

Jarosław Socha

ZAGROŻENIA CIĄGŁOŚCI FUNKCJI LASÓW W OBLICZU ZMIANY KLIMATU I ANTROPOPRESJI – PROGNOZY I ADAPTACJA

WSTĘP

Lasy, które od wieków kształtowały krajobraz Polski i Europy Środkowej, są dziś jednymi z najbardziej czułych wskaźników antropopresji i zmiany klimatu. Ich ciągłość — rozumiana zarówno jako istnienie samej pokrywy leśnej, jak i zdolność do pełnienia kluczowych funkcji przyrodniczych i społecznych — staje się coraz bardziej zagrożona. Wyniki wielu badań (m.in. raporty IPCC 2023, FOREST EUROPE 2020) wskazują, że w najbliższych dekadach to nie średnie wartości temperatury czy opadów będą decydować o kondycji drzewostanów, ale skrajne zjawiska: długotrwałe susze, fale upałów, huraganowe wiatry czy gradacje szkodników. W obliczu narastających skutków globalnej zmiany klimatu oraz rosnącej antropopresji zarządzający lasami europejskimi, a w szczególności lasami Europy Środkowej stają dziś przed wyzwaniem, które zagraża ciągłości wypełniania kluczowych funkcji lasów.

Badania prowadzone w ostatnich dekadach jednoznacznie pokazują, że nie tyle wzrost średnich temperatur, co narastająca liczba ekstremalnych zjawisk pogodowych — długotrwałych susz, fal upałów czy huraganowych wiatrów — staje się głównym czynnikiem stresu dla drzewostanów (Allen et al., 2010; Seidl et al., 2017). W Polsce i krajach sąsiednich coraz częściej obserwuje się masowe zamieranie drzew, co w sposób bezpośredni przekłada się na pogorszenie zarówno funkcji produkcyjnych jak i pozaprodukcyjnych, w tym funkcji wodochronnych, rekreacyjnych, ochrony bioróżnorodności czy pochłaniania dwutlenku węgla (Socha et al., 2023). Przez dekady lasy wykazywały coraz większy przyrost, który był przyspieszany przez wysoką depozycję azotu oraz zmianę klimatu, a w szczególności wydłużenie sezonu wegetacyjnego. Większa dawka składnika odżywczego i wyższe temperatury przyspieszały przyrost, co wraz ze wzrostem wieku drzewostanów podnosiło krajowe zapasy drewna do rekordowych poziomów. Szybko przyrastające drzewa inwestowały większość zasobów w część nadziemną kosztem słabszej rozbudowy systemów korzeniowych. Ten przyspieszony wzrost i zmieniona alokacja biomasy okazały się jednak niekorzystne w wa-

runkach coraz częstszych susz. Płytsze i mniej rozbudowane systemy korzeniowe drzew nie zapewniają odpowiedniej ilości wody koniecznej do zapewnienia ciągłości procesów fizjologicznych. W efekcie – gdy w wyniku suszy następuje obniżenie poziomu wód gruntowych i anomalie wilgotności gleb – właśnie najdorodniejsze, najstarsze drzewostany są najbardziej osłabiane lub zamierają jako pierwsze ulegając zatorom ksylemowym oraz zjawisku głodu węglowego (Adams et al., 2017; Choat et al., 2018).

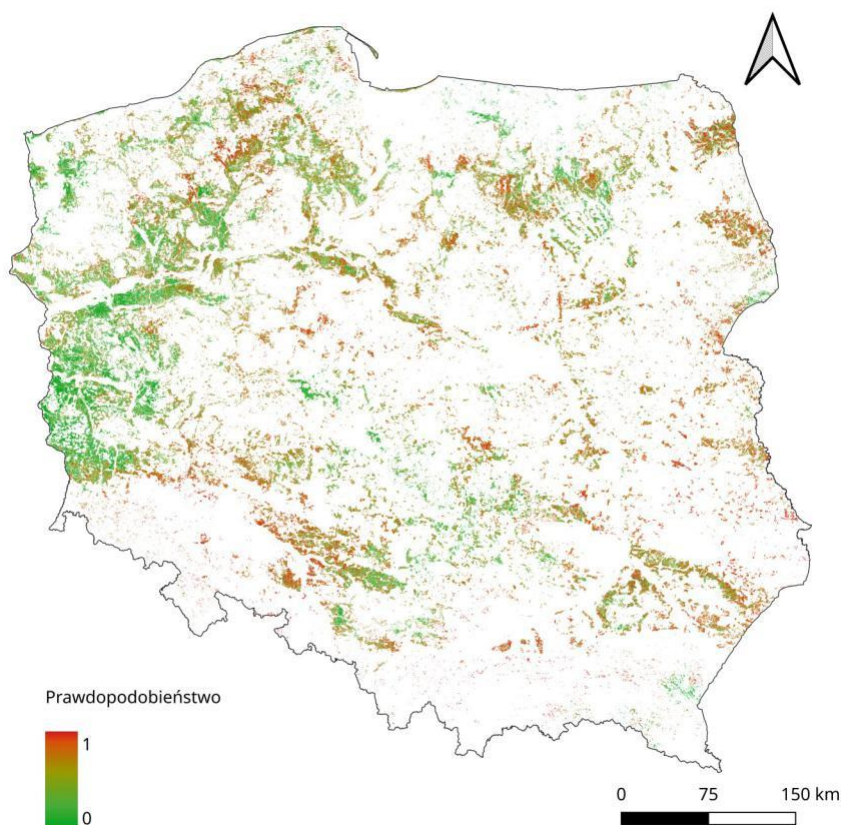
Prowadzone w ostatnich latach badania dokumentują wpływ intensyfikacji przyrostu drzewostanów na zwiększoną podatność na suszę (Socha et al., 2023). Wysokie i gęste drzewostany o szerszych przewodach przewodzących wodę, szczególnie na siedliskach żyznych są dziś bardziej narażone na zamieranie, co potwierdzają wielkoskalowe modele ryzyka zamierania budowane w oparciu o dane teledetekcyjne i monitoring urzędniowy (Socha et al., 2023). W tym kontekście, jak podkreślają naukowcy i leśnicy praktycy, niezbędne stają się aktywne działania adaptacyjne. Wdrażanie przebudowy składu gatunkowego, skracanie wieku rębności na siedliskach zagrożonych, silniejsze zabiegi pielęgnacyjne redukujące nasilenie konkurencji. Skuteczne może być również stosowanie odnowień naturalnych z lokalnych ekotypów drzew bez nastawienia na selekcję pod względem cech przyrostowych. W dobie dynamicznych zmian zachodzących w ekosystemach leśnych dla szybkiego reagowania na pojawiające się problemy coraz bardziej przydatne staje się wykorzystanie nowoczesnych technologii – od teledetekcyjnych metod monitoringu i inwentaryzacji po modelowanie przestrzenne – które pozwalają precyzyjnie identyfikować obszary największego ryzyka.

MODELE RYZYKA ZAMIERANIA – NARZĘDZIE DO ZARZĄDZANIA LASAMI W DOBIE ZAGROŻENIA ICH TRWAŁOŚCI

Modelowanie ryzyka zamierania polega na matematycznym opisanie wpływu warunków siedliskowych, meteorologicznych oraz cech drzewostanów na prawdopodobieństwo wystąpienia zamierania drzew w wyniku czynników powiązanych z suszą. Efektem badań zakończonych w 2024 roku przez Wydział Leśny URK oraz BULiGL są modele statystyczne oraz szczegółowe mapy zagrożenia zamieraniem drzewostanów. W badaniach zidentyfikowano warunki siedliskowe i cechy drzewostanów determinujące ich podatność na zamieranie w wyniku suszy. Opracowane modele posłużyły do opracowania map zagrożenia dla obszarów Lasów Państwowych, gdzie przypisano prawdopodobieństwo zamierania poszczególnym drzewostanom badanych gatunków. Dodatkowo wykonano symulacje zagrożenia

zamieraniem w różnych scenariuszach klimatycznych, ze szczególnym uwzględnieniem suszy spowodowanej deficytem opadów. Opracowana w ramach badań metodologia oraz bazy danych opisujące warunki siedliskowe wykorzystano do opracowania aplikacji komputerowej, która po aktualizacji bazy danych o zamieraniu drzewostanów o dane dotyczące rozmiaru cięć sanitarnych umożliwia bieżącą aktualizację wskaźników zagrożenia zamieraniem dla poszczególnych gatunków lasotwórczych.

Opracowane mapy ryzyka zamierania drzewostanów głównych gatunków lasotwórczych Polski określają prawdopodobieństwo wystąpienia zamierania drzew powiązanego z suszą wyrażone w skali od 0 do 100% dla każdego wydzielenia drzewostanowego (ryc. 1). Informacja ta powinna być istotną wskazówką przy gospodarowaniu. Drzewostany o najwyższym prawdopodobieństwie wystąpienia ryzyka zamierania w wyniku zjawisk związanych z suszą w przypadku potwierdzenia ich zaburzonej stabilności



Ryc 1. Mapa ryzyka zamierania drzewostanów sosnowych

w ramach prac urzędzeniowych powinny być zaliczane do grupy niestabilnych lasów gospodarczych. Drzewostany te, zgodnie z najnowszą instrukcją zarządzania lasu powinny się znaleźć w gospodarstwie odbudowy lasów niestabilnych (N), dla których w celu przywrócenia stabilności konieczna jest odbudowa za pomocą cięć rębnych, z uwzględnieniem warunków siedliskowych oraz ekologicznych wymagań gatunków. W przypadku drzewostanów o dużym ryzyku zamierania, w których w najbliższym czasie nie jest przewidziane opracowywanie planu urządzenia lasu, zagrożenie zamieraniem może być wykorzystane przy wykonywaniu bieżących cięć rębnych i pielęgnacyjnych. Drzewostany takie powinny być użytkowane w danym nadleśnictwie w pierwszej kolejności. W przypadku drzewostanów różnogatunkowych informacja o dużym ryzyku zamierania danego gatunku występującego w składzie gatunkowym drzewostanu może być wykorzystana do redukcji udziału zagrożonego gatunku w składzie gatunkowym drzewostanu, co może się przyczynić do jego stopniowej przebudowy na bardziej stabilny skład gatunkowy.

**ADAPTACYJNE GOSPODAROWANIE LASAMI
(AFM – ADAPTIVE FOREST MANAGEMENT):
STRATEGIA ODPORNOŚCI W CZASACH KRYZYSU KLIMATYCZNEGO**

Czym jest AFM?

Adaptacyjne gospodarowanie lasami (AFM) to dynamiczne podejście do zarządzania ekosystemami leśnymi, które zakłada ich ciągłe dostosowywanie do zmieniających się warunków klimatycznych i biologicznych. AFM łączy wiedzę ekologiczną, leśną i klimatyczną, by wzmacniać odporność (resistance) oraz zdolność do regeneracji drzewostanów (Bolte et al., 2009; Mina et al., 2022).

**Przykłady działań adaptacyjnych – jak chronić funkcje lasu
w obliczu zmiany klimatu?**

Wobec złożonych zagrożeń i szybko zmieniających się warunków środowiskowych, kluczowe znaczenie zyskują działania adaptacyjne, które mają ograniczyć ryzyko rozpadu drzewostanów i utraty ich funkcji. Eksperti podkreślają, że adaptacja wymaga odejścia od biernego oczekiwania, że lasy „same sobie poradzą”, na rzecz aktywnego, elastycznego zarządzania (Hartmann et al., 2025).

Jak czyszczenia i trzebieże, wspierają adaptację lasów do zmiany klimatu?

Czyszczenia i trzebieże zaliczają się do najważniejszych działań w gospodarce leśnej, wspierających adaptację lasów do zmieniających się warunków wzrostu. Zabiegi te polegające na przerzedzaniu drzewostanu przez selektywne usuwanie części drzew nabierają szczególnego znaczenia w obliczu zmiany klimatu. Jednym z najważniejszych efektów czyszczeń i trzebieży jest poprawa wilgotności gleby. Badania prowadzone w lasach sosnowych w Arizonie wykazały, że gleba w trzebionych lasach była bardziej wilgotna i dłużej zatrzymywała wilgoć w porównaniu z lasami nietrzebionymi, zwłaszcza podczas suszy (Belmonte i in., 2022). Redukcja liczby drzew zmniejsza transpirację, co zwiększa dostępność wody w glebie. Efekt ten jest szczególnie istotny w regionach z ograniczonymi zasobami wody i częstymi suszami (Sankey i Tatum, 2022). Zmniejszenie zagęszczenia drzew ogranicza konkurencję o wodę i składniki odżywcze, co zmniejsza przyrost na wysokości (Tymińska-Czabańska i in., 2022), przyczynia się do rozbudowy systemów korzeniowych (Brunner i in., 2015; Wang i in., 2019) i pozytywnie wpływa na kondycję zdrowotną drzew (Socha i in. 2023). W trzebionych drzewostanach drzewa wykazują wyższą zawartość wilgoci w koronach, co poprawia fotosyntezę i zwiększa odporność na suszę (Sankey i in., 2021). Pozytywne efekty trzebieży wynikają także ze zwiększenia bio-masy drobnych korzeni (Wang i in., 2019), które odgrywają kluczową rolę w pobieraniu wody, zwłaszcza z głębszych warstw gleby (10–20 cm). Rzadsze drzewostany są również mniej podatne na rozprzestrzenianie się chorób i gradacji owadów, co wspiera odbudowę naturalnej struktury lasu (Belmonte i in., 2020). Metaanaliza przeprowadzona przez del Campo i in. (2022) na 251 obiektach opisanych w 57 recenzowanych artykułach wykazała, że trzebieże zwiększają wilgotność gleby średnio o 14%, a efekt ten utrzymuje się od 3 do 8 lat, co jest kluczowe w regionach narażonych na susze.

Choć trzebieże mają wiele zalet, mogą również powodować krótkoterminowe negatywne efekty. Usunięcie drzew zwiększa nasłonecznienie, co chwilowo podnosi temperaturę gleby i koron, zwiększając parowanie. Globalne analizy wskazują, że skutki trzebieży zależą od intensywności zabiegu i lokalnych warunków środowiskowych (del Campo i in., 2022). Dlatego kluczowe jest odpowiednie planowanie zabiegów, aby zmaksymalizować korzyści i zminimalizować potencjalne skutki uboczne (Sankey i Tatum, 2022).

Przebudowa składu gatunkowego

Przebudowa składu gatunkowego jest jedną z podstawowych strategii ko-niecznych w dobie utraty optimum klimatycznego przez wybrane gatunki lasotwórcze. W praktyce oznacza zwiększenie udziału gatunków lepiej przy-stosowanych do nowych warunków. W szczególności potrzeba przebudowy występuje w przypadku znacznej części drzewostanów wzrastających na gruntach porolnych, które stanowią blisko 30% lasów Polski. W zależno-ści od możliwości związanych z potencjałem siedlisk gatunki iglaste powin-ny być na nich zastępowane gatunkami liściastymi, w szczególności dębem i bukiem.

Dostosowanie wieku rębności

Struktura wiekowa lasów w Polsce sprawia, że w kolejnych dziesięciole-ciach wzrośnie udział drzewostanów najstarszych klas wieku. W związku z tym, że ze starszym wiekiem drzewostanów wiąże się wyższe ryzyko za-mierania drzewostanów, zmiana struktury i starzenie drzewostanów nabiera szczególnego znaczenia. Dlatego kolejnym wartym uwagi narzędziem adap-tacji jest **dostosowanie wieku rębności** i intensyfikacja cięć odnowienio-wych. W przypadku sosny zwyczajnej, szczególnie na siedliskach zagrozo-nych, zalecane jest skrócenie wieku rębności do ok. 80 lat, co pozwoli ogra-niczyć ryzyko masowego rozpadu drzewostanów i pozwoli na wprowadze-nie nowego pokolenia drzew, lepiej zaadaptowanych do obecnych warun-ków.

Odnowienia naturalne

W dobie zagrożenia trwałości lasów coraz większego znaczenia nabiera także stosowanie odnowień naturalnych. Odnowienia z lokalnych ekotypów drzew wykorzystujących pełną pulę genową mogą być bardziej odporne na niekorzystne warunki wzrostu. Odnowienia naturalne wykazują również korzystny z punktu widzenia suszy wolniejszy wzrost. Zaletą odnowień natu-ralnych są również ochrona mikroklimatu, mniejsza utrata wody i ogranicze-nie przesuszania gleby przez przygotowanie mechaniczne. Jak podkreśla Hartmann (2025), drzewa pochodzące z siewu są też bardziej elastyczne i odporne na skrajne deficyty wody, niż sadzonki wyprodukowane na szkół-kach.

Różnicowanie struktury lasów

Coraz częściej mówi się także o potrzebie zróżnicowania struktury lasów – zarówno pod kątem wieku drzewostanów, struktury pionowej oraz gatunkowej. Lasy wielopiętrowe, złożone z różnych gatunków o różnych niszach ekologicznych, są najczęściej bardziej odporne na zaburzenia niż jednowiekowe monokultury (Hartmann et al., 2025). Dodatkowo większa różnorodność sprzyja utrzymaniu szeregu usług ekosystemowych – od retencji wody po ochronę bioróżnorodności i funkcję krajobrazową i rekreacyjną.

Monitoring teledetekcja i modelowanie przestrzenne

Nowoczesne technologie, w tym teledetekcja, stają się dziś narzędziami do zarządzania na poziomie całych kompleksów leśnych. Coraz bardziej adekwatne metody modelowania danych oraz rozwój otwartych baz informacji o uszkodzeniach drzewostanów mogą znacznie ułatwić podejmowanie decyzji na poziomie krajowym i regionalnym (Hartmann et al., 2025). Prowadzenie stałego monitoringu kondycji drzewostanów i bieżąca ocena ryzyka zaburzeń z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi teledetekcyjnych są konieczne do wdrożenia adaptacyjnego zarządzania lasami w dynamicznie zmieniających się warunkach środowiskowych. Dlatego potrzebne jest doskonalenie i rozbudowa modeli ryzyka zaburzeń poprzez wykorzystanie modeli fizjologicznych, uwzględnienie dynamicznych danych z internetu rzeczy (IoT) oraz danych teledetekcyjnych. Rozwój modeli statystycznych i fizjologicznych zintegrowanych z danymi z automatycznych dendrometrów oraz innych czujników IoT monitorujących między innymi wilgotność gleby, temperaturę, ewapotranspirację i reakcje przyrostowe drzew jest sposobem na bardziej dogłębne poznanie stanu fizjologicznego i przyczyn zamierania drzew oraz jego monitorowanie. Szczególnie ważna może być analiza subdobowych zmian w odpowiedzi fizjologicznej drzew na stres środowiskowy w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem wpływu warunków mikro-klimatycznych i struktury drzewostanów. Dysponowanie danymi teledetekcyjnymi powiązanych z obserwacjami naziemnymi może umożliwić dokładne skalowania wyników badań lokalnych na regionalne i krajowe. Szczególnie przydatne może być w tym przypadku połączenie danych z IoT z teledetekcją w celu oceny regionalnych wzorców ryzyka zamierania drzew w różnych scenariuszach klimatycznych. Przez integrację danych teledetekcyjnych, pomiarów z sieci IoT oraz modeli fizjologicznych możliwe jest zbudowanie kompleksowego systemu oceny zagrożeń dla lasów.

Adaptacja to nie jedno wybrane działanie, ale zestaw działań i strategia, którą należy dostosować do lokalnych warunków siedliskowych, zagrożeń

i potrzeb społecznych. We wdrażaniu adaptacji kluczowa jest otwarta komunikacja ze społeczeństwem i użytkownikami lasów – bo skuteczna adaptacja wymaga szerokiego społecznego zrozumienia, że w nowym klimacie gospodarka leśna i ochrona przyrody muszą iść w parze (Socha, 2025). Kluczowym elementem AFM jest ciągła ewaluacja i aktualizacja strategii ochronnych na podstawie najnowszych danych naukowych i obserwacyjnych. Wymaga to ścisłej współpracy między naukowcami, praktykami leśnymi a instytucjami zarządzającymi lasami publicznymi.

WNIOSKI I REKOMENDACJE

Zmiana klimatu i antropopresja to dla gospodarki leśnej, zarządzających lasami, przemysłu drzewnego, społeczeństwa i lokalnych społeczności wyzwania bez precedensu. Jeśli nie zostaną wdrożone skuteczne strategie adaptacyjne, wiele drzewostanów może stracić swoje funkcje – od funkcji wodochronnej, przez magazynowanie dwutlenku węgla, po bioróżnorodność i wartości rekreacyjne. Tymczasem dzięki rozwojowi teledetekcji, modelowania przestrzennego i wiedzy o ekologii drzew istnieją dziś realne narzędzia, by podejmować decyzje świadomie i z wyprzedzeniem. W obliczu coraz bardziej nieprzewidywalnych warunków pogodowych i rosnącej antropopresji kluczowe staje się zrozumienie, że aktywna adaptacja nie jest wyborem, lecz koniecznością, aby kolejne pokolenia mogły korzystać z wielorakich dóbr i usług, jakie oferują lasy.

Ochrona całego spektrum funkcji lasów wymaga działań adaptacyjnych z elastycznym planowaniem i stałym monitoringiem. Przyszłość leży w lasach złożonych z gatunków dostosowanych do lokalnych warunków siedliskowych. W przypadku lasów gospodarczych kluczowe jest skrócenie okresu rotacji drzewostanów zagrożonych, przebudowa składu gatunkowego i maksymalne wykorzystanie naturalnych odnowień.

Z punktu widzenia praktyki leśnej niezbędne jest tworzenie narzędzi, które pozwolą szybko reagować na zmieniające się warunki. Nowoczesne technologie, w tym teledetekcja i skanowanie laserowe, powinny stać się podstawowym elementem planowania i wczesnego ostrzegania. Równocześnie adaptacja wymaga szerokiego społecznego porozumienia – to, co kiedyś było postrzegane jako sprzeczność między użytkowaniem a ochroną, dziś musi stać się zintegrowanym działaniem dla dobra przyrody i społeczeństwa. Ostatecznie to, czy lasy pozostaną naszą zieloną tarczą w dobie zmian klimatu, zależy od tego, jak szybko i świadomie wdrożymy strategie adaptacyjne. Współpraca naukowców, praktyków leśnych i lokalnych społeczności jest dziś nie tylko wartością dodaną, ale koniecznością.

WYBRANE POZYCJE LITERATURY

- Allen, C.D. et al. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality. *Forest Ecology and Management*.
- Adams, H.D. et al. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*.
- Bolte, A. et al. (2009). Adaptive forest management in Central Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24, 473–482.
- Choat, B. et al. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*.
- Fischer, R. et al. (2025). Perspectives for forest modeling. *Journal für Kulturpflanzen*, 77(2), 50–69.
- Forzieri, G., et al. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications*.
- FOREST EUROPE (Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe). (2020, 19 December). State of Europe's Forests 2020. Bratislava: FOREST EUROPE Liaison Unit.
- Hartmann, H., et al. (2025). European forests under increasing pressure from global change-driven invasions and accelerating epidemics. *Journal für Kulturpflanzen*, 77(2), 6–24.
- Hartmann, H. et al. (2025). Forest protection under climate change. *Journal für Kulturpflanzen*, 77(2), 1–5. DOI: 10.5073/JfK.2025.02.01
- IPCC, 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*.
- Joga, M.R. et al. (2021). RNA interference-based forest protection. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Lutz, T. et al. (2024). Biocontrol of ash dieback disease. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131, 1311–1321.
- Mina, M. et al. (2022). Managing for the unexpected. *Global Change Biology*, 28, 4323–4341.
- Seidl, R. et al. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*.
- Socha, J., et al. (2023). Higher site productivity and stand age enhance forest susceptibility to drought-induced mortality. *Agricultural and Forest Meteorology* 341.
- Socha, J. (2024). Forum Akademickie: Jak ratować funkcje lasu w dobie zmian klimatu. *Forum Akademickie*.
- Socha, J. (2025). Wywiad Gazety Leśnej: O adaptacji gospodarki leśnej do zmian środowiskowych. *Gazeta Leśna*.
- Spathelf, P. et al. (2018). Integrating AFM and forest landscape restoration. *Annals of Forest Science*, 75, 55.

Prof. dr hab. inż. Jarosław Socha
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Leśny
Katedra Zarządzania Zasobami
Leśnymi jaroslaw.socha@urk.edu.pl

Referat z sesji naukowej nt.: "Racjonalność i odpowiedzialność w zarządzaniu zasobami leśnymi w Polsce" z okazji 124 Zjazdu Delegatów Polskiego Towarzystwa Leśnego w Krakowie, 03-06.09.2025 r.

