada zakresowi tematycznemu rozprawy.

Pozytywnie należy również ocenić obecność nowszych opracowań dotyczących molekularnych mechanizmów tworzenia drewna, odpowiedzi na suszę oraz regulacji ekspresji genów u drzew iglastych. W bibliografii uwzględniono m.in. prace z lat 2022–2025 dotyczące lignifikacji, czynników transkrypcyjnych, rozwoju drewna oraz odpowiedzi roślin na stres. Jednocześnie udział najnowszych publikacji jest stosunkowo niewielki w porównaniu z całym wykazem. Znaczna część cytowanej literatury pochodzi sprzed ponad dziesięciu lat. W przypadku prac

klasycznych nie stanowi to wady, ponieważ wiele z nich ma nadal podstawowe znaczenie dla omawianych zagadnień, jednak w szybko rozwijających się obszarach biologii molekularnej, regulacji kambium, sygnalizacji hormonalnej i odpowiedzi redoks wskazane jest szersze uwzględnienie najnowszych wyników badań. Przykładowo, istotnym ograniczeniem w doborze literatury jest kilka publikacji dotyczących regulacji ksylogenezy u *Pinus sylvestris*:

Galibina, N. A., Moshchenskaya, Y. L., Tarelkina, T. V., Nikerova, K. M., Korzhenevskii, M. A., Serkova, A. A., Afoshin, N. V., Semenova, L. I., Ivanova, D. S., Guljaeva, E. N., & Chirva, O. V. (2023). Identification and Expression Profile of CLE41/44-PXY-WOX Genes in Adult Trees *Pinus sylvestris* L. Trunk Tissues during Cambial Activity. *Plants*, 12(4), 835.

Fajstavr, M., Bednářová, E., Nezval, O., Giagli, K., Gryc, V., Vavrčík, H., Horáček, P., & Urban, J. (2019). How needle phenology indicates the changes of xylem cell formation during drought stress in *Pinus sylvestris* L. *Dendrochronologia*, 56, 125600.

Fajstavr, M., Giagli, K., Vavrčík, H., Gryc, V., Horáček, P., & Urban, J. (2020). The cambial response of Scots pine trees to girdling and water stress. *IAWA Journal*, 41(2), 159–185.

Fajstavr, M., Horáček, P., Foltýnová, L., Giagli, K., Gryc, V., Vavrčík, H., & Urban, J. (2025). Xylogenesis controlled by water potential gradients within the soil–plant–atmosphere continuum in one of the most widespread conifers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 372, 110699.

Ocena końcowa

Przedstawiona rozprawa świadczy o opanowaniu przez Doktorantkę zróżnicowanego warsztatu badawczego, obejmującego przygotowanie doświadczenia biologicznego, analizy biochemiczne, obserwacje histologiczne oraz techniki biologii molekularnej. Pozytywnie należy ocenić szeroki zakres zastosowanych metod oraz podjęcie próby integracji wyników uzyskanych przy wykorzystaniu różnych rodzajów analiz na różnych poziomach organizacyjnych organizmu. Jednocześnie praca wskazuje na potrzebę większej ostrożności w czasem zbyt daleko idącej interpretacji wyników przeprowadzonych metodami pośrednimi i jakościowymi.

Wskazane w recenzji ograniczenia dotyczą przede wszystkim zakresu możliwej interpretacji wyników, a nie samej zasadności podjętego problemu badawczego. Najistotniejsze zastrzeżenia obejmują niedostateczną ilościową charakterystykę stresu wodnego, sposób określenia

parametru RWC, niewielką liczbę powtórzeń biologicznych w analizach qPCR ograniczających możliwości interpretacyjne uzyskanych wyników.

Jednocześnie pragnę podkreślić, że rozprawa podejmuje ważny i aktualny problem naukowy, a jej istotnym walorem jest integracja kilku poziomów odpowiedzi młodych siewek *Pinus sylvestris* na deficyt wody. Praca dostarcza nowych danych dotyczących zmian fizjologicznych, biochemicznych, strukturalnych i molekularnych, które mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych badań nad zależnościami między dostępnością wody a przebiegiem ksylogenezy. Pomimo wskazanych ograniczeń metodologicznych rozprawa stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a uzyskane wyniki poszerzają wiedzę dotyczącą wczesnej odpowiedzi siewek sosny zwyczajnej na deficyt wody oraz potencjalnych powiązań tej odpowiedzi z procesami formowania ksylemu.

W podsumowaniu stwierdzam, że poddana recenzji rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w art. 187 ust. 1-2 i art. 190 ust. 3 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571). W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Leśne Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu o dopuszczenie Pani mgr inż. Joanny Kopaczyk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Dr hab. inż. Wojciech Kraj, prof. URK