

WYZWANIA DLA SZKÓŁKARSTWA KONTENEROWEGO W OBLICZU ZMIAN KLIMATYCZNYCH

MATERIAŁY POKONFERENCYJNE
OPRACOWANE I WYDANE Z OKAZJI 100-LECIA LASÓW PAŃSTWOWYCH



Regionalna Dyrekcja
Lasów Państwowych w Toruniu

100 LAT
1924–2024
Lasów Państwowych

WYZWANIA DLA SZKÓŁKARSTWA KONTENEROWEGO W OBLICZU ZMIAN KLIMATYCZNYCH

MATERIAŁY POKONFERENCYJNE
OPRACOWANE I WYDANE Z OKAZJI 100-LECIA LASÓW PAŃSTWOWYCH
NA PODSTAWIE REFERATÓW PRZEDSTAWIONYCH
PODCZAS MIĘDZYNARODOWEJ KONFERENCJI NAUKOWEJ
POD TYM SAMYM TYTUŁEM, KTÓRA ODBYŁA SIĘ NA TERENIE
REGIONALNEJ DYREKCJI LASÓW PAŃSTWOWYCH W TORUNIU
W DNIACH OD 6 DO 7 PAŹDZIERNIKA 2022 R.

TORUŃ - 2024



Regionalna Dyrekcja
Lasów Państwowych w Toruniu



Wyzwania dla szkółkarstwa kontenerowego w obliczu zmian klimatycznych

Recenzent:

prof. dr hab. Władysław Barzdajn

Redaktor:

dr inż. Maciej Kuss

Korekta:

Ewa Wróblewska

Skład i łamanie, projekt okładki:

Maciej Kwiatkowski

Fotografie wykorzystane na okładce i w książce, poza artykułami, pochodzą ze zbiorów Archiwum RDLP w Toruniu i Nadleśnictwa Dobrzejewice (autorzy: Jerzy Bargiel, Jarosław Chłąd i Kamila Czajka).

Wydawcy:

Regionalna Dyrekcja

Lasów Państwowych w Toruniu

ul. Mickiewicza 9

87-100 Toruń

www.torun.lasy.gov.pl

Oficyna Wydawnicza Kucharski

www.oficynamjk.com.pl

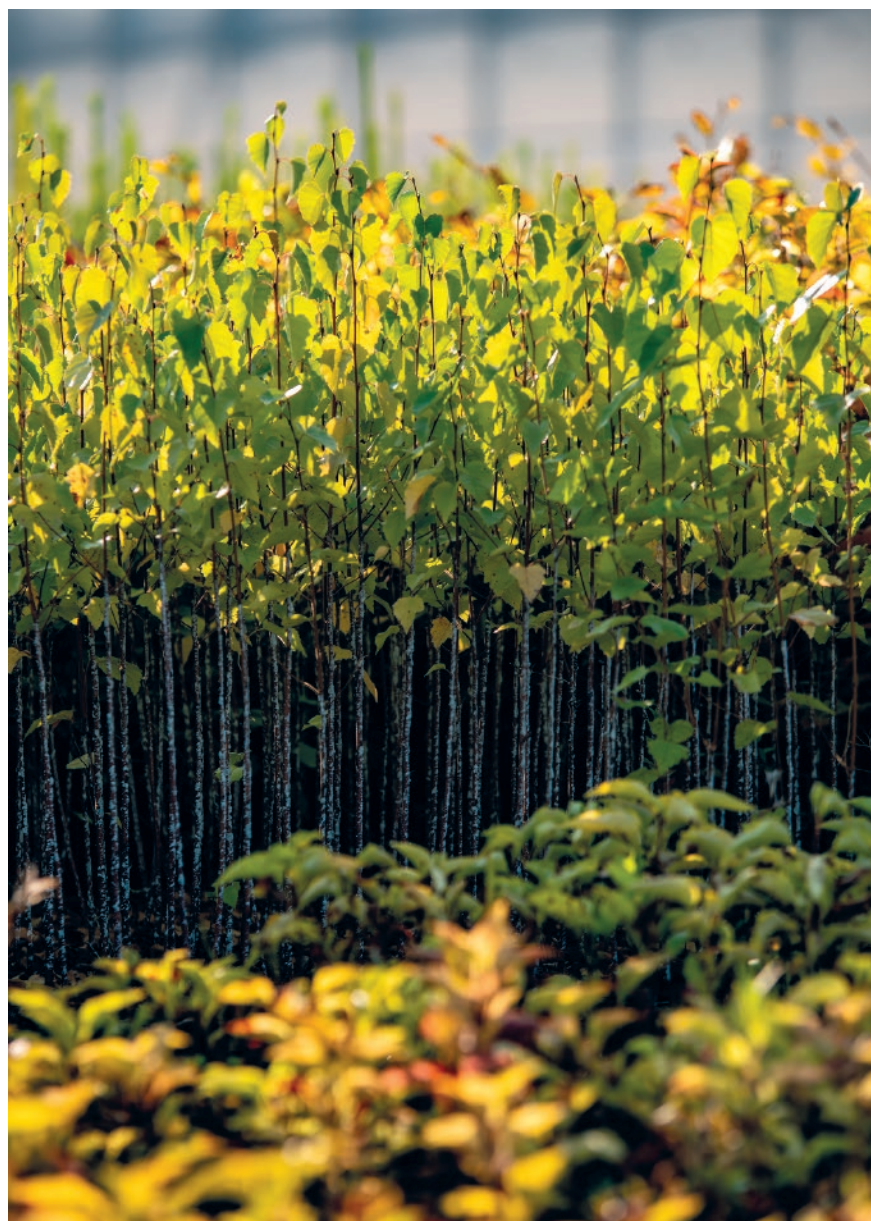
ISBN 978-83-64232-75-6

© Copyright by

Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Toruniu, 2024

Spis treści

Przedmowa	6
Bogdan Chojnicki	
Co zmiana klimatu oznacza dla funkcjonowania środowiska?	10
Mariusz Lamentowicz, Maciej Gąbka	
Ochrona torfowisk i torfu w lasach	26
Stanisław Małek, Jacek Banach, Józef Barszcz, Katarzyna Dudek, Grzegorz Durło, Mariusz Kormanek, Michał Jasik	
Optymalizacja produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym w wybranych szkółkach kontenerowych	55
Stanisław Drozdowski	
Zagospodarowanie lasu w świetle europejskiej strategii na rzecz bioróżnorodności	70
Andrzej M. Jagodziński	
Konsekwencje podcinania korzeni drzew w produkcji szkółkarskiej . . .	81
Piotr Robakowski, Wojciech Kowalkowski, Władysław Barzdajn, Tomasz Wyka, Artur Jankowski, Emilia Pers-Kamczyc, Barbara Politycka	
Wzrostowa i fizjologiczna reakcja drzew na regulowany deficyt wodny w szkółkach leśnych.	112
Wojciech Kowalkowski, Władysław Barzdajn, Maria Hauke, Robert Korzeniewicz, Marcin Zadworny	
Sadzonki z odkrytym czy zakrytym systemem korzeniowym – dylemat wyboru	125
Ewelina Ratajczak, Joanna Kijowska-Oberc	
Cała nadzieja w nasionach. Znaczenie żywotności nasion dla produkcji szkółkarskiej w kontekście zmian klimatu.	141



Przedmowa

Przekazywana Państwu publikacja została wydana z okazji setnej rocznicy istnienia Lasów Państwowych, które funkcjonują od 1924 r., jak również z okazji stulecia istnienia Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Toruniu, która jako nadzorująca lasy Pomorza i Kujaw powstała już w roku 1925, będąc wówczas jedną z pierwszych tego typu jednostek w tworzonej strukturze administracji leśnej w Polsce.

Wydawnictwo to zawiera zbiór wartościowych referatów wygłoszonych podczas konferencji naukowej pt. „Wyzwania dla szkółkarstwa kontenerowego w obliczu zmian klimatycznych”, która odbyła się na terenie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Toruniu w październiku 2022 r. Organizatorem konferencji była Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych i gospodarze, tj. RDLP w Toruniu i Nadleśnictwo Dobrzejewice. W ramach tego wydarzenia uczestnicy mogli zapoznać się z przekazywanymi przez przedstawicieli świata nauki wartościowymi informacjami, jak również z wynikami najnowszych badań, tematycznie nawiązującymi do tytułu konferencji.

Zmiany klimatyczne, kiedyś tylko przewidywane, teraz stały się faktem, a na co dzień ich symptomy możemy już sami obserwować w otaczającej nas rzeczywistości. Najbardziej odczuwalne z nich to podwyższona temperatura, objawiająca się coraz częściej występującymi i coraz dłuższymi okresami upałów, a co z tym się wiąże mniejszymi niż przed laty wartościami opadów atmosferycznych nierównomiernie rozłożonych w czasie, czego skutki najbardziej dotkliwiej objawiają się w okresie wiosenno-letnim w postaci zjawiska suszy. Anomalie w zakresie dużych różnic temperatur na poszczególnych obszarach Polski i powstające przy tym znaczne różnice ciśnienia z kolei coraz częściej

powodują silne wiatry, które aktualnie już nierzadko przyczyniają się do powstania szkód w lasach, nawet o charakterze klęsk żywiołowych, czego przykładem były zniszczenia po huraganie z 11 sierpnia 2017 r. Zaistniały one wtedy na obszarze ok. 80 tys. ha, obejmując swym zasięgiem lasy czterech dyrekcji LP, poczynając od wrocławskiej przez poznańską i toruńską, a skończywszy na gdańskiej.

Hodowla lasu, będąc jednym z podstawowych działów gospodarki leśnej, odpowiedzialnym za odtwarzanie lasu i powstawanie nowych zróżnicowanych gatunkowo upraw leśnych, a w konsekwencji stabilnych drzewostanów dojrzałych, wychodzi dziś naprzeciw tym wszystkim wyzwaniom, jakie natura i klimat stawiają przed leśnictwem jako ważnym działem polskiej gospodarki. W toku działań typowo hodowlanych nie zapomina się również o elementach przyrodniczych traktowanych jako dobra nadrzędne, których zachowanie i ochrona przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe są kontynuowane już od stu lat. Potwierdzeniem tego jest fakt, że zdecydowana większość form ochrony przyrody od dziesięcioleci ustanawiana jest na obszarach zarządzanych przez Lasy Państwowe i z inicjatywy leśników.

Las zaczyna się od małego nasionka i sadzonki. Stąd przede wszystkim ważne jest zadbanie o to, aby na samym początku, już podczas zakładania upraw leśnych użyć odpowiedniego pod względem genetycznym i najlepszego jakościowo materiału siewnego, na bazie którego powstaną silne, dobrze przystosowane do warunków środowiska sadzonki drzew. W zakresie doboru materiału siewnego naprzeciw tym wyzwaniom wychodzi selekcja, nasienictwo i genetyka leśna, natomiast w zakresie produkcji materiału sadzeniowego – szkółkarstwo kontenerowe. To właśnie w szkółkach kontenerowych jest możliwość racjonalnego wykorzystania materiału siewnego, prowadzenia produkcji sadzonek w pełni kontrolowanych warunkach, w ciągu tylko jednego sezonu wegetacyjnego, z zakrytym i w całości zachowanym systemem korzeniowym. Wymienione wyżej walory szkółkarstwa kontenerowego są

nieocenione między innymi przy produkcji sadzonek na uprawy pochodne, na tzw. uprawy pokłękowe, kiedy jest konieczność produkcji dużych ilości materiału sadzeniowego w krótkim czasie do odnowienia rozległych terenów pokłękowych oraz na tzw. tereny trudne, gdzie system korzeniowy zabezpieczony w bryłce substratu torfowego pozwala przetrwać sadzonkom pierwsze miesiące i zaaklimatyzować się na uprawach o szczególnie trudnych warunkach siedliskowych.

Następnym krokiem jest stworzenie najlepszych warunków do wzrostu i rozwoju nowych pokoleń drzewostanów w ramach odpowiednio prowadzonych i indywidualnie dobranych do poszczególnych powierzchni leśnych rębni, w ramach których oprócz zastosowania najlepszego jakościowo materiału sadzeniowego, zachowuje i wykorzystuje się dzisiaj wszystko to, co wartościowe w lesie już jest. W tym przede wszystkim powstałe samorzutnie odnowienia naturalne i odpowiednie jakościowo fragmenty drugiego piętra macierzystego drzewostanu, ale również wszystkie elementy wartościowe przyrodniczo.

Zmian klimatu nie da się zatrzymać, ale przez wykorzystanie wiedzy, posiadanego doświadczenia i wypracowanej przez lata technologii można zniwelować negatywny wpływ tych zmian na istniejące młodsze i starsze ekosystemy leśne, ale też na te, które są bardzo młode lub dopiero powstają. Przy tym jest jednak bardzo ważne, aby na bieżąco dzielić się z innymi zainteresowanymi tym, co wartościowe merytorycznie, a przede wszystkim tym, co zostało wypracowane przez długie lata w ramach przeprowadzonych doświadczeń lub w toku ciągłych udoskonaleń i jest istotne w kontekście praktycznego stosowania.

Chcąc zrealizować powyższe przesłanki w ramach założonej tematyki, organizatorzy wybrali formułę konferencji, zapraszając na nią gremia naukowców, ale też przedstawicieli poszczególnych regionalnych dyrekcji LP i nadleśnictw przy odpowiednio dobranych tytułach wystąpień zaproszonych prelegentów. Treści i dane zaprezentowane w referatach podczas konferencji okazały się być bardzo ciekawe, wartościowe merytorycznie i stanowią bardzo dobre źródło

wskazówek dla praktyki leśnej, stąd zdecydowano o ich opublikowaniu. Materiały przekazane do publikacji przez prelegentów zrecenzował pan profesor dr hab. Władysław Barzdajn z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, za co serdecznie Jemu dziękuję.

dr inż. Maciej Kuss

Naczelnik Wydziału Hodowli Lasu RDLP w Toruniu



Bogdan Chojnicki

Pracownia Bioklimatologii, Katedra Ekologii i Ochrony Środowiska

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Co zmiana klimatu oznacza dla funkcjonowania środowiska?

Zmiana klimatu to ostatnio jeden z najczęściej podejmowanych tematów zarówno w przestrzeni społecznej, jak i w środowiskach naukowych. Temat ten jest niezwykle ważny, albowiem otaczająca nas rzeczywistość była dotychczas uformowana zgodnie z założeniem niezmienności klimatu, a wszelkie opracowania dotyczące chociażby sposobów uprawy czy konstrukcji budynków zakładały, że długoterminowo parametry klimatyczne pozostaną niezmiennie. Dopiero od niedawna w społeczeństwie dojrzeła świadomość zmiany klimatu i to, że zmiana parametrów meteorologicznych będzie miała bezpośrednie konsekwencje zarówno dla życia ludzi, jak i funkcjonowania środowiska. Zmiana ta już ma, ale też będzie miała szczególny wpływ na te sektory gospodarki, w których produkcja zależy od warunków meteorologicznych, np. rolnictwo czy leśnictwo. Celem tej publikacji jest opis wpływu zmiany klimatu na zdolności ekosystemów do dostarczania człowiekowi dóbr materialnych i niematerialnych.

Człowiek – unikalny gatunek

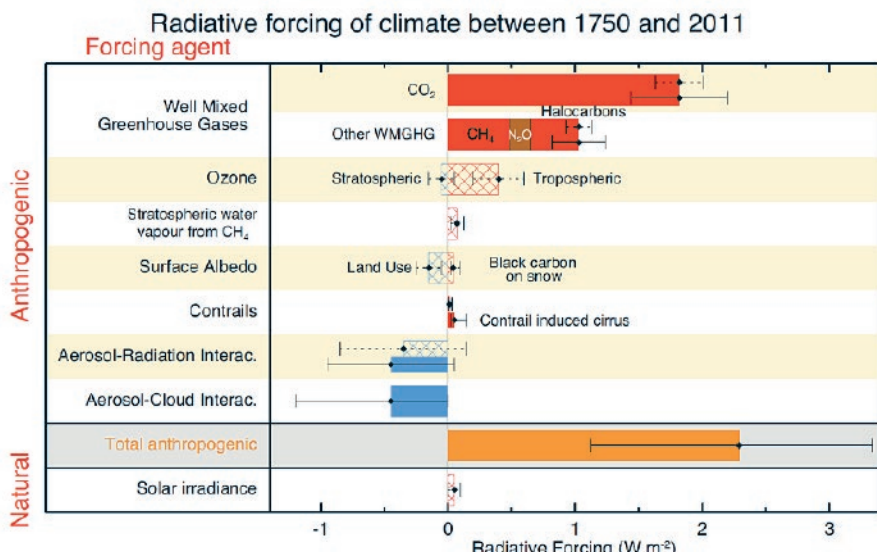
Człowiek jako gatunek funkcjonuje na Ziemi od kilkuset tysięcy lat, ale jego oddziaływanie na środowisko narastało i było ono skutkiem rozwoju wiedzy i techniki, które pozwalały na coraz szersze korzystanie z zasobów środowiska.

Umiejętności człowieka rozwijały się także pod dyktando zmieniających się warunków termicznych, np. obserwowany ok. 12 tys. lat temu rozwój rolnictwa wynikał w dużej mierze z ocieplenia klimatu wywołanego interglacją. Aktywność rolnicza przez tysiące lat powodowała coraz większą presję człowieka na środowisko, jednak dopiero ok. 300 lat temu wynalazek maszyny parowej w Europie zapoczątkował rozwój przemysłu, dzięki któremu człowiek stał się gatunkiem dominującym na Ziemi. Narastające wciąż oddziaływanie człowieka na środowisko wynika z coraz większego wykorzystania energii uzyskiwanej ze spalania nieodnawialnych paliw kopalnych, takich jak: węgiel, ropa naftowa i gaz. Innymi słowy, dotychczasowy rozwój opierał się na rozpraszaniu energii zgromadzonej w kopalinach, które powstały ok. 150-300 mln lat temu. Obecnie, dzięki odpowiedniemu kierunkowaniu strumieni tej energii, 56% zasobów lądowych wody jest wykorzystywane przez człowieka, przeobrażonych zostało 83% powierzchni lądu „wolnego od lodu”, a tempo zaniku gatunków jest 100-1000 razy szybsze niż przed pojawieniem się człowieka (Schramski i in. 2015). Człowiek też sprawił, że obecnie ludzie i zwierzęta hodowlane stanowią 97% masy kręgowców, podczas gdy jeszcze 10 tys. lat temu było to 0,1% (Skubała 2020). W ten sposób obecny stan przytłaczającej części ekosystemów na Ziemi jest skutkiem presji człowieka, a ochrona środowiska często postrzegana jest jako dbałość o „produktywność” użytkowanych ekosystemów. Ten antropocentryczny model myślenia sprawia, iż ochrona środowiska jest zdecydowanie rzadziej postrzegana jako ratowanie ekosystemów stanowiących niewielkie, wciąż kurczące się, zasoby wolne od presji człowieka.

Zmiany wymuszenia radiacyjnego w atmosferze

Patrząc z perspektywy procesów fizycznych zachodzących w atmosferze aktywność człowieka wywołuje zarówno jej „ochłodzenie”, jak i „ogrzewanie” (IPCC 2014). Miarą tego oddziaływania jest wartość tzw. wymuszenia radiacyjnego. Gdy parametr ten przyjmuje wartości ujemne, to oznacza, że zmiana,

którą opisuje wymuszenie radiacyjne, powoduje ubytek energii, a w przypadku wartości dodatnich mamy do czynienia ze wzrostem ilości energii w systemie Ziemia-Atmosfera. Oddziaływanie człowieka na globalny system klimatyczny jest złożone, ale dobrym podsumowaniem tego oddziaływania jest poniższa rycina, na której poszczególne czynniki naturalne i antropogeniczne zostały przedstawione w ilościowy sposób i wyrażone w $W \cdot m^{-2}$ (Ryc. 1).

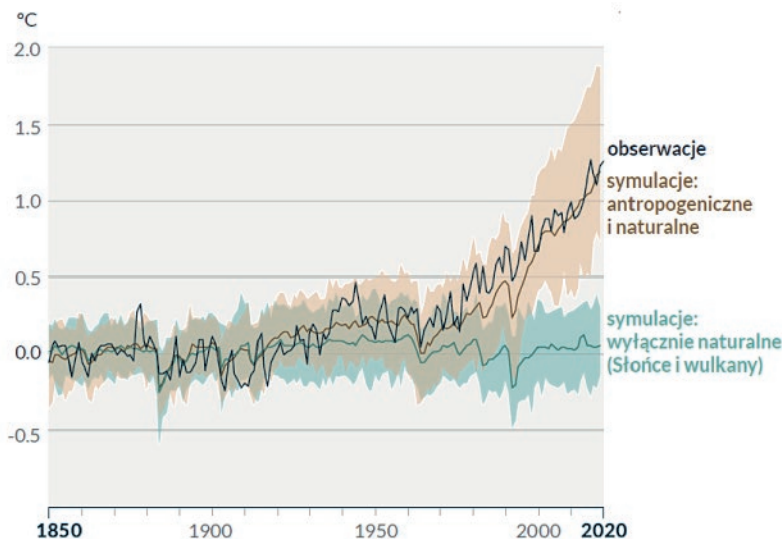


Ryc. 1. Wymuszenie radiacyjne powodujące wzrost („ocieplenie”) oraz spadek („ochłodzenie”) ilości energii w systemie Ziemia-Atmosfera wyliczone dla okresu 1750-2011 (na podstawie Myhre i in. 2013).

Suma wymuszeń radiacyjnych (najniższy słupek na rycinie 1) wskazuje, że wszystkie zmiany bilansu cieplnego atmosfery działają w kierunku wzrostu globalnej temperatury, a obecnie obserwowana zmiana klimatu jest wynikiem działalności człowieka. Szacuje się, że od umownie przyjętego okresu 1850-1900, w którym na powszechną skalę zaczęto wydobywać i spalać paliwa kopalne, temperatura globu wzrosła o ok. $1,1^{\circ}C$ (IPCC 2014). Ten wzrost wydaje się nieznaczny, jednak oznacza on zwiększenie dostępnej energii w atmosferze, dlatego należy się spodziewać, że będzie to prowadziło do dynamizacji zjawisk atmosferycznych.

Klimat już się ociepla, ale przyszłość zależy od nas

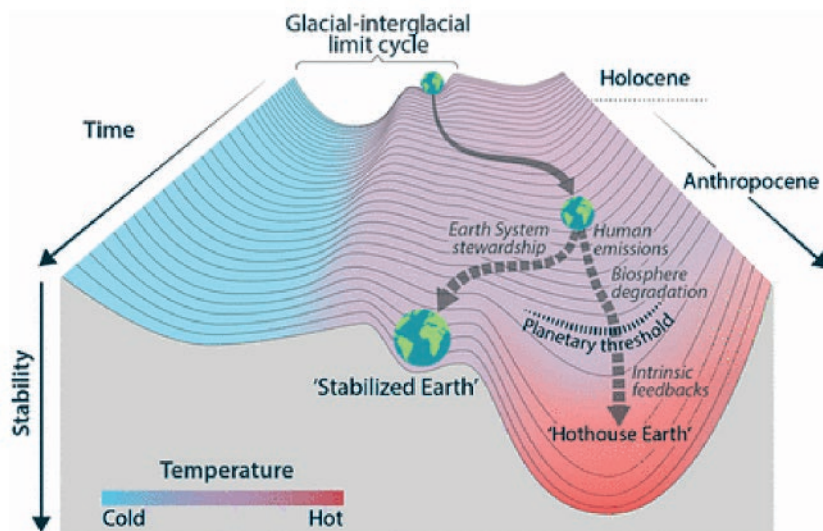
Trzeba też dodać, że system termodynamiczny Ziemia-Atmosfera zmienił się znajduje się w stanie dynamicznej równowagi i przez ostatnie 900 tysięcy lat ta równowaga objawiała się naprzemiennie występującymi okresami ochłodzenia (glacjały) i ocieplenia (interglacjały). Te zmiany były wywołane przyczynami naturalnymi i w ten sposób system klimatyczny znajdował się przez ten czas w określonym „korytarzu termicznym”. Obecna zmiana polegająca na pojawieniu się ingerencji człowieka w biosferę sprawia, iż temperatura na Ziemi rośnie, chociaż modele klimatyczne biorące pod uwagę tylko czynniki naturalne wskazują na bardzo powolny spadek temperatury (Ryc. 2).



Ryc. 2. Zmiana globalnej temperatury powierzchni (średnie roczne): obserwowana (czarna linia) i symulowana modelami klimatu przy uwzględnieniu czynników antropogenicznych i naturalnych (brązowa linia) oraz wyłącznie naturalnych (zielona linia) dla okresu 1850-2020 (IPCC 2021).

Innymi słowy, oddziaływanie człowieka na klimat sprawia, iż plejstocenijski scenariusz termiczny dla Ziemi nie jest realizowany, a w miejsce powolnego spadku obserwowany jest gwałtowny wzrost temperatury globalnej. Ten

wzrost temperatury po przekroczeniu progu $1,5^{\circ}\text{C}$ sprawi, iż dotychczasowy okresowy charakter klimatu Ziemi będzie się zmieniał samorzutnie w kierunku tzw. Ziemi cieplarnianej i zmiana ta będzie nieodwracalna (Ryc. 3).



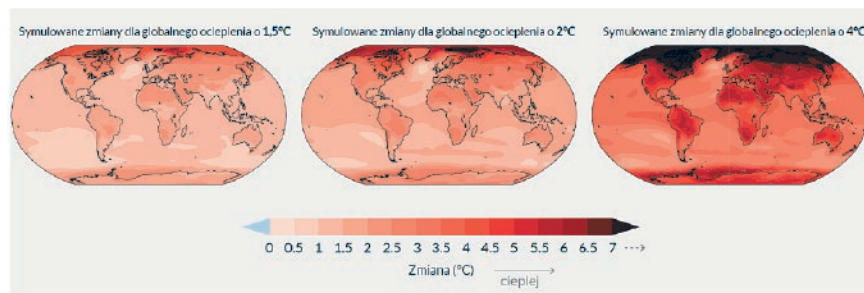
Ryc. 3. Schemat dynamiki systemu termodynamicznego Ziemia-Atmosfera oraz możliwe ścieżki tego systemu do stanu „Ziemi ustabilizowanej” (ang. Stabilized Earth) lub „Ziemi cieplarnianej” (ang. Hothouse Earth) po przekroczeniu progu planetarnego (ang. Planetary threshold) (Steffen i in. 2018).

W świetle badań oddziaływanie człowieka na klimat jest dowiedzione. Oczywiste jest, że oddziaływanie to można zredukować, a przez to uniemożliwić przekroczenie progu termicznego $1,5^{\circ}\text{C}$. Osiągnięcie tego celu wymaga obecnie zdecydowanych działań w kierunku redukcji emisji gazów powodujących globalne ocieplanie. Wciąż jest szansa na zatrzymanie zmiany klimatu i nieprzekroczenie progu planetarnego.

Wzrost temperatury i rosnące opady w Polsce

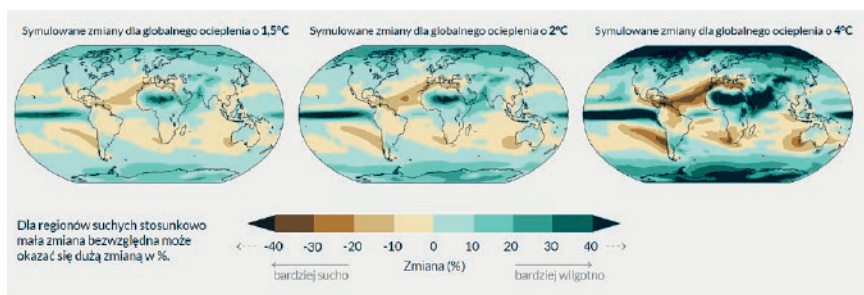
Globalna zmiana klimatu to pojęcie, za którym kryją się różne scenariusze zmian parametrów meteorologicznych i jest to zależne od regionu świata.

Dlatego wzrost temperatury na naszym globie nie jest przestrzennie równomierny, a regiony świata znajdujące się dalej od równika doświadczają większego tempa wzrostu temperatury, niż te znajdujące się w jego okolicy (Ryc. 4). W ten sposób szczególnie w północnych regionach kuli ziemskiej wzrost temperatury jest najbardziej widoczny.



Ryc. 4. Symulacje wariantowe (projekcje) zmian średniej rocznej temperatury powierzchni względem okresu 1850-1900 (IPCC 2021).

Globalne ocieplenie w określonych regionach wywoła wzrosty, a w innych redukcję opadów (Ryc. 5). Szczególnie widoczne są redukcje opadów w okolicach Morza Śródziemnego i Karaibów. Zwłaszcza pierwszy z wymienionych regionów jest coraz mocniej zagrożony niedoborami wody.



Ryc. 5. Symulacje wariantowe (projekcje) zmian opadów względem okresu 1850-1900 (IPCC 2021).

Przewidywana zmiana klimatu na Ziemi ma w oczywisty sposób charakter wariantowy (są to tzw. projekcje), albowiem przyszłe wartości parametrów

meteorologicznych wciąż zależą od działań człowieka i od jego wysiłków w kierunku redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Obecne działania mające na celu zatrzymanie zmiany klimatu są na tyle niewielkie, że obowiązującym scenariuszem jest ten najmniej optymistyczny, według którego w perspektywie najbliższych 100 lat globalna temperatura wzrośnie o 4°C.

Oczywiście w Polsce także doświadczamy już zmiany klimatu, choć całkiem niedawno liczba osób odnoszących się sceptycznie do istnienia zjawiska zmiany klimatu była jeszcze całkiem spora. Antropocentryczny model myślenia oraz niewątpliwy rozwój cywilizacyjny naszego społeczeństwa po II wojnie światowej [w 1945 r. tylko 10% wsi w Polsce było zelektryfikowanych (Rukszto 1970)], opierający się na powszechnym dostępie do elektryczności wytworzonej przez spalanie węgla dawały dobre podłoże do sceptycyzmu co do wpływu gazów, takich jak CO₂ na termikę atmosfery. Powtarzane dość powszechnie twierdzenia o pomijalnym wpływie tego gazu na system klimatyczny Ziemi, oparte na fakcie niskiego stężenia CO₂ w atmosferze skutecznie upraszczały powszechną świadomość, budując błędne przekonanie o odporności klimatu na zmiany, które może wywołać stosunkowo niewielka zmiana oddziaływania pojedynczego czynnika.

Dekada 2011-2020, z rekordowo wysokimi temperaturami zmieniła fundamentalnie społeczną percepcję zmiany klimatu w naszym kraju. Warto tu chociażby wspomnieć o 2019 r., który jest obecnie najcieplejszym rokiem w historii pomiarów. Można zauważyć, że w lasach polskich w 2019, a potem 2020 r. zaobserwowano potężne wydzielanie się posuszu (Grodzki i Ranocha 2021) i trzeba te zdarzenia powiązać z ekstremalnie wysokimi temperaturami powietrza, a także wynikającymi z nich niedoborami wody w środowisku. Zmiana klimatu będzie postępować dalej i będzie nadal oddziaływać na funkcjonowanie lasów w Polsce. Ważną pracą dotyczącą przyszłości polskich lasów jest publikacja Dyderskiego i in. z 2018 r. Wyniki symulacji wykonanych w ramach tych badań wyraźnie wskazały na fakt, że na takie gatunki powszechnie

występujące w polskich lasach, jak sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.), brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth), modrzew europejski (*Larix decidua* Mill.), świerk pospolity (*Picea abies* (L.) Karst.), zmiana klimatu będzie wpływać negatywnie i w konsekwencji będą one „klimatycznymi przegranymi”.

Usługi ekosystemowe

jako metoda oceny znaczenia ekosystemów dla człowieka

Aby w pełni ocenić znaczenie ekosystemów dla naszego życia, należy skorzystać z pojęcia usług ekosystemowych, które są definiowane jako bezpośredni wkład ekosystemów w dobrostan ludzi (Haines-Young, Potschin 2018). Takie antropocentryczne podejście nie odwołuje się bezpośrednio do procesów i zjawisk w środowisku, a jest raczej opisem tego, w jaki sposób człowiek może „skorzystać” na określonej funkcji (procesie w ekosystemie). To dość uproszczone (antropocentryczne) podejście do natury ma jedną poważną zaletę, albowiem tworzy ścieżkę komunikacyjną, dzięki której jesteśmy w stanie ocenić np. przez tzw. monetaryzację, korzyści z pozornie niewycenianych ekonomicznie zjawisk takich, jak np. retencja wody. W ten sposób łatwiej jest nam zrozumieć znaczenie usług ekosystemowych, ale także poznać ich różnorodność. Usługi ekosystemowe są podzielone na trzy grupy (Haines-Young, Potschin 2018):

- Zaopatrzeniowe

W tej grupie usług znajdziemy wszystkie produkty zwierzęce i roślinne (np. drewno, mięso, grzyby), czy też usługi wynikające ze zdolności do zatrzymywania i magazynowania wód powierzchniowych lub podziemnych (np. woda w studni czy zbiorniku).

- Regulacyjne i podtrzymujące

Do tej grupy usług można zaliczyć np. potencjał do ograniczania erozji, ale także zdolność do gromadzenia osadów. Kolejną wartościową usługą ekosystemową w tej grupie jest możliwość magazynowania CO₂, co pozwala potencjalnie na ograniczenie tempa wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze.

- **Kulturowe**

Wśród kulturowych usług można wymienić takie interakcje z przyrodą, jak: fizyczna służąca rekreacji, intelektualna będąca podstawą edukacji, a także estetyczna, dzięki której pojawia się w obserwatorze np. odczucie piękna.

Zrozumienie znaczenia jakiegokolwiek ekosystemu dla naszego funkcjonowania wymaga rozpatrzenia wszystkich usług ekosystemowych jednocześnie i dzięki takiemu podejściu jesteśmy w stanie w holistyczny (całościowy) sposób oszacować znaczenie ekosystemu dla społeczeństwa. Ciekawym jest też fakt, iż w ostatnich latach w naszym społeczeństwie narasta przekonanie co do coraz większego znaczenia kulturowego ekosystemów leśnych. Jest to szczególnie ważne na terenach gęściej zaludnionych, gdzie usługi zaopatrzeniowe polegające na dostarczaniu produktów zwierzęcych i roślinnych nie mają dużego znaczenia. Polskie społeczeństwo po II wojnie światowej składało się w dużej mierze z byłych mieszkańców wsi, dla których produkcyjne usługi lasu były oczywiste, a wraz z „oddalaniem się” świadomości społecznej od klasycznego użytkowego postrzegania lasu, wzrasta przekonanie o jego ważnej roli kulturowej.

Usługa regulująca lasu polegająca na ograniczaniu przyrostu CO₂ w atmosferze

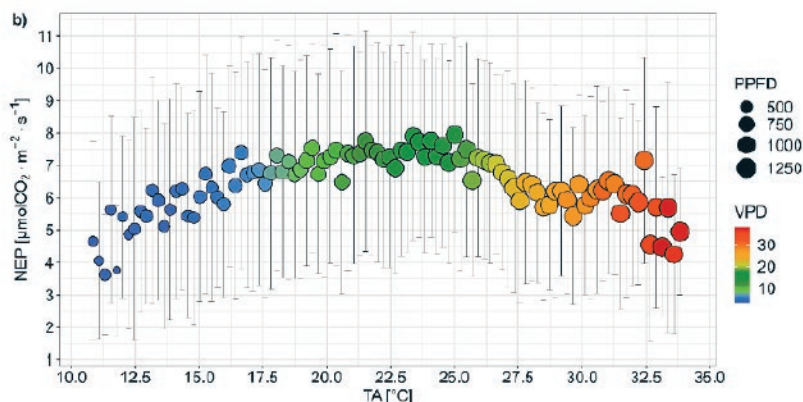
W pracy tej jednak zwrócimy szczególną uwagę na usługi regulacyjne ekosystemów, albowiem są one obecnie mało zauważalne. O ile produkty takie jak drewno i grzyby, czy też piękno terenów naturalnych, są znane przeciętnemu użytkownikowi ekosystemu, o tyle zdolność do pochłaniania CO₂ przez ekosystem jest zwykle pojęciem dalekim od codziennego doświadczenia.

Już w szkole podstawowej dowiadujemy się, że w większości ekosystemów lądowych występują rośliny, które wiążą energię słoneczną w związkach organicznych, które tworzą z dwutlenku węgla i wody. Intensywność pochłaniania CO₂ przez rośliny jest skutkiem oddziaływania takich czynników środowiskowych, jak: promieniowanie, temperatura, woda i substancje mineralne, a dzięki

procesowi fotosyntezy CO_2 wychwycony z atmosfery jest wiązany w biomasie. Jednocześnie w środowisku występują procesy prowadzące do uwalniania tego gazu do atmosfery, a są to: oddychanie roślin oraz rozkład martwej biomasy zdeponowanej w ekosystemach.

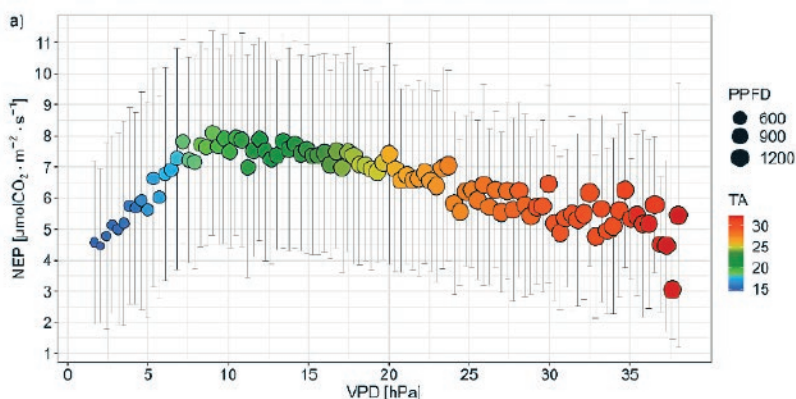
Zdolność do utrzymywania węgla w ekosystemie zależy od dwóch procesów: pochłaniania, za który odpowiedzialne są żywe rośliny (fotosynteza) i emisji, która podyktowana jest aktywnością życiową roślin, ale przede wszystkim intensywnością rozkładu martwej materii organicznej. Różnica między tymi dwoma strumieniami CO_2 stanowi wartość tzw. produkcji netto ekosystemu (NEP). Gdy wartość emisji CO_2 z ekosystemu przeważa nad pochłanianiem tego gazu w ramach fotosyntezy, wartość NEP jest ujemna.

Chociaż perspektywa wzrostu temperatury wydaje się dobroczynna dla rozwoju roślin, np. poprzez wydłużenie sezonu wegetacyjnego, to najwyższa produktywność ekosystemu obserwowana jest w zakresie temperatury optymalnej, a w przypadku przekroczenia tej wartości produktywność określonego ekosystemu spada (Ryc. 6).



Ryc. 6. Zależność produkcji netto ekosystemu (NEP) torfowiska w Rzecinie od temperatury powietrza (TA) na tle niedosytu wilgotności powietrza (VPD) i gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (Pocztka i in. 2023).

Zazwyczaj, gdy mówimy o suszach, to mamy na myśli niedobory wody w gruncie, jednak w wyższych temperaturach rośnie też niedosyt ciśnienia pary wodnej (VDP). Jest to czynnik, który potrafi skutecznie ograniczyć fotosyntezę roślin poprzez zamknięcie aparatów szparkowych w liściach, gdy $VPD > 15 \text{ hPa}$. Wysoki niedosyt to z jednej strony wyzwanie dla gospodarki wodnej rośliny, albowiem powoduje on wzrost tzw. siły ssącej atmosfery, ale także problem fizjologiczny dla rośliny, ponieważ zamknięcie aparatów szparkowych hamuje utratę wody, ale jednocześnie ogranicza proces fotosyntezy poprzez redukcję dostępności CO_2 (Ryc. 7).



Ryc. 7. Zależność produkcji netto ekosystemu (NEP) torfowiska w Rzecinie w zależności od temperatury powietrza (TA) na tle niedosytu wilgotności powietrza (VPD) i gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (Poczta i in. 2023).

Usługa regulacyjna polegająca na pochłanianiu (NEP), ale także retencjonowaniu (RT) węgla przez określony ekosystem zależy od jego typu. W tabeli poniżej umieszczono orientacyjne wartości tych parametrów dla 3 typów ekosystemów w Polsce.

Tabela 1. Wartości produkcji netto ekosystemów (NEP) oraz czasu przechowywania (retencji) węgla w ekosystemie (RT)

Ekosystem	NEP [kg C-CO ₂ ·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹]	RT [lat]
Lasy sosnowe (42-114 lat)	2950 ±3500 *	40-140****
Tereny uprawne	2400 ±1130 **	1-2
Torfowiska	840 ±600 ***	1000-12000

* Ziemblińska i in. 2016; ** Kutsch i in. 2010; *** Poczta i in. 2023; **** wg wieku rębności w Polsce.

Jak widać, lasy cechuje produkcja netto ekosystemu, porównywalna z ekosystemami rolniczymi, a torfowiska charakteryzuje najmniejsze NEP, jednak to tereny podmokłe dysponują zdolnością do najdłuższej retencji węgla. Dodatkowo tereny podmokłe zgromadziły w masie torfowej olbrzymie ilości węgla w torfie, a ich osuszanie skutkuje uwalnianiem olbrzymich ilości CO₂ do atmosfery. Dlatego ochrona terenów podmokłych, polegająca na odpowiednim uwodnieniu torfu, stanowi podstawę dbałości o zdolności regulacyjne ekosystemów torfowych.

Tereny rolnicze dysponują bardzo krótkim okresem przechowywania węgla, albowiem materia organiczna zebrana z pola (plon) ulega rozkładowi (głównie przez trawienie), a węgiel w niej zgromadzony wraca do atmosfery w postaci CO₂ lub CH₄ w przeciągu 1-2 lat po zbiorach. Czas przechowywania węgla w lesie zależy w dużej mierze od długości jego retencji w masie drzewnej i glebie. Zwykle uwaga koncentrowana jest na węglu zgromadzonym w nadziemnych częściach, a przyrastająca w okresie od odnowienia do zrębu masa jest traktowana jako jedyny zbiornik węgla w lesie. Jest to w pewnym sensie uzasadnione podejście, albowiem z perspektywy gospodarki leśnej to drewno jest jej głównym produktem. Po pozyskaniu długość przechowywania węgla

w drewnie zależy już tylko od tego, co się z nim stanie po wywiezieniu z lasu. Na przykład w przypadku użytkowania masy drzewnej na cele energetyczne węgiel, głównie w postaci CO_2 , wróci szybko do atmosfery i proces wiązania CO_2 w drzewach zaczyna się praktycznie od początku. Retencja węgla w produktach drzewnych w praktyce nie zależy od gospodarki leśnej, albowiem jest zagadnieniem, którym zajmuje się technologia drewna.

Podsumowanie

Zmiany na naszej planecie, które wywołuje coraz większa populacja ludzka, mają globalny zasięg, a w przypadku systemu Ziemia-Atmosfera dodatkowe emisje gazów szklarniowych do atmosfery (pochodzące ze spalania paliw kopalnych) zmieniają zarówno parametry chemiczne, jak i fizyczne powietrza. Istnieją różne scenariusze wzrostu temperatury globalnej, albowiem tempo tej zmiany zależy od działań człowieka, jednak obecnie obowiązujący jest scenariusz, według którego temperatura globalna wzrośnie o 4°C w ciągu najbliższych 100 lat. Pozostałe, bardziej optymistyczne scenariusze ziszczą się tylko wtedy, gdy zaczniemy działać w kierunku zdecydowanej redukcji emisji gazów szklarniowych do atmosfery. Należy też pamiętać, że po przekroczeniu tzw. progu planetarnego $1,5^\circ\text{C}$ powyżej temperatury sprzed ery przemysłowej, zmiana klimatu zacznie zachodzić samorzutnie. Antropogeniczna zmiana klimatu już jest obserwowana w Polsce i objawia się ona wyraźnym wzrostem temperatury i nieznacznymi wzrostami opadów. Jednym ze skutków tej zmiany są fale upałów i okresy suszowe. Te zjawiska niosą ze sobą konsekwencje dla funkcjonowania ekosystemów. Straty w gospodarce leśnej i rolnej będą coraz bardziej odczuwalne.

Zrozumienie znaczenia ekosystemów dla człowieka powinno zaczynać się od uświadomienia sobie, że ich efektem funkcjonowania są dobra o charakterze zarówno materialnym, jak i niematerialnym. Odpowiednie zarządzanie ekosystemami, zgodne z zasadą zrównoważonego rozwoju, wymaga szerszego

ich postrzegania poprzez analizę wszystkich usług ekosystemowych jednocześnie. Należy też zauważyć wyraźną zmianę podejścia społeczeństwa do ekosystemów. W wielu przypadkach usługi kulturowe nabierają coraz większego znaczenia, dlatego obecne zarządzanie środowiskiem będzie musiało w coraz większym stopniu uwzględniać ten typ usług.

Obok kulturowych usług ekosystemów uwagę zwracają też usługi regulacyjne, które mają szczególne znaczenie dla procesów służących mitygacji oraz przeciwdziałaniu zmianie klimatu. Dzieje się tak, albowiem ekosystemy poprzez wymianę węgla z atmosferą posiadają potencjalną zdolność do osłabienia trendu wzrostowego CO₂ w powietrzu. O ile ekosystemy leśne posiadają dużą zdolność do wychwytywania CO₂ z powietrza, o tyle ich zdolność do długoterminowego przechowywania węgla jest ograniczona i w dużej mierze zależy od sposobu gospodarowania lasem oraz od tego, w jaki sposób zostanie zagospodarowany główny produkt leśny – drewno. Torfowiska charakteryzuje stosunkowo niska zdolność do sekwestracji CO₂, jednak czas retencji węgla w tych ekosystemach sięga nawet kilkunastu tysięcy lat.

Zmiana klimatu w naszym regionie świata oznacza wyraźny wzrost temperatury powietrza i niewielki wzrost opadów, co będzie oddziaływało zarówno na zdolność do sekwestracji CO₂, ale także możliwości długoterminowego przechowywania węgla w biomase. Należy się więc spodziewać, że bez odpowiednich działań ochronnych polegających na zabezpieczeniu warunków wodnych, ekosystemy te będą często się zmieniać w emitery netto CO₂ do atmosfery, a ich zdolności do osłabienia trendu wzrostowego temperatury globalnej będą coraz mniejsze.

Literatura

Dyderski M.K., Paż S., Frelich L.E., Jagodziński A.M. 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 24 (3), pp. 1150-1163. DOI: 10.1111/gcb.13925.

- Grodzki W., Ranocha M. 2021. Konsekwencje objęcia ochroną ścisłą znacznych obszarów leśnych Polski (wdrożenie jednego z celów unijnej Strategii na rzecz bioróżnorodności do 2030 roku – objęcie ścisłą ochroną 10% obszarów lądowych, w tym wszystkich pozostałych w UE lasów pierwotnych i starodrzewów), z uwzględnieniem następstw zmian klimatycznych, w szczególności w kontekście zagrożenia drzewostanów ze strony owadów (kambiofagów i foliofagów), ekspertyza dla GDLP nr 620502, IBLes, http://zlpwpr.pl/wp-content/uploads/2021/03/ZP.270.3.2021_EZ.271.2.4.2021_620502_Grodzki.pdf.
- Haines-Young R., Potschin-Young M. 2018. Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A Policy Brief. One Ecosystem. 3. e27108. 10.3897/oneeco.3.e27108.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kutsch W.L., Aubinet M., Buchmann N., Smith P., Osborne B., Eugster W., Wattenbach M., Schrumpf M., Schulze E.D., Tomelleri E., Ceschia E., Bernhofer C., Béziat P., Carrara A., Di Tommasi P., Grünwald T., Jones M., Magliulo V., Marloie O., Moureaux C., Oliso A., Sanz M.J., Saunders M., Søgaard H., Ziegler W. 2010. The net biome production of full crop rotations in Europe, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 139, Issue 3, s. 336-345.
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestad J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T. and Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.

- Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Poczta P., Urbaniak M., Harenda K.M., Sachs T., Klarzyńska A., Juszczak R., Schüttemeyer D., Czernecki B., Kryszak A., Chojnicki B.H. 2023. Multiyear study of „floating carpet” temperate peatland productivity and its relation to biophysical factors. *Agricultural and Forest Meteorology* (w recenzji).
- Rukszto C. 1970. Elektryfikacja wsi. W: Stanisław Andrzejewski, Tadeusz Sapiński: *Rozwój energetyki w PRL*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1970, s. 199-212 (pol.).
- Schramski J.R., Gattie D.K., Brown J.H. 2015. Human domination of the biosphere: Rapid discharge of the earth-space battery foretells the future of humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112 (31), pp. 9511 DOI: 10.1073/pnas.1508353112.
- Skubała P. 2020. Biomasa organizmów żywych na Ziemi dawniej i dzisiaj. *Aura*, 2020, nr 12, s. 24-25. <http://dx.doi.org/10.15199/2.2020.12.3>.
- Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T.M., Folke C., Liverman D., Summerhayes C.P., Barnosky A.D., Cornell S.E., Crucifix M., Donges J.F., Fetzer I., Lade S.J., Scheffer M., Winkelmann R., Schellnhuber H.J. 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, *PNAS*, 115 (33) 8252-8259, <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.
- Ziemblińska K., Urbaniak M., Chojnicki B.H., Black T.A., Niu S., Olejnik J. 2016. Net ecosystem productivity and its environmental controls in a mature Scots pine stand in north-western Poland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228-229, pp. 60-72. 10.1016/j.agrformet.2016.05.022.

Mariusz Lamentowicz

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Maciej Gąbka

Zakład Hydrobiologii, Wydział Biologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

Ochrona torfowisk i torfu w lasach

Znaczenie torfowisk

Torfowiska to wyjątkowe ekosystemy, pełniące wiele funkcji w różnorodnych kontekstach czasowych i przestrzennych (Joosten & Clarke 2002; Joosten 2003; Biancalani & Avagyan 2014). Charakteryzują się posiadaniem warstwy materii organicznej będącej efektem akumulacji nierozłożonych szczątków roślin torfotwórczych (Tobolski 2000; Tobolski 2003). Współczesne torfowiska są efektem gromadzenia się torfu głównie w ciągu ostatnich 11 700 lat (Holocen) (Barber 1993; Tobolski 2000; Charman 2002). Podobne procesy doprowadziły do powstawania torfowisk w karbonie (około 358-298 milionów lat temu), kiedy potężne bagna gromadziły efektywnie miększe pokłady materii organicznej, wydysajac dwutlenek węgla z atmosfery (Kulczyński 1952, Thomas 2012). Po wielu milionach lat torf przekształcił się w węgiel kamienny, natomiast najważniejsze pokłady węgla brunatnego zgromadziły się w miocenie ok. 20 milionów lat temu (Thomas 2012). Torfowiska pełniły zatem ważne funkcje dla powstawania życia i klimatu Ziemi sięgające wiele milionów lat wstecz (Feulner 2017).

Torfowiska zajmują ogółem około 1,6 mln ha powierzchni Polski (5%), z czego 1,3 mln ha jest odwodniona (Jabłońska i in. 2021). W zależności od rodzaju torfu 92,4% powierzchni torfowisk stanowią torfowiska niskie, 3,3% torfowiska przejściowe, natomiast torfowiska wysokie stanowią 4,3% powierzchni (Kotowski i in. 2017). Ponieważ 84,6% jest odwodniona (Jabłońska i in. 2021), przez co są emiterami gazów cieplarnianych, głównie CO₂ do atmosfery. Stan zachowania znajduje odzwierciedlenie w wysokich emisjach z osuszonych i eksploatowanych torfowisk, wynoszących około 34,6 Mt ekw. CO₂/rok (Jabłońska i in. 2021; Kotowski 2021). Zasoby węgla pierwiastkowego zgromadzonego w torfie w Polsce oszacowano na 2,1 Gt C. Jest to przybliżone przeliczenie objętości torfu na zawartość węgla, przy założeniu, że w większości torfowisk w Polsce znajduje się torf niski, w którym w 1 m³ torfu znajduje się ok. 75 kg węgla pierwiastkowego (estymacje na podstawie dostępnych danych zawierających powierzchnię i objętość torfu w Polsce) (Bitner 1958; Jabłońska i in. 2021). Takie wartości pokazują, że torfowiska zawierają ponad dwa razy więcej węgla pierwiastkowego niż ten związany w biomase drzewnej na pniu na obszarze Lasów Państwowych (ok. 923 Mt C) (Lasy Państwowe 2021).

Kryzys ekologiczny i antropogeniczne globalne ocieplenie spowodowane w dużej mierze przez spalanie paliw kopalnych (Allegrini i in. 2007) wpływają negatywnie na wiele ekosystemów, w tym współczesne torfowiska, które jednocześnie są szeroko eksploatowane, osuszane i zalesiane (IPCC 2021, Lawson i in. 2022). Pomimo rosnącej świadomości, torf jest ciągle wykorzystywany w ogrodnictwie oraz w szkołkach leśnych (Joosten & Timmermann 1999; Gaudig 2001). To powoduje, że emisje węgla z zaburzonych przez eksploatację torfowisk, wpływają na globalny klimat oraz ciągły wzrost efektu cieplarnianego (Harenda i in. 2018). Taka sytuacja zmusza naukowców, przedsiębiorców oraz instytucje państwowe do poszukiwania alternatywnych rozwiązań pozwalających na rezygnację z torfu. Działania

Zaczęliśmy być świadomi tego, jak ważną rolę pełnią torfowiska w kontekście emisji dwutlenku węgla (Loisel i in. 2021). Torfowiska okazały się być jednymi z najważniejszych „zbiorników” węgla na lądach (Gallego-Sala i in. 2018; Nichols & Peteet 2021). Pomiary emisji gazów cieplarnianych pokazują, jak wiele dwutlenku węgla wydostaje się do atmosfery z osuszonych torfowisk (Kotowski 2021). Rosnąca wiedza naukowa o znaczeniu torfowisk dla klimatu sprawia, że została zauważona wartość tych ekosystemów w kontekście wpływu na klimat obecnie i w przeszłości (Ratcliffe i in. 2020). Torfowiska są już nie tylko siedliskiem rzadkich gatunków roślin i ptaków, ale ważnymi ogrodami węgla, w których zachodzą procesy istotne dla ludzi i klimatu, lokalnie i globalnie (Loisel & Walenta 2022), a ochrona przyrody torfowisk jest w takim kontekście jeszcze bardziej istotna.

Torfowiska występują w różnorodnych krajobrazach, w klimacie arktycznym, borealnym, tropikalnym i przejściowym (Rydin & Jeglum 2013). W Polsce torfowiska (w tym tzw. mokradła) można spotkać praktycznie wszędzie, zarówno na terenach leśnych, rolniczych, a także w miastach (<https://nauka.dlaprzyrody.pl/2020/07/10/po-co-nam-torfowiska-w-miastach>). W przypadku terenów leśnych, torfowiska występują tam nie tylko w postaci borów i brzezin bagiennych, ale także jako otwarte nieleśne tereny. Także tam torfowiska dostarczają ważnych usług ekosystemowych, choć jednocześnie większość z nich jest ciągle efektywnie osuszona. Jednocześnie w szkółkach leśnych wykorzystywany jest torf do produkcji sadzonek. Taka sytuacja powoduje, że dwutlenek węgla z rozkładającego się torfu trafia ponownie do atmosfery (Kotowski 2021).

Niniejszy artykuł ma na celu: 1) podkreślenie znaczenia torfowisk dla klimatu i problemów ochrony siedlisk torfowiskowych, 2) określenie znaczenia torfowisk w lasach w kontekście akumulacji i zasobów węgla pierwiastkowego, 3) przedstawienie rekomendacji dla poznawania i odtwarzania torfowisk, 4) podkreślenia alternatywy dla pozyskania i wykorzystania torfu poprzez uprawy roślin bagiennych – paludikulturę.

Torfowiska, las i historia zaburzeń

Tereny leśne w Polsce posiadają znaczne zasoby torfowisk. Szacuje się, że torfowiska, w tym naturalne i odwodnione w Lasach Państwowych na powierzchni ok. 380 tys. ha, zawierają 494 Mt C, w relacji węgla w drzewach na obszarze Lasów Państwowych (31% powierzchni kraju), który wynosi 923 Mt C. Przykładowo w samej RDLP Toruń jest zakumulowane 25 Mt C w torfie (szacunki własne na podstawie dostępnych danych (Bittern 1958; Jabłońska i in. 2021).

Większość z torfowisk w lasach nie jest jednak dokładnie rozpoznana. Dotyczy to typów torfowisk oraz ich rozmieszczenia w przestrzeni. Na mapach leśnych torfowiska widnieją w postaci często niezweryfikowanych mokradłowych siedlisk nieleśnych (Lamentowicz i in. 2017; Lamentowicz i in. 2021). Torfowiska znajdujące się w granicach rezerwatów posiadają dokumentację botaniczną, choć zdarza się, że torfowiska przejściowe są identyfikowane jako wysokie. Jednocześnie, dość dynamicznie w czasie, ekosystemy torfowisk zmieniają się, ulegając decesji, sukcesji leśnej lub roślinności zielnej, np. obecność gatunków nitrofilnych (Wołejko 2015; Kujawa-Pawlaczyk & Pawlaczyk 2017). Z powodu niewielkiego rozpoznania zasobów torfowisk są one często narażone na stres związany z gospodarką leśną. Jednym z zaburzeń negatywnie wpływających na torfowiska są wylesienia w ich otoczeniu. Polskie torfowiska jeszcze 1 000 lat temu otoczone były lasem, znajdowały się pod bezpiecznym parasolem lasów (Czerwiński i in. 2021; Karpińska-Kołaczek i in. 2022). Od średniowiecza powierzchnia lasu zaczęła gwałtownie maleć, przez co torfowiska znalazły się pod wzrastającą presją człowieka. Otwarcie krajobrazu zmieniło właściwości fizyko-chemiczne wód gruntowych w torfowiskach oraz zaburzyło ich hydrologię. Badania paleoekologiczne pokazują, że torfowiska poprzez usunięcie lasu doświadczyły obniżenia zwierciadła wody gruntowej. W momencie wprowadzenia planowej gospodarki leśnej część torfowisk znów znalazła się pod osłoną lasu, choć w zupełnie innych warunkach upraw zdominowanych przez gatunki drzew iglastych. Powstały nowe ekosystemy torfowisk znajdujące się pod wpływem ukształtowanych przez człowieka lasów (Lamentowicz i in. 2007).



Fot. 1. Rowy odwadniające torfowiska wraz efektem prac utrzymaniowych (Fot. M. Lamentowicz).

Torfowiska były intensywnie odwadniane i użytkowane, szczególnie w ciągu ostatnich 300 lat (Joosten & Clarke 2002; Joosten i in. 2017). Osuszanie torfowisk i innych mokradeł miało na celu przekształcenie ich w tereny uprawne,



Fot. 2. Rowy odwadniające torfowiska doliny Trojanki w Puszczy Zielonce pod Poznaniem (Fot. M. Lamentowicz).

pastwiskowe, jak i plantacje leśne (Päivänen & Paavilainen 1996; Laine i in. 2006). Obecnie na większości torfowisk w Polsce można zobaczyć rowy melioracyjne, z których większość jest ciągle aktywna. Osuszanie torfowisk doprowadziło do degradacji większości z nich i ich osiadania oraz sukcesji (Krolikowski 1958; Ilnicki 2002). Torfowiska przeszły ze stanu akumulacji węgla pierwiastkowego z atmosfery do źródła dwutlenku węgla. Torfowiska zamiast ochładzać atmosferę, zaczęły ją ocieplać poprzez emisje gazów cieplarnianych (Lamentowicz i in. 2017). Tematyka emisji dwutlenku węgla z torfowisk w lasach Polski jest ciągle niedostatecznie zbadana i wymaga przyszłych szeroko zakrojonych działań (Juszczak i in. 2017).

Wykorzystując najnowsze wyniki badań paleoekologicznych możemy stwierdzić, że trwałość torfowisk była zabezpieczona przez pierwotne puszcze w ciągu ostatnich kilku tysięcy lat, aż do średniowiecza (Marcisz i in. 2017; Czerwiński i in. 2022).

Jednakże ok. 300 lat temu zaczęto wydobywać torf, początkowo do celów energetycznych, a następnie do wykorzystania w ogrodnictwie i szkółkach leśnych. Z czasem wydobycie torfu nabrało globalnego rozpędu (Ilnicki 2002). Eksploatacja torfowisk stała się najbardziej drastycznym czynnikiem ich degradacji. Wydobycie torfu ma szerszy negatywny kontekst środowiskowy, ponieważ przed wydobyciem torfowiska były głęboko odwadniane (Pawlaczyk 2014). W efekcie na całym obszarze zwierciadło wód gruntowych ulegało obniżeniu. Pozostałością eksploatacji są osuszone torfowiska pokryte lasem, z dołami potorfowymi i siecią rowów. Roślinność uległa transformacji w kierunku dominacji gatunków nietorfotwórczych, z dużym udziałem krzewinek. Większość eksploatowanych obiektów nigdy nie wróciła do stanu naturalnego. Pomimo że wydobycie torfu nie stanowi już ważnej dziedziny polskiej gospodarki, to jednak jego wydobycie rośnie (Jabłońska i in. 2021). W krajobrazie Polski można obserwować funkcjonowanie kopalni torfu, a torf ciągle posiada duże znaczenie. Torf wykorzystywany w leśnych szkółkach polowych i kontenerowych pochodzi głównie z importu. W szkółkach kontenerowych wykorzystano w 2021 r. ok. 16 tys. m³ torfu (DGLP, Wydział Hodowli Lasu), a w szkółkach polowych zakładając, że rocznie zamawia się średnio ok. 100 m³ torfu na jeden obiekt, to sumarycznie można estymować wykorzystanie we wszystkich obiektach ok. 32 tys. m³ torfu/rok. Dane dotyczące torfu w szkółkarstwie wymagają jednak doprecyzowania w zakresie wykorzystywanych objętości, źródła pochodzenia oraz emisji dwutlenku węgla.

Zwiększony rozkład torfu na torfowiskach odwodnionych prowadzi do większych emisji dwutlenku węgla do atmosfery (Loisel & Gallego-Sala 2022). W efekcie węgiel, który trafia do atmosfery, pochodzi z wykopanego torfu oraz tego, który uległ odwodnieniu. Niestety, takie emisje są słabo rozpoznane. Większość polskich torfowisk pozostaje w złym stanie a wydobycie torfu w Polsce ciągle rośnie (Jabłońska i in. 2021). Podobnie jest w innych krajach w Europie. Łotwa, Niemcy, Estonia, Holandia, Irlandia i Litwa reprezentowały

ponad dwie trzecie całkowitego eksportu torfu (<https://www.indexbox.io/store/eu-peat-market-report-analysis-i-prognoza-do-2020/>).



Fot. 3. Kopalnia torfu koło Szczecinka (Fot. M. Lamentowicz).



Fot. 4. Kopalnia torfu koło Szczecinka (Fot. M. Lamentowicz).

Torfowiska jako siedliska przyrodnicze i możliwości ich ochrony

Torfowiska i źródliska reprezentują różne typy siedlisk przyrodniczych, które uznane są za cenne na obszarze Unii Europejskiej oraz objęte są ochroną w ramach programu Natura 2000. Ujęcie torfowisk jest bardzo szerokie i często niejednoznaczne; w Polsce wyróżnia się zasadniczo siedem typów siedlisk przyrodniczych: 7110 – torfowiska wysokie z roślinnością torfotwórczą (żywe), 7120 – torfowiska wysokie zdegradowane, lecz zdolne do naturalnej i stymulowanej regeneracji, 7140 – torfowiska przejściowe i trzęsawiska, 7150 – obniżenia na podłożu torfowym z roślinnością ze związku Rhynchosporion, 7210 – torfowiska nakredowe (*Cladietum marisci*, *Caricetum buxbaumi*, *Schoenetum nigricantis*), 7220 – źródliska wapienne ze zbiorowiskami *Cratoneurion commutati* i 7230 – górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk. Powyżej wskazane siedliska torfowiskowe chronione są w ponad czterech i pół tysiąca obszarów w ramach sieci Natura 2000, z tego na terenie Polski wykazywane są w ponad trzystu ostojach, w których są przedmiotami ochrony. Siedliska torfowiskowe i źródliskowe stanowią ekosystemy wymagające szczególnej troski, głównie z powodu nagromadzenia populacji roślin chronionych, rzadko spotykanych i zagrożonych wyginięciem. W szerszym ujęciu torfowiska jako tereny wodno-błotne (mokradła, lasy bagienne, jeziora, rzeki, brzegi mórz itp.) wykazywane są w 8 700 obszarach Natura 2000, w obrębie których chronionych jest ponad 33 000 km². Szeroko rozumiane obszary wodno-błotne pomagają stabilizować warunki mikroklimatyczne poprzez istotną rolę w retencji wody i w makroskali poprzez magazynowanie węgla.

Ochrona ekosystemów torfowiskowych i wodno-błotnych jest ustawowym obowiązkiem nałożonym na organy i instytucje związane z ochroną środowiska i zagospodarowaniem przestrzennym w kraju. Jednym z ważniejszych narzędzi prawa europejskiego i krajowego zogniskowanych na tematykę



Fot. 5. Cenne siedliska torfowiskowe: torfowiska wysokie z roślinnością torfowiczną (żywe) Bagno Kusowo (kod Natura 2000: 7110), (Fot. M. Lamentowicz).

ochrony torfowisk jest Dyrektywa Rady 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory (tzw. Dyrektywa siedliskowa), wprowadzona do polskiego prawa ustawą o ochronie przyrody. Na uwagę w zakresie zarządzania torfowiskami zasługują także regulacje ochronne wynikające stricte z krajowych przepisów. Analizując przepisy wynikające z ustawy o ochronie przyrody (Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r.) możemy wymienić kilka poziomów ochrony tych ekosystemów. Najbardziej bezpośrednim narzędziem mogącym służyć ochronie torfowisk jest obejmowanie ich formami ochrony przyrody, takimi jak parki narodowe, rezerваты przyrody, które mogą chronić mokradła poprzez objęcie ich ochroną ścisłą lub poprzez narzędzia, takie jak plany ochrony lub zadania ochronne zaprojektowane specjalnie pod kątem danego ekosystemu i jego wymagań. Mniej restrykcyjną, ale równie ważną rolę pełnią parki krajobrazowe i obsza-

ry chronionego krajobrazu, a lokalnie także użytki ekologiczne czy zespoły przyrodniczo-krajobrazowe. Podczas ustanawiania tych form ochrony przyrody mogą zostać określone szczególne zakazy obowiązujące na ich obszarze. Zakazami związanymi z ochroną mokradeł są np.: pozyskiwanie do celów gospodarczych torfu, dokonywanie zmian stosunków wodnych czy w przypadku



Fot. 6. Cenne siedliska torfowiskowe: torfowiska przejściowe i trzęsawiska (7140) Torfowisowisko Jezierzba, (Fot. M. Lamentowicz).

ekosystemów wodnych (w tym wodno-torfowiskowych), budowanie nowych obiektów budowlanych w pasie szerokości 100 m od linii brzegów rzek, jezior i innych naturalnych zbiorników wodnych.

Dyrektywa siedliskowa UE i sieć obszarów chronionych Natura 2000 są obecnie kluczowe dla ratowania torfowisk Europy. Możemy wyróżnić co najmniej dwie metody ochrony w ramach zarządzania obszarami Natura 2000: (1) ochronę poprzez reglamentację działań mogących znacząco negatywnie oddziaływać na obszar Natura 2000, a także (2) tworzenie planów zadań ochron-

nych (PZO) czy planów ochrony. W PZO precyzowane są działania mające na celu poprawę, a także monitorowanie stanu ochrony tych siedlisk. Prawo daje więc narzędzia do prawidłowego zarządzania ochroną jezior i całych ekosystemów z nimi związanych. Do najczęściej podejmowanych działań ochrony czynnej w ramach przywrócenia właściwego stanu torfowisk należą np. usuwanie



Fot. 7. Cenne siedliska torfowiskowe: górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (7230) Dolina Stążki. (Fot. M. Lamentowicz).

drzew i krzewów. W niektórych obiektach wskazane jest sporadyczne koszenie, przywracanie właściwych warunków wodnych przez np. tworzenie barier odpływu wody, tamowanie rowów melioracyjnych. Wiele torfowisk wymaga działań związanych z usuwaniem obcych i inwazyjnych gatunków roślin (szczególnie drzew i krzewów), wykaszaniem odrostów ekspansywnych gatunków roślin, takich jak: wierzby, brzozy i trzcina oraz usuwaniem z terenów otwartych torfowiska samosiewów drzew i krzewów. Należy jednak wziąć pod uwagę, że utrzymanie torfowisk przez „walkę” z naturalną sukcesją może być bardzo

kosztowne. Zatem podjęcie decyzji o realizacji takich działań wymaga indywidualnego podejścia i wcześniejszej szczegółowej analizy, która pozwoli określić czy zaangażowane siły i środki doprowadzą do osiągnięcia zamierzonego celu.

W rzeczywistości, mimo podjęcia pewnych działań, stan wielu torfowisk i źródeł uznanych za siedliska przyrodnicze, chronionych także prawem Unii Europejskiej, stale się pogarsza. Zgodnie z wynikami „Monitoringu gatunków i siedlisk przyrodniczych” realizowanego przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (źródło: strona internetowa GIOŚ) ze szczególnym uwzględnieniem obszarów ochrony siedlisk Natura 2000 z lat 2016-2018, stan ochrony siedliska 7140 (tzw. torfowiska przejściowe) pod względem struktury i funkcji znacząco się pogorszył: np. 15% udział powierzchniowy torfowisk, których stan w latach 2013-2014 został określony jako „zły stan zachowania”, wzrósł obecnie do 35%. W przypadku siedlisk 7120, 7150 i 7210 zły stan siedlisk stanowi często około 40%. Szczególnie istotne zmiany dotyczą siedliska 7230 (tzw. torfowiska alkaliczne) – ocena parametru dotyczącego jego struktury i funkcji znacząco się pogorszyła. Na stan zły zostało ocenionych ponad 59% monitorowanych stanowisk (poprzednio około 25%). Komisja Europejska biorąc pod uwagę pogorszenie stanu siedlisk torfowiskowych i ogólnie wysokie wskaźniki utraty różnorodności biologicznej i skutki zmiany klimatu, uznała w ramach Strategii Bioróżnorodności do 2030 r., że kluczowe znaczenie ma ochrona obszarów wodno-błotnych poprzez skuteczne zarządzanie i aktywną odbudowę tych terenów.

Bardzo często także, zapominając o konieczności ochrony zlewni bezpośredniej lub wychodząc naprzeciw żądaniom lokalnych samorządów, zrezygnowano z możliwości ochrony zbiorników w postaci możliwości zastosowania ochronnego pasa 100 m wolnego od zabudowy. Sytuacja taka nie tylko pozbawia organy ochrony przyrody możliwości ochrony zlewni zbiorników, zastosowania w planach zadań ochronnych pasów buforowych, ale także pozbawia możliwości skorzystania z preferencyjnych warunków dofinansowywania budowy

lub rozbudowy kanalizacji sanitarnej w zlewniach zbiorników. Bardzo często bowiem to lokalizacja w obszarze chronionym daje dodatkowe możliwości finansowania lub umorzenia pożyczek i kredytów związanych z gospodarką ściekową. Ponadto Komisja Europejska poprzez Strategię Bioróżnorodności do 2030 r. wzywa do odbudowy torfowisk, a następnie ich ścisłej ochrony. Jest to niezwykle ważne, ponieważ w Europie tylko 10% z nich jest obecnie w dobrym stanie.

Odtwarzanie torfowisk i paludikultura

Odtwarzanie torfowisk i odpowiednie zarządzanie wpływają pozytywnie na retencję i jakość wody, magazynowanie dwutlenku węgla, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i różnorodność biotyczną (Erwin 2009; Harenda i in. 2018). Zaprzestanie eksploatacji i wykorzystania torfu jest niezwykle istotne w interesie społecznym (Loisel i in. 2021) i torfowiska jako ekosystemy ważne dla stabilizacji klimatu powinny podlegać szczególnej ochronie (Tanneberger i in. 2021). Ponieważ większość torfowisk Polski jest odwodniona, ochrona bierna nie wystarczy dla polepszenia stanu siedlisk. Niezbędne jest w tym kontekście odtwarzanie (restytucja) torfowisk, która wymaga wykorzystania technologii w celu ponownego nawadniania torfowisk (Makles i in. 2014). Celem jest podniesienie lustra wody gruntowej do takiego poziomu, który zapewni odpowiednie warunki dla roślin torfowiskowych (np. mchów i turzyc), uczestniczących w produkcji biomasy, która z czasem przekształca się w torf (Kreyling i in. 2021).

Efektem nawadniania jest skuteczne wychwytywanie dwutlenku węgla przez rośliny, które nie tylko redukuje efekt globalnego ocieplenia, ale także ma znaczenie w sensie kompensacji antropogenicznych emisji (Jabłońska i in. 2021). Odtwarzanie torfowisk traktowane jest obecnie jako rozwiązanie oparte na zasobach przyrody (ang. Nature based solution NBS), istotne dla klimatu. Działania nawadniania torfowisk prowadzone są wielu miejscach na świecie. Biorąc pod uwagę Europę, liderem w odtwarzaniu torfowisk jest Wielka Brytania i Niemcy (Couwenberg i in. 2011; Cris i in. 2011; Andrew



Fot. 8. Efekty nawadniania torfowisk holenderskich (Fot. M. Lamentowicz).

& Dominic 2014; Bonn i in. 2014; Andersen i in. 2017; Joosten i in. 2017; Tanneberger i in. 2021). Wraz ze wzrostem świadomości na temat zagrożeń związanych z konsekwencjami antropogenicznego globalnego ocieplenia, nawadnianie torfowisk okazało się być jednym z najbardziej efektywnych sposobów gromadzenia węgla atmosferycznego. W Polsce nawadnianie torfowisk było domeną działalności organizacji pozarządowych, np. Klubu Przyrodników lub Centrum Ochrony Mokradeł. W ostatnim czasie realizowane są projekty z nawadnianiem torfowisk na obszarach leśnych. Szczególnie wart uwagi jest bardzo obficie finansowany projekt Life, realizowany obecnie przez Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej (BULiGL). Istnieje szansa, że realizacja projektu znacznie poprawi stan mokradeł w lasach. Na uwagę zasługuje również projekt koordynowany przez Nadleśnictwo Woziwoda, celem którego jest ochrona cennych ekosystemów Borów Tucholskich, głównie w Nadleśnictwach Woziwoda i Tuchola. Projekt zakłada poprawę warunków hydrologicznych, w tym stopniowe



Fot. 9. Efekty nawadniania torfowisk holenderskich (Fot. M. Lamentowicz).

nawadnianie torfowisk i uaktywnienie procesu torfotwórczego. To bardzo istotne dla klimatu działania, choć jednocześnie znaczne objętości torfu wykorzystywane są w szkółkarstwie kontenerowym, co znacząco zwiększa emisję dwutlenku węgla do atmosfery (także w sensie całkowitej estymacji emisji węgla). Istnieje możliwości związanych z zastosowaniem innych źródeł biomasy, którą można wykorzystać zamiast torfu. Jedną z nich jest wykorzystanie uprawy roślin torfowiskowych – rolnictwo bagienne tzw. paludikultura (łac. palus = bagno), będąca produktywnym użytkowaniem gruntów na nawodnionych torfowiskach, które chroni głębę torfową, a tym samym minimalizuje emisję CO₂ i zanik masy organicznej (Broszura informacyjna: Paludikultura; 2/2021, www.moorwissen.de). Dodatkowym rozwiązaniem jest wykorzystywanie w leśnictwie w coraz większym zakresie odnowień naturalnych, które znacząco redukują stosowanie torfu w celu produkcji sadzonek, ponieważ mniejsza produkcja szkółkarska to jednocześnie mniejsze zużycie torfu oraz nawozów.

Należy jednak wziąć pod uwagę, że nie w każdych warunkach siedliskowych odnowienia naturalne mogą być realizowane na szerszą skalę.



Fot. 10. Przykłady rolnictwa bagiennego (paludikultury) z obszaru NW Niemiec, a) uprawa pałki wodnej Typha (10 ha), źródło AESAerial.



Fot. 11. Przykłady rolnictwa bagiennego (paludikultury) z obszaru NW Niemiec, b) uprawa torfowców (17 ha), źródło AESAerial.

Istnieje wiele korzyści, które mogą polegać na przywróceniu usług ekosystemowych, takich jak: akumulacja biogenów, tworzenie mikroklimatu i tworzenie siedlisk dla rzadkich gatunków oraz retencja wody. W uprawie wykorzystuje się takie gatunki, jak olsza czarna, trzcina pospolita, mchy torfowce czy pałka. Jednocześnie produkowana biomasa może być wykorzystana w formie kompostu zamiast torfu (Ryc. 2). Paludikultura jest obecnie jedną z najlepszych alternatyw dla torfu pochodzącego z eksploatacji w szkołkach leśnych. Potrzebne są jednak inwestycje i gruntowne rozpoznanie możliwości rozbudowy systemu rolnictwa bagiennego w Polsce.

Podsumowanie – rekomendacje dla ochrony torfowisk w lasach

Torfowiska oraz wody w obszarach kompleksów leśnych stanowią integralny zbiornik i pochłaniacz netto CO_2 z powietrza, tworząc tym samym naturalne zasoby węgla. Szacuje się, iż roczna emisja CO_2 ze wszystkich zdegradowanych torfowisk w Polsce wynosi 34,6 Mt ekw. CO_2 . Stawia to Polskę w grupie 10 największych światowych emiterów CO_2 z powierzchni zdegradowanych torfowisk. Z tego powodu niezbędne są działania, które będą służyć nie tylko ochronie, ale także poprawieniu potencjału pochłaniania węgla w torfie oraz retencji wody w torfowiskach na obszarach leśnych. Działania służące ochronie, poprawie zdolności akumulacji węgla i odtwarzaniu torfowisk w lasach wzmacniają odporność ekosystemów leśnych na zmiany klimatu.

Tłem niniejszego opracowania były badania własne przeprowadzone latach 2021-2022 na torfowiskowych położonych w lasach Nadleśnictw Woziwoda i Tuchola (764 ha torfowisk) w zasięgu administracyjnym Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Toruniu oraz dane literaturowe. Plany zarządzania ekosystemami realizowane w obrębie tych Nadleśnictw zakładają m.in. kompleksowe wdrażanie działań zwiększających odporność ekosystemów Borów Tucholskich na negatywne zjawiska wynikające ze zmian klimatycznych i adaptację do tych zmian.

Ryc. 2. Znaczenie paludikultury na torfowiskach (www.greifswaldmoor.de; licencja CC BY-NC-ND).

Proponowane są następujące działania ochrony i restytucji torfowisk w Polsce:

1. Niezbędne jest rozpoznanie zasobów torfowisk w lasach i szczegółowe oszacowanie zasobów węgla na podstawie określenia miąższości i rodzaju torfu. Opracowanie takie zrealizowane w skali całego kraju może stanowić podstawę do przygotowania ogólnych oraz szczegółowych zasad ochrony, szczególnie w kontekście obecnych zmian klimatu.
2. Zmniejszenie wykorzystania torfu w szkolnictwie poprzez stosowanie alternatyw dla podłoża torfowego oraz wykorzystywanie w maksymalnie możliwym zakresie odnowień naturalnych.
3. Rozbudowa systemu rolnictwa bagiennego – paludikultury w celu produkcji materii organicznej będącej zamiennikiem torfu.
4. Opracowanie planu odtwarzania torfowisk i przywracania siedlisk torfowiskowych w lasach. Jedną z głównych zasad strategii odtwarzania torfowisk

- powinno być założenie priorytetu restytucji torfowisk (odwołanie się do rozwiązań opartych na zasobach przyrody – ang. nature-based solutions).
5. Uproszczenie procedur realizacji działań ochronnych w planach urzędowania lasu w ramach realizacji postulatu „zachowania lasów bagiennych i torfowisk”.
 6. Realizacja zasad dobrych praktyk ochrony torfowisk w lasach – ze szczególnym zakazem pozyskiwania torfu i kopania zbiorników wodnych na torfowiskach, np. w ramach lokalnych programów małej retencji w lasach czy prac utrzymaniowych na rowach meliorujących torowiska. Nadrzędnym celem powinno być pozostawienie torfowisk w nienaruszonym stanie jako bardziej efektywnego procesu zarówno pod względem przyrodniczym, retencjonowania wody, jak i ekonomicznym. Torfowiska są istotnymi zbiornikami wody w skali krajobrazu, choć często nie widać jej na powierzchni.
 7. Stosowanie prawidłowej interpretacji fitocenotycznej torfowisk przekładającej się na planowanie skutecznej ich ochrony, które powinno opierać się na gruntownym rozpoznaniu geobotanicznych wskaźników stanu zachowania i tendencji dynamiczno-rozwojowych roślinności odpowiednio dla poszczególnych typów mokradeł.
 8. Zwrócenie uwagi na przemożną rolę struktury i składu warstwy mszystej w określaniu tendencji dynamicznych i natężenia czynników antropogenicznych w leśnych i nieleśnych fitocenozach torfowiskowych i błotnych, z uwzględnieniem gatunków obcych, szczególnie inwazyjnych.
 9. Wytypowanie i inwentaryzacja przyrodnicza obszarów stanowiących potencjał retencji naturalnej (obszary podmokłe, naturalne niecki retencyjne, mokradła itp.) wraz z analizą możliwości ich ochrony i z zachowaniem stref buforowych.
 10. Konstrukcja ogólnopolskiego systemu obserwacji torfowisk w lasach – monitoring stanu siedlisk przyrodniczych i zasobów gatunków chronionych,

przepływu węgla i dynamiki hydrologicznej oraz stanu zachowania szaty roślinnej.

11. Potrzeba oceny efektów ochrony czynnej i restytucji torfowisk w kontekście emisji węgla z torfowisk, wymierania flory i roślinności torfotwórczej oraz ochrony siedlisk Natura 2000.
12. Wprowadzenie operatów hydrologicznych jako obowiązującego elementu nowo tworzonych Planów Urządzania Lasu dla nadleśnictw. Dane zawarte w operatach (np. miąższość i rodzaj torfu oraz stan zachowania), będą podstawą do dalszych działań ochronnych dla torfowisk i tworzenia skutecznych metod retencjonowania wody.
13. Wprowadzenie cyklu szkoleń dla pracowników LP (szczególnie personelu terenowego) z zakresu geologii, znaczenia, ochrony i odtwarzania obszarów torfowiskowych ze szczególnym uwzględnieniem torfowisk, prowadzonych przez wytypowanych specjalistów.
14. Opracowanie i wprowadzenie do użytku służbowego poradnika dedykowanego pracownikom LP z zakresu znaczenia, identyfikacji, ochrony i restytucji torfowisk.

Podziękowania

Autorzy dziękują Wiktorowi Kotowskiemu, Bogdanowi Chojnickiemu i Patrykowi Poczcie za dyskusję nad estymacjami zawartości węgla w torfowiskach Polski. Publikacja jest efektem realizacji kilku grantów naukowych:

- a) „Ochrona cennych ekosystemów Borów Tucholskich” finansowanego z Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego na lata 2014-2021 w ramach Programu „Środowisko, Energia i Zmiany Klimatu” MF EOG 2014-2021 „Wdrażanie planów zarządzania ekosystemami”;
- b) ReVersal: UMO-2021/03/Y/ST10/00093 pt. „Restytucja torfowisk strefy nemoralnej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia w wodę i jej jakości”. Kierownik polskiego zespołu: prof. Mariusz Grzegorz Lamentowicz,

- Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Projekt realizowany będzie z udziałem partnerów z Austrii, Holandii i Niemiec,
- c) NCN: SONATA nr 2020/39/D/ST10/00641 pt. „Badanie zaburzeń plantacji leśnych z wykorzystaniem wysokorozdzielczych badań paleoekologicznych i dendrochronologii”,
- d) NCN: OPUS nr 2021/41/B/ST10/00060 pt. „Punkty krytyczne w ekosystemach torfowiskowych borealnych i wieloletniej zmarzliny Zachodniej Syberii w warunkach globalnego kryzysu klimatycznego i rosnącego zagrożenia pożarowego (PEATFLAMES)”.

Literatura

- Allegrini, I., Pirrone, N., Renato Baudó, G. T., & Elisa, V. 2007. 19 Global scale atmospheric pollution: a regional problem. *Developments in Earth Surface Processes* 145–146.
- Andersen, R., Farrell, C., Graf, M., Muller, F., Calvar, E., Frankard, P., Caporn, S., & Anderson, P. 2017. An overview of the progress and challenges of peatland restoration in Western Europe. *Restoration Ecology*, 25(2), 271–282.
- Andrew, M., & Dominic, M. 2014. UK peatland restoration: Some economic arithmetic. *Science of The Total Environment*, 484 114–120.
- Barber, K. 1993. Peatlands as scientific archives of past biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 2474–489.
- Biancalani, R., Avagyan, A. (Eds.), 2014. Towards climate-responsible peatlands management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Bitner, K. 1958. Torfowiska w Polsce ich ilość powierzchnia i zasoby. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 15.
- Bonn, A., Reed, M. S., Evans, C. D., Joosten, H., Bain, C., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth,

- M.-A., & Birnie, D. 2014. Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosystem Services* 9, 54-65.
- Chapman, S., Buttler, A., Francez, A.-J., Laggoun-Défarge, F., Vasander, H., Schlotter, M., Combe, J., Grosvernier, P., Harms, H., & Epron, D. 2003. Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance: a conflict between economy and ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(10), 525–532.
- Charman, D. 2002. Peatlands and Environmental Change. 301.
- Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärtsch, S., Dubovik, D., Liashchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A., & Joosten, H. 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674(1), 67–89.
- Cris, R., Buckmaster, S., Bain, C. G., & Bonn, A. 2011. UK peatland restoration: demonstrating success.
- Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Poniat, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., & Kołaczek, P. 2021. Environmental implications of past socioeconomic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews*, 259 106902.
- Czerwiński, S., Marcisz, K., Wacnik, A., & Lamentowicz, M. 2022. Synthesis of palaeoecological data from the Polish Lowlands suggests heterogeneous patterns of old-growth forest loss after the Migration Period. *Scientific Reports*, 12(1).
- Erwin, K. L. 2009. Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71–84.
- Feulner, G. 2017. Formation of most of our coal brought Earth close to global glaciation. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114(43), 11333–11337.
- Gallego-Sala, A. V., Charman, D. J., Brewer, S., Page, S. E., Prentice, I. C., Friedlängstein, P., Moreton, S., Amesbury, M. J., Beilman, D. W., Björck, S., Blyakharchuk, T., Bochicchio, C., Booth, R. K., Bunbury, J., Camill, P., Carless,

- D., Chimner, R. A., Clifford, M., Cressey, E., Courtney-Mustaphi, C., De Vleschouwer, F., de Jong, R., Fialkiewicz-Koziel, B., Finkelstein, S. A., Garneau, M., Githumbi, E., Hribljan, J., Holmquist, J., Hughes, P. D. M., Jones, C., Jones, M. C., Karofeld, E., Klein, E. S., Kokfelt, U., Korhola, A., Lacourse, T., Le Roux, G., Lamentowicz, M., Large, D., Lavoie, M., Loisel, J., Mackay, H., MacDonald, G. M., Makila, M., Magnan, G., Marchant, R., Marcisz, K., Martínez Cortizas, A., Massa, C., Mathijssen, P., Mauquoy, D., Mighall, T., Mitchell, F. J. G., Moss, P., Nichols, J., Oksanen, P. O., Orme, L., Packalen, M. S., Robinson, S., Roland, T. P., Sanderson, N. K., Sannel, A. B. K., Silva-Sánchez, N., Steinberg, N., Swindles, G. T., Turner, T. E., Uglow, J., Väliranta, M., van Bellen, S., van der Linden, M., van Geel, B., Wang, G., Yu, Z., Zaragoza-Castells, J., & Zhao, Y. 2018. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming. *Nature Climate Change*, 8(10), 907–913.
- Gaudig, G. 2001. Sphagnum als nachwachsender Rohstoff. Etablierung von Sphagnum – Optimierung der Wuchsbedingungen. *Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald*, 75.
- Harenda, K. M., Lamentowicz, M., Samson, M., & Chojnicki, B. H. 2018. The Role of Peatlands and Their Carbon Storage Function in the Context of Climate Change. *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals: GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences* 169–187.
- Illicki, P. 2002. Torfowiska i torf. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- Jabłońska, E., Kotowski, W., & Giericzny, M. 2021. Strategia ochrony mokradeł w Polsce na lata 2022-2032.
- Joosten, H. 2003. Wise use of mires: Background and principles. *Wise use von Mooren: Hintergrund und Prinzipien*, 33), 239–250.
- Joosten, H., & Clarke, D. 2002. Wise use of mires and peatlands – background and principles including a framework for decision-making.
- Joosten, H., Tanneberger, F., & Moen, A. 2017. Mires and peatlands in Europe.

- Joosten, H., & Timmermann, T. 1999. Peat as a renewable resource. *Torf als nachwachsender Rohstoff*, 29), 171–181.
- Juszczak, R., Urbaniak, M., Stróżecki, M., Lamentowicz, M., & Chojnicki, B. 2017. Metody pomiarów strumieni gazów szklarniowych na torfowiskach. Methods of greenhouse gases fluxes measurements on peatlands. *Studia i Materiały CEPL*, 51(2), 206–225.
- Karpińska-Kołaczek, M., Kołaczek, P., Czerwiński, S., Gałka, M., Guzowski, P., & Lamentowicz, M. 2022. Anthropocene history of rich fen acidification in W Poland - Causes and indicators of change. *Sci Total Environ*, 838(Pt 1), 155785.
- Kotowski, W., Dembek, W., & Pawlikowski, P. 2017. Poland. *European Mires* 549–671.
- Kotowski, W. 2021. Oszacowanie emisji gazów cieplarnianych z użytkowania gleb organicznych w Polsce oraz potencjału ich redukcji.
- Kreyling, J., Tanneberger, F., Jansen, F., van der Linden, S., Aggenbach, C., Blüml, V., Couwenberg, J., Emsens, W. J., Joosten, H., Klimkowska, A., Kotowski, W., Kozub, L., Lennartz, B., Liczner, Y., Liu, H., Michaelis, D., Oehmke, C., Parakenings, K., Pleyl, E., Poyda, A., Raabe, S., Röhl, M., Rücker, K., Schneider, A., Schrautzer, J., Schröder, C., Schug, F., Seeber, E., Thiel, F., Thiele, S., Tiemeyer, B., Timmermann, T., Urich, T., van Diggelen, R., Vegelin, K., Verbruggen, E., Wilmking, M., Wrage-Mönnig, N., Wołejko, L., Zak, D., & Jurasinski, G. 2021. Rewetting does not return drained fen peatlands to their old selves. *Nat Commun*, 12(1), 5693.
- Krolikowski, L. 1958. Znaczenie torfowisk i torfu dla leśnictwa. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 15.
- Kujawa-Pawlaczyk, J., & Pawlaczyk, P. 2017. Torfowiska śródleśne w krajo-
brazie sandrowym na przykładzie Puszczy Drawskiej. *Studia i Materiały CEPL*, 51(2), 143–162.
- Laine, J., Laiho, R., Minkkinen, K., & Vasander, H. 2006. Forestry and boreal peatlands. *Boreal Peatland Ecosystems* 331–358.

- Lamentowicz M., Chojnicki B.H., Marcisz K., Słowiński M., Kołaczek P., Kottowski W. 2021. Znaczenie torfowisk dla bilansu węgla w lasach w kontekście globalnego ocieplenia i kryzysu ekologicznego. W: Tomaszewski D., Jagodziński A.M. (red.). *Drzewa i lasy w zmieniającym się środowisku, Konferencja naukowa Kórnik–Poznań, 11–13 października 2021. Materiały konferencyjne*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań. Ss. 35-57.
- Lamentowicz, M., Słowińska, S., Słowiński, M., Marcisz, K., Buttler, A., Chojnicki, B. H., Jassey, V. E. J., Juszczak, R., Kajukało, K., Kołaczek, P., Lamentowicz, Ł., Łuców, D., Reczuga, M. K., Samson, M., Zielińska, M., Harenda, K., Barabach, J., Tobolski, K., & Gałka, M. 2017. Znaczenie badań interdyscyplinarnych dla zrozumienia zaburzeń torfowisk w lasach. *Studia i Materiały CEPL*, 77–92.
- Lamentowicz, M., Tobolski, K., & Mitchell, E. A. D. 2007. Palaeoecological evidence for anthropogenic acidification of a kettle-hole peatland in northern Poland. *The Holocene*, 17(8), 1185–1196.
- Państwowe, L. 2021. Raport o stanie lasów w Polsce.
- Lawson, I. T., Honorio Coronado, E. N., Andueza, L., Cole, L., Dargie, G. C., Davies, A. L., Laurie, N., Okafor-Yarwood, I., Roucoux, K. H., & Simpson, M. 2022. The vulnerability of tropical peatlands to oil and gas exploration and extraction. *Progress in Environmental Geography*, 275396872211240.
- Loisel, J., Gallego-Sala, A. V., Amesbury, M. J., Magnan, G., Anshari, G., Beilman, D. W., Benavides, J. C., Blewett, J., Camill, P., Charman, D. J., Chawchai, S., Hedgpeth, A., Kleinen, T., Korhola, A., Large, D., Mansilla, C. A., Müller, J., van Bellen, S., West, J. B., Yu, Z., Bubier, J. L., Garneau, M., Moore, T., Sannel, A. B. K., Page, S., Välranta, M., Bechtold, M., Brovkin, V., Cole, L. E. S., Chanton, J. P., Christensen, T. R., Davies, M. A., De Vleeschouwer, F., Finkelstein, S. A., Froelking, S., Gałka, M., Gandois, L., Girkin, N., Harris, L. I., Heinemeyer, A., Hoyt, A. M., Jones, M. C., Joos, F., Juutinen, S., Kaiser, K., Lacourse, T., Lamentowicz, M., Larmola,

- T., Leifeld, J., Lohila, A., Milner, A. M., Minkinen, K., Moss, P., Naafs, B. D. A., Nichols, J., O'Donnell, J., Payne, R., Philben, M., Piilo, S., Quillet, A., Ratnayake, A. S., Roland, T. P., Sjögersten, S., Sonnentag, O., Swindles, G. T., Swinnen, W., Talbot, J., Treat, C., Valach, A. C., & Wu, J. 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change*, 11(1), 70–77.
- Loisel, J., & Gallego-Sala, A. 2022. Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Communications Earth & Environment*, 3(1).
- Loisel, J., & Walenta, J. 2022. Carbon parks could secure essential ecosystems for climate stabilization. *Nature Ecology & Evolution*.
- Makles, M., Pawlaczyk, P., & Stańko, R. 2014. Podręcznik najlepszych praktyk ochrony mokradeł.
- Marcisz, K., Gałka, M., Pietrala, P., Miotk-Szpiganowicz, G., Obremska, M., Tobolski, K., & Lamentowicz, M. 2017. Fire activity and hydrological dynamics in the past 5700 years reconstructed from Sphagnum peatlands along the oceanic–continental climatic gradient in northern Poland. *Quaternary Science Reviews*, 177 145–157.
- Nichols, J. E., & Peteet, D. M. 2021. J. E. Nichols and D. M. Peteet reply. *Nature Geoscience*, 14(7), 470–472.
- Päivänen, J., & Paavilainen, E. 1996. Forestry on peatlands. *Peatlands in Finland* 72–83.
- Pawlaczyk, P. 2014. Akumulacja i emisja węgla przez torfowiska, w tym przez torfowiska alkaliczne.
- Ratcliffe, J., Nilsson, M. B., Nijp, J., & Peng, H. 2020. Northern peatland depth and lateral expansion is inconsistent with a 1055 GtC estimate of carbon storage.
- Rydin, H., & Jeglum, J. K. 2013. The biology of peatlands. *Second Edition* 397.
- Swindles, G. T., Morris, P. J., Mullan, D. J., Payne, R. J., Roland, T. P., Amesbury, M. J., Lamentowicz, M., Turner, T. E., Gallego-Sala, A., Sim, T., Barr, I.

- D., Blaauw, M., Blundell, A., Chambers, F. M., Charman, D. J., Feurdean, A., Galloway, J. M., Gałka, M., Green, S. M., Kajukało, K., Karofeld, E., Korhola, A., Lamentowicz, Ł., Langdon, P., Marcisz, K., Mauquoy, D., Mazzei, Y. A., McKeown, M. M., Mitchell, E. A. D., Novenko, E., Plunkett, G., Roe, H. M., Schoning, K., Sillasoo, Ü., Tsyganov, A. N., van der Linden, M., Väliranta, M., & Warner, B. 2019. Widespread drying of European peatlands in recent centuries. *Nature Geoscience*, 12(11), 922–928.
- Tanneberger, F., Abel, S., Couwenberg, J., Dahms, T., Gaudig, G., Günther, A., Kreyling, J., Peters, J., Pongratz, J., & Joosten, H. 2021. Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany. *Mires and Peat*, 5.
- Thomas, L., 2012. Coal Geology. John Wiley & Sons.
- Tobolski, K. 2000. Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych. *Vademecum Geobotanicum*, 508.
- Tobolski, K. 2003. Torfowiska, na przykładzie Ziemi Świeckiej. 255.
- Wołejko, L. (Red.), 2015. Torfowiska Pomorza – identyfikacja, ochrona, restytucja. Klub Przyrodników.

**Stanisław Małek, Jacek Banach,
Józef Barszcz, Katarzyna Dudek, Grzegorz Durło,
Mariusz Kormanek, Michał Jasik**

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie

Optymalizacja produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym w wybranych szkółkach kontenerowych (Temat nr w DGLP: ER-2717-4/14)

Zainteresowanie technologią produkcji sadzonek drzew leśnych metodą kontenerową wynika ze znacznego wzrostu zapotrzebowania na materiał szkółkarski dla odnowień i zalesień prowadzonych w trudnych warunkach glebowych oraz w tych rejonach, gdzie panują niekorzystne warunki klimatyczne. Prawidłowo dobrany skład substratu szkółkarskiego oraz zoptymalizowany cykl produkcyjny zapewniają odpowiednie warunki wzrostu sadzonek i decydują o ich adaptacji w pierwszych latach po posadzeniu. Zaletą produkowanego w ten sposób materiału odnowieniowego jest możliwość jego sadzenia przez cały sezon wegetacyjny, a przy odpowiednich (sprzyjających nasadzeniom) warunkach pogodowych, nawet przez cały rok.

Celem badawczym była optymalizacja nawożenia doglebowego i dolistnego stosowanego obecnie w szkółkach kontenerowych z uwzględnieniem

wpływu czynników atmosferycznych, głównie opadów i temperatury powietrza oraz ustalenie optymalnej proporcji objętości poszczególnych składników i parametrów substratu. Podjęty przez autorów temat jest nowatorską próbą: opracowania metodyki hodowli „sadzonych wzorcowych”; optymalizacji form nawożenia w sezonie wegetacyjnym; analizy warunków żywieniowych w trakcie sezonu wegetacyjnego oraz wpływu warunków meteorologicznych w procesie produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym; optymalnego doboru proporcji składników substratu ze względu na pożądane jego parametry fizyczne oraz określenia zmian parametrów fizyko-mechanicznych w okresie wzrostu roślin.

Badaniami objęto cztery gatunki drzew leśnych, tj. sosnę zwyczajną, świerka pospolitego, buka zwyczajnego i dęba szypułkowego, które prowadzono w latach 2014-2016 w Gospodarstwie Szkółkarskim w Nędzy (Nadleśnictwo Rudy Raciborskie). Przeprowadzone badania wykorzystano do opracowania wytycznych dla produkcji sadzonek w odniesieniu do:

- modyfikacji składu chemicznego nawozów i alternatywnych sposobów nawożenia z optymalnym udziałem składników mineralnych w kompozycjach nawozowych wraz z harmonogramem cykli nawożeniowych dla uzyskania „sadzonek wzorcowych”;
- produkcji materiału sadzeniowego w kontrolowanych warunkach nawadniania na podstawie bilansu wodnego oraz optymalnego poziomu uwilgotnienia substratu wraz z harmonogramem cykli nawadniania dla uzyskania „sadzonek wzorcowych”;
- sadzonek o optymalnych cechach biometrycznych oraz ich modeli morfologicznych, wyprodukowanych w technologii kontenerowej;
- podłoża dla „sadzonek wzorcowych” badanych gatunków w szkółkach kontenerowych, w tym wzorca składu objętościowego i składników substratu.

W czasie produkcji sadzonek wymienionych gatunków stosowany był ten sam nawóz dolistny. W 2014 r. Bioekor (skład: N - 8,5%, w tym N-NO₃ - 1,0% i N-NH₂ - 7,5%, P₂O₅ - 3,0%, K₂O - 4,4 % oraz mieszanina mikroskładników pokarmowych takich jak B, Cu, Fe, Mn, Mo i Zn) oraz Floralesad (skład: N - 9,2%, w tym N-NO₃ - 1,2% i N-NH₂ - 8,0%, P₂O₅ - 3,5%, K₂O - 5,0%, MgO - 0,5% oraz mikropierwiastki: S, Fe, B, Cu, Mn, Mo i Zn), a od 2015 r. tylko Floralesad. Dodatkowo dla świerka stosowano nawóz doglebowy Osmocote bloom (skład: N - 12,0%, w tym N-NO₃ - 5,2% i N-NH₄ - 6,8%, P₂O₅ - 7,0%, K₂O - 18,0%, MgO - 1,5% oraz mikropierwiastki: B, Cu, Fe, Mn, Mo i Zn) w ilości 2,5 kg/m³ substratu (torfu odkwaszonego dolomitem do osiągnięcia odczynu pH=5,5). Wyniki analiz z 2014 r. stanowiły kontrolę - materiał wyjściowy do zaplanowania doświadczenia w 2015 i 2016 r. W 2015 r. zmodyfikowano gęstość podłoża (zagęszczony i niezagęszczony) oraz wprowadzono kontrolowane nawadnianie. W 2016 r. zmodyfikowano nawożenie. W doświadczeniu dla buka i dębu zastosowano substrat o gęstości ustalonej na podstawie badań z 2015 r., również z kontrolowanym nawadnianiem i dla wszystkich gatunków wprowadzono nawożenie doglebowe przy zastosowaniu Osmocote bloom (skład jw.) w dawce 2,5 kg/m³ substratu, natomiast nawożenie dolistne sadzonek było uwarunkowane przez parametry biometryczne oraz przez indeks powierzchni liści (LAI)¹.

Gospodarka wodna na polach produkcyjnych sadzonek hodowanych w systemie kontenerowym decyduje o wzroście i rozwoju roślin, ich aktywności fizjologicznej, skuteczności nawożenia, ponadto wpływa na cechy fizyczne substratu. Zasada racjonalnej gospodarki wodnej opiera się na założeniu, że rośliny powinny mieć stały dostęp do wilgoci, również wówczas, gdy warunki atmosferyczne nie sprzyjają jej utrzymaniu na wymaganym poziomie.

¹ LAI (leaf area index) to zależność łącznej powierzchni liści rośliny do powierzchni, jaką zajmuje. W praktyce mówimy o liczbie m² liści przypadających na 1m² uprawy.

Zasadniczym celem badań była ocena gospodarowania zasobami wodnymi w szkółce kontenerowej Nędza w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie w latach 2014-2016 na polach produkcyjnych sosny, świerka, buka oraz dębu. Hipoteza badawcza zakładała, iż możliwa jest optymalizacja zużycia wody w trakcie produkcji materiału szkółkarskiego w technologii kontenerowej na podstawie permanentnej kontroli bilansu wodnego na tle informacji o cechach biometrycznych i parametrach morfologicznych roślin. W badaniach wykorzystano autonomiczny, radiotelemetryczny, mobilny system pomiarowy, który służył do gromadzenia danych o warunkach fizycznych w przygruntowej warstwie powietrza oraz w substracie wypełniającym kasety z sadzonkami. Całkowity bilans wodny oparto na porównaniu ilości wody w układzie oraz stratach wynikających z odpływu i parowania. Informacje o cechach biometrycznych, parametrach morfologicznych oraz fizjologicznych sadzonek uzyskano dzięki pomiarom powierzchni oraz struktury aparatu asymilacyjnego za pomocą laiometru LAI-2000 (LI-COR Biosciences), chlorofilometru SPAD 502 PLUS (Konica Minolta) oraz luksomierza UA002/08 (Onset Computer). Łącznie zgromadzono blisko 15 mln danych liczbowych w bloku wodnym oraz ponad 250 tys. danych w bloku biometrycznym. Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć: optymalizację cykli zraszania na polach produkcyjnych uzyskaną dzięki zastosowaniu automatycznego układu kontrolno-pomiarowego oraz stabilizację wilgotności substratu w kontenerach BCC serii HikoV-120ss i V-256.

W trakcie prac badawczych analizowano cechy biometryczne sadzonek wyhodowanych w poszczególnych wariantach doświadczalnych. Parametry wzrostowe, tj. wysokość i grubość w szyjce korzeniowej porównywano z wielkościami podawanymi dla sadzonek produkowanych w warunkach kontrolowanych w normie PN-R-67025. Wykonywano także analizę suchej masy sadzonek, z wyróżnieniem poszczególnych ich części, tj. aparatu asymilacyjnego, pędu oraz systemu korzeniowego. Ponadto przygotowywano próbki do

analiz chemicznych (podłoże i poszczególne części sadzonek). Produkcja sadzonek świerka pospolitego i sosny zwyczajnej w kontenerach Hiko V-120ss, przy zastosowaniu nawożenia dolistnego była stabilna, niezależnie od terminu wykonania siewu. Sadzonki świerka uzyskiwały parametry klasowego materiału szkółkarskiego w okresie przeciętnie 3,5 miesiąca, a sosny 4 miesiące po wysiewie nasion. Dla buka zwyczajnego i dębu szypułkowego (kontener Hiko V-265) osiąganie wymiarów sadzonek klasowych było bardziej zróżnicowane w poszczególnych latach, co prawdopodobnie było spowodowane większą wrażliwością tych gatunków na zmianę czynników środowiskowych w trakcie ich hodowli, np. długości okresu wzrostu w hali wegetacyjnej. Mimo tego iloraz wysokości do grubości w szyjce korzeniowej (h/d) dla dębu okazał się optymalny, co wskazuje na właściwe procedury przy produkcji sadzonek tego gatunku. Podobny rezultat uzyskano dla sosny. Proporcję h/d uznano jako lepszą miarę przydatności hodowlanej sadzonek niż porównywanie ich cech wzrostowych z parametrami granicznymi zawartymi w normie. Uwzględniając wielkości graniczne parametrów wzrostowych podawane w normie PN-R-67025 należy uwzględnić przy produkcji sadzonek kontenerowych – „sadzonki wzorcowej” dla sosny i świerka wartość tej proporcji maksymalnie 70, buka – 65, a dębu szypułkowego – 75. Dla buka i świerka iloraz h/d znacznie przekraczał wartość przyjętą za maksymalną, co wskazuje na szybki wzrost sadzonek na wysokość, przy słabszym wzroście na grubość. Dla tych gatunków wskazana jest korekta parametrów hodowli, głównie sposobu i długości okresu nawożenia. Rozkład suchej masy między częścią nadziemną i podziemną sadzonek zależał od gatunku. Najmniejszą masą systemu korzeniowego charakteryzował się świerk, nieco większą sosna i buk. Dla tych gatunków kontenery szkółkarskie są właściwe i nie ograniczają rozwoju systemu korzeniowego. Sadzonki dębu szypułkowego charakteryzowała bardzo duża masa systemu korzeniowego, prawie dwukrotnie przekraczająca masę części nadziemnej, co wskazuje na potrzebę stosowania kontenera o większej pojemności pojedynczej

celi. Przy optymalnej proporcji h/d sugeruje to konieczność sprawdzenia rozwoju systemów korzeniowych w warunkach uprawy. Wykazano pozytywny wpływ zagęszczenia podłoża na wzrost dębu – uzyskano więcej sadzonek klasowych, natomiast u buka uzyskano nieznacznie mniejszą proporcję h/d w porównaniu do pozostałych wariantów. Rozdzielanie (sortowanie) sadzonek tego gatunku w trakcie produkcji na „wysokie” i „niskie” znajduje uzasadnienie w większej liczbie wyhodowanych sadzonek, które cechują się lepszymi parametrami wzrostowymi. Stwierdzono pozytywny wpływ zmiany nawożenia dolistnego na mieszane (startowe + dolistne) na wzrost sadzonek dębu, buka i sosny.

Stężenie nawozu dolistnego, docierającego do pola produkcyjnego wraz z deszczowaniem (o jednakowej wielkości kropli), utrzymywane było na jednakowym poziomie, tj. 0,6 mS/cm w całym okresie wegetacji. W praktyce zraszanie wraz z nawozem uzależniano od wilgotności substratu, według subiektywnej oceny. Stąd też w okresie obniżonej wilgotności podłoża zużywano więcej nawozu, niż by to wynikało z potrzeb sadzonek. W okresie realizacji badań przeprowadzono analizy chemiczne dla poszczególnych części sadzonek (aparatu asymilacyjnego, pędu i systemu korzeniowego) oraz substratu, w którym te sadzonki wzrastały. Badano także wodę docierającą na pole produkcyjne – suma opadu atmosferycznego i wody stosowanej do deszczowania, wody w zbiorniku retencyjnym, wody z ujęcia głębinowego, z roztworu nawozu dolistnego oraz ciecz uzyskaną z przesiąku spod kaset. Analizowano też stosowane nawozy, torf oraz wyjściowy substrat. Materiał doświadczalny, w zależności od jego rodzaju, został przebadany pod względem stężenia ilości następujących składników chemicznych: C, N (w tym NO_3^- i NH_4^+), S^{2-} (w tym SO_4^{2-}), P (w tym PO_4^{3-}), Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, Cl, F oraz odczynu i przewodności elektrolitycznej w Laboratorium Geochemii Środowiska Leśnego i Terenów Przeznaczonych do Rekultywacji na Wydziale Leśnym. Łącznie wykonano ponad 130 tys. pojedynczych oznaczeń. Materiał do analiz był

pobierany ze szkółki od około połowy kwietnia do końca października (w zależności od roku produkcji), w odstępach dwutygodniowych.

Na podstawie wyników analiz chemicznych oraz wyników pomiarów biometrycznych ustalono: średnie zapotrzebowanie sadzonek na poszczególne pierwiastki dla terminu uzyskania parametrów „sadzionki wzorcowej” oraz w całym okresie ich wzrostu, udział lokowania pierwiastków w poszczególnych częściach sadzonek, jak również potencjalne źródła tych pierwiastków dla nich. Na tej podstawie oszacowano wielkości dawek poszczególnych pierwiastków niezbędnych dla uzyskania parametrów „sadzionki wzorcowej”, określono ilość wymywanych składników poza pole produkcyjne oraz zaproponowano alternatywny sposób nawożenia wraz z harmonogramem i sposobem kontroli sadzonek.

Hodowla sadzonek w kontenerach wymaga stosowania specjalnie skomponowanych substratów. Mają one istotny wpływ na wartość cech wzrostowych oraz parametry hodowanych sadzonek, przy czym najważniejsze są własności powietrzno-wodne substratu. Celem prowadzonych badań była optymalizacja parametrów substratu torfowo-perlitowego stosowanego do produkcji sosny zwyczajnej, świerka pospolitego, buka zwyczajnego oraz dębu szypułkowego. W pierwszym roku projektu monitorowano podstawowe parametry fizyko-mechaniczne substratu pobranego z pojedynczych cel kontenera szkółkarskiego. Stwierdzono, że w trakcie sezonu wegetacyjnego występują okresy, w których parametry pojemności powietrznej i wodnej odbiegają od optymalnych. Zaproponowano poprawę tych parametrów przez zagęszczenie substratu w celach kontenerów, w trakcie ich wypełniania na linii do siewu, w którą wyposażona jest szkółka. Poziom zagęszczenia określono eksperymentalnie w trakcie pomiarów pilotażowych. W drugim roku trwania projektu testowano zaproponowany substrat ze zwiększonym zagęszczeniem przez okres wzrostu roślin. Wykazano, że zwiększone zagęszczenie substratu wpłynęło na poprawę parametrów pojemności wodnej i powietrznej,

poprawił retencję wody, jest więc zalecane do stosowania. Ponieważ nie wszystkie analizowane gatunki (tylko buk i dąb) zareagowały poprawą parametrów biometrycznych na zmodyfikowane podłoże, w trzecim roku projektu wykonano doświadczenie, w którym wszystkie badane gatunki rosły na substracie zagęszczonym do różnych poziomów w zakresie od 0,08 do 0,16 g/cm³. Po przeanalizowaniu sadzonek stwierdzono, że każdy z gatunków zareagował na zmianę zagęszczenia substratu, ale gatunki iglaste odmiennie od liściastych. Sadzonki sosny i świerka najgorsze parametry (stosunek h/d) uzyskały dla najniższego i najwyższego poziomu zagęszczenia substratu, zaś najlepsze w zakresie od 0,11 g/cm³ do 0,13 g/cm³. Odwrotnie zareagowały gatunki liściaste. Wyniki potwierdzają możliwość wyznaczenia optymalnego poziomu zagęszczenia substratu dla każdego z gatunków. W trakcie projektu analizowano możliwość poprawy składu objętościowego substratu torfowo-perlitowego. W przeprowadzonym doświadczeniu zmodyfikowano skład substratu. Badano substraty o różnej zawartości perlitu w stosunku do torfu, z interwałem 2,5% in minus i in plus od zawartości aktualnie stosowanej na poziomie 5%. Zaproponowane modyfikacje nie przyniosły oczekiwanej poprawy parametrów substratu (pojemności powietrznej i wodnej), stwierdzono, że stosowany aktualnie dobór składników jest optymalny. Wykonane analizy parametrów fizycznych i fizyko-chemicznych produkowanych substratów wskazują na dużą zmienność tych parametrów. Wynika to przede wszystkim ze zmienności podstawowego składnika, którym jest torf, ale również z samego procesu łączenia składników bazowych w procesie mieszania.

W pracy przedstawiono następujące szczegółowe zalecenia dla optymalizacji produkcji sadzonek w ramach „szkółkarstwa precyzyjnego”:

1. Należy integrować profesjonalne kontrolery nawadniania z istniejącymi systemami deszczowania stosowanymi w szkołkach Lasów Państwowych.

2. Zaleca się permanentnie monitorować wilgotność substratu torfowego na polach produkcyjnych, bazując na autonomicznych systemach pomiarowych współpracujących z układami deszczującymi.
3. Zaleca się **śledzić bilans wodny** na polach produkcyjnych na podstawie modelu gospodarki wodnej szkółki skalibrowanego do lokalnych warunków klimatycznych.
4. Zaleca się wyposażyć istniejące systemy dostarczania wody na pola produkcyjne w układy monitorowania konduktancji cieczy roboczej.
5. Należy utrzymywać nieznaczną nadwyżkę w bilansie wodnym na polu produkcyjnym w zależności od warunków pogodowych na 2,00 – 3,00 mm na dzień (warunki dla Polski południowej, Kotlina Raciborska).
6. Należy regulować szybkość przejazdu rampy deszczującej w zależności od zmieniającej się w trakcie sezonu sumarycznej powierzchni aparatu asymilacyjnego sadzonek, co umożliwi uzyskanie odpowiedniej wilgotności substratu. Zaleca się stosowanie zmiennej regulacji prędkości jazdy deszczowni, np. z użyciem falownika.
7. Zaleca się stosować zawory kontroli ciśnienia dla każdej deszczowni oraz regulację ciśnienia zgodnie z kartą katalogową końcówki rozpylającej.
8. Zaleca się wykonywać okresową kontrolę wielkości indeksu powierzchni liści do wyznaczenia wielkości intercepcyjnej aparatu asymilacyjnego sadzonek oraz optymalnych dawek nawodnienia i nawożenia w trakcie produkcji materiału szkółkarskiego.
9. Zaleca się wyposażyć szkółki leśne w systemy kontroli fenotypu, pozwalające na automatyczne dostosowania systemu nawodnienia i nawożenia do aktualnych parametrów biometrycznych i stereometrycznych sadzonek.
10. Zaleca się kontrolować zawartość chlorofilu bezinwazyjną metodą typu SPAD, której wartości zawarte w tabeli 1 mogą posłużyć do optymalizacji nawożenia w trakcie produkcji materiału szkółkarskiego.

Gatunek	Liczba dni po wysiewie	SPAD
Sosna (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	128	4,10
Świerk (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	102	1,87
Buk (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	79	35,28
Dąb (<i>Quercus robur</i> L.)	125	32,50

Tabela 1. Średnia zawartość chlorofilu w liściach (wartość indeksu zieloności SPAD) w terminie, w którym sadzonki drzew leśnych uzyskały I klasę jakości (2014-2016)

11. Ze względu na znaczne zróżnicowanie parametrów fizycznych substratu, na linii do jego produkcji zaleca się wykonywać częstsze kontrole parametrów fizycznych torfu używanego do produkcji podłoża i wydłużyć proces mieszania składników substratu torfowego z dolomitem oraz zastosować różne dawki dolomitu dodawanego do substratu dla gatunków liściastych i iglastych.
12. Na linii do wypełniania substratem kaset zaleca się:
 - a) wykonywać dokładniejsze mieszanie substratu w mieszalniku oraz częstsze kontrole jego wilgotności, w celu stabilizacji i ujednolicenia wilgotności, gęstości objętościowej chwilowej oraz struktury substratu wypełniającego cele kaset i kontrolować proces zasypywania substratem kontenerów szkółkarskich i dostępne regulacje zespołów;
 - b) zwiększać zagęszczenie substratu w celach kaset przez obniżenie palców zagęszczających o 1 cm dla kaset V-120ss i 1,25 cm dla V-265, zaś przez uruchomienie podwójnego ruchu palców zagęszczających, spowolnić linię w celu poprawy retencji wody oraz poprawy parametrów pojemności wodnej i powietrznej substratu.
13. Dążyć do poprawy infrastruktury komunikacyjnej w obrębie pól produkcyjnych jak również ograniczyć, tam gdzie jest to możliwe, do niezbędnego minimum, transport kaset.

14. Przy braku normy jakościowej dla sadzonek wyhodowanych w technologii kontenerowej do oceny efektów produkcji należy stosować proporcję wysokości do grubości w szyjce korzeniowej, jako lepszą miarę przydatności sadzonek niż porównywanie cech wzrostowych z parametrami granicznymi. Dla sosny i świerka wartość tej proporcji powinna wynosić maksymalnie 70, buka – 65, a dębu szypułkowego – 75.
15. Przy hodowli sadzonek dębu szypułkowego w szkółkach wykorzystujących kontenery Hiko V-265 wskazane jest stosowanie sortowania (początek lipca) na sadzonki „wysokie” i „niskie” z przeniesieniem „wysokich” do nowego kontenera, z pozostawieniem 50% pustych cel.
16. Należy zmienić sposób hodowli sadzonek świerka pospolitego, np. wykorzystując tylko jeden z dotychczasowych sposobów nawożenia, a przy stosowaniu nawożenia mieszanego kończyć fertygację najpóźniej 90 dni po wysiewie. Stosowanie nawożenia mieszanego (startowe Osmocote bloom + dolistne) do końca lipca prowadzi do osiągnięcia przez sadzonki niekorzystnej, tj. zbyt wysokiej proporcji wysokości do średnicy w szyjce korzeniowej (h/d).
17. Należy kontrolować ilość dostarczanej wody na pola produkcyjne, kształtując wilgotność podłoża na poziomie 70-80%, szczególnie w drugiej połowie sezonu produkcyjnego.
18. Do hodowli świerka pospolitego i sosny zwyczajnej zaleca się użycie pojemnika o objętości celi 120 cm³ (Hiko V-120ss), a dla buka zwyczajnego pojemnika o objętości celi 265 cm³ (Hiko V-265), co nie powoduje ograniczenia dla rozwoju ich systemu korzeniowego.
19. Zaleca się przygotować plany nawożeniowe i nawodnieniowe dla szkółek, a dawki nawozu uzależnić od składu chemicznego podłoża oraz wody użytej do deszczowania i wody opadowej z uwzględnieniem ich ilości jak również potrzeb żywieniowych poszczególnych gatunków (tab. 2).
20. Sadzonki należy grupować według podobnych wymagań żywieniowych (sosna i świerk oraz buk i dąb szypułkowy) oraz umieszczać je na sąsiadujących

z sobą polach produkcyjnych. Należy dążyć do specjalizacji szkółek w produkcji wybranych gatunków drzew koordynowaną na szczeblu Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

Pierwiastek	Gatunek			
	Sosna	Świerk	Buk	Dąb szp.
N	7,93	5,81	11,59	10,6
P	1	0,77	0,96	0,99
K	3,76	2,59	6,13	3,76
Mg	0,88	0,41	2,24	1,63
Ca	0,91	0,98	4,22	4,12
Na	0,16	0,04	0,25	0,21
S	0,68	0,43	0,82	0,53
Mn	0,01	0,01	0,01	0,02
Fe	0	0	0,08	0,14
Zn	0,05	0,04	0,08	0,09
Cu	0,09	0,06	0,11	0,13
B	0	0	0	0
Mo	0,05	0,02	0,06	0,04

Tabela 2. Alokacja pierwiastków w „sadzonkach wzorcowych” [g/m²] w latach 2014-2016 (wartości średnie z wariantów kontrolnych)

21. W przypadku stosowania nawozu Floralesad, dotychczas używanego w Gospodarstwie Szkółkarskim w Nędzy, dla sosny i świerka należy wykonać po 6 zabiegów fertygacyjnych w ilości 1,0 litra nawozu na 1 ar pola produkcyjnego, w odstępach dwutygodniowych, przy maksymalnej konduktywności 1,0 mS/cm. Po tym czasie należy wykonać 2 zabiegi nawożenia po 0,5 l/ar, również w odstępach dwutygodniowych. Wczesny termin osiągnięcia przez świerka wymaganych parametrów „sadzonki wzorcowej” sugeruje możliwość zrezygnowania ze startowego nawożenia substratu w powyższym harmonogramie.
22. Dla buka i dębu należy wykonać 11 zabiegów fertygacyjnych z dawką nawozu 1,0 l/ar (Floralesad) w odstępach tygodniowych, przy maksymalnej konduktywności 0,8 mS/cm. Po tym czasie należy wykonać 2 zabiegi nawożenia po 0,5 l/ar, w odstępach dwutygodniowych.

23. Alternatywą dla dotychczas stosowanego nawożenia w Gospodarstwie Szkółkarskim w Nędzy może być użycie nawozu doglebowego „Hortiform ultra” o składzie: $N:P_2O_5:K_2O = 150:100:150$ w ilości 2 kg/m^3 podłoża, z dodatkowym użyciem nawozu dolistnego „Bujna zieleni” o składzie: $N:P_2O_5:K_2O = 94:35:59$ w 3 dawkach po 1,0 l/ar dla gatunków iglastych oraz 5 dawkach po 1,0 l/ar dla liściastych – jeden raz w tygodniu. Po tym okresie należy wykonać dodatkowo 2 zabiegi w odstępach dwutygodniowych w ilości 0,5 l/ar dla wszystkich gatunków. Zaproponowany powyżej sposób nawożenia z użyciem nowych produktów powinien zostać wcześniej przetestowany, a sadzonki zbadane pod względem parametrów biometrycznych i chemicznych.
24. Wymienione wcześniej sposoby i harmonogramy nawożeniowe dotyczą produktów aktualnie dostępnych na rynku, jednak nie odpowiadają w pełni wymaganiom omawianych gatunków. Na podstawie uzyskanych wyników należy stworzyć dwa osobne nawozy dolistne dla badanych grup gatunków iglastych i liściastych, którymi będzie można uzupełnić zapotrzebowanie na brakujące makro- i mikroelementy, po wcześniejszym stworzeniu planu nawożeniowego.
25. Zabieg nawożeniowy przez fertygację należy wykonywać rano, w bezdeszczowy dzień, a deszczowanie po czasie potrzebnym na przyswojenie pierwiastków. Należy używać dyszy do zamgławiania, co ma zapewnić możliwość pokrycia całego aparatu asymilacyjnego zastosowanym preparatem. W czasie silnych opadów, jeżeli istnieje ryzyko wypłukania składników pokarmowych z substratu, należy przeprowadzić dodatkowy zabieg fertygacji.
26. W przypadku dalszego stosowania dolomitu do odkwaszania torfu oraz nawożenia dolistnego (Floralesad) w obecnie stosowanej technologii zaleca się zwiększyć dawkowanie fosforu: dla buka od około połowy sierpnia, a dla dębu nawet od początku okresu wegetacji oraz dawki potasu dla obu gatunków.

27. Zaleca się stabilizować odczyn torfu (substratu) na poziomie 4,5 jednostki pH ze względu na optymalne pobieranie potasu oraz fosforu przez gatunki iglaste. Niedokładne wymieszanie torfu z dolomitem i brak aplikacji nawozu startowego bezpośrednio do cel w kasetach wpływa na dostępność i proporcję pierwiastków dla każdej sadzonki. Należy też rozważyć zastosowanie do odkwaszania substratu uwodnionej kredy zamiast dolomitu.
28. Zaleca się analizować substrat w kierunku zawartości dostępnych form pierwiastków dla korzeni roślin z uwzględnieniem faktu, że w trakcie sezonu wegetacyjnego torf zawarty w substracie będzie ulegał bardzo powolnej mineralizacji, zależnej od temperatury i pH substratu, które wpływają na działalność mikroorganizmów przeprowadzających ten proces.
29. Decyzja o zaprzestaniu nawożenia lub zmniejszenia jego częstotliwości i ilości powinna być uzależniona od: stężenia pierwiastków w aparacie asymilacyjnym w porównaniu do zaproponowanego zakresu optymalnego dla „sadzonych wzorcowej” lub/i indeksu pokrycia powierzchni przez aparat asymilacyjny (LAI) lub/i od ustalonej proporcji części nadziemnej sadzonki do średnicy w szyjce korzeniowej (wskaźnik h/d). Dwa ostatnie pomiary można wykonać w prosty i szybki sposób. Analiza stężenia pierwiastków w aparacie asymilacyjnym powinna być wykonana w terminie uzyskania parametrów „sadzonych wzorcowej” oraz przed zakończeniem okresu wegetacji i stanowi najdokładniejszą metodę pomiaru i może służyć jako ich weryfikacja.
30. Przed posadzeniem sadzonek należy zastosować aktywator ukorzenia w preparacie doliśnym (Rootstar). Preparat taki będzie aktywował wytwarzanie auksyn przez rośliny, co zintensyfikuje podziały komórkowe i będzie indukował tworzenie korzeni przybyszowych i bocznych.
31. Należy rozważyć stosowanie biologicznych metod w szkółkarstwie leśnym, za pomocą których można zwiększyć dostępność pierwiastków zgromadzonych w podłożu oraz wpłynąć na ochronę roślin, co może się przełożyć

na zmniejszenie zużycia środków chemicznych. Poszukiwanie mikroorganizmów mogących zwiększyć dostępność pierwiastków (trudno dostępnych w krótkim czasie) dla sadzonek, może stanowić jedno z ważniejszych wyzwań leśnej biotechnologii.

32. Zaleca się doskonalić wiedzę teoretyczną i praktyczną szkółkarzy przez różnego rodzaju szkolenia, w tym specjalistyczne studia podyplomowe, bowiem szkółkarstwo leśne staje się coraz bardziej „szkółkarstwem precyzyjnym” dzięki postępom techniki umożliwiającym zastosowanie nowoczesnej aparatury i technologii we wszystkich typach szkółek.

Stanisław Drozdowski

Katedra Hodowli Lasu, Instytut Nauk Leśnych

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Zagospodarowanie lasu w świetle europejskiej strategii na rzecz bioróżnorodności

Wstęp

W maju 2020 r. Komisja Europejska przyjęła Strategię na rzecz Bioróżnorodności, w perspektywie do 2030 r., której hasłem jest „Przywracanie przyrody do naszego życia”. Główny nacisk w przyjętej strategii został położony na rozwiązywanie charakterystyczne dla podejścia „segregacyjnego” funkcji lasu i rozwój sieci terenów chronionych. Autorzy strategii zwracają szczególną uwagę na potrzebę objęcia ochroną ścisłą wszystkich pozostałości lasów pierwotnych i starodrzewów, jakie jeszcze zachowały się w krajach Unii Europejskiej. Potrzeba ta jest motywowana zachowaniem najbogatszych pod względem różnorodności ekosystemów leśnych, będących jednocześnie rezerwuarami skumulowanego węgla, co ma duże znaczenie z punktu widzenia ochrony klimatu. Zachowanie różnorodności biologicznej jest jedynym sposobem na zachowanie jakości i ciągłości życia ludzkiego na Ziemi. W przeciągu ostatnich czterech dekad liczba dzikich zwierząt w skali światowej według niektórych statystyk zmniejszyła się o 60% (Sala i in. 2000). Do głównych czynników wpływających bezpośrednio na utratę różnorodności biologicznej

zalicza się: zmiany użytkowania gruntów i mórz, nadmierną eksploatację zasobów naturalnych, zmiany klimatu, zanieczyszczenia oraz występowanie inwazyjnych gatunków obcych. Autorzy strategii podkreślają, że zmiany klimatu przyspieszają degradację środowiska naturalnego, powodując susze, powodzie i pożary lasów, a niezrównoważone użytkowanie jest głównym czynnikiem wywołującym zmianę klimatu. Z tego względu ochrona i przywracanie terenów podmokłych, torfowisk i ekosystemów przybrzeżnych lub zrównoważone gospodarowanie obszarami morskimi, lasami, użytkami zielonymi i glebami rolnymi, będą miały zasadnicze znaczenie dla redukcji emisji i przystosowania się do zmiany klimatu. Podstawę strategii stanowi zdefiniowanie, mapowanie, monitorowanie i ścisła ochrona wszystkich pozostałych w Unii Europejskiej lasów pierwotnych i starodrzewów (EU Biodiversity Strategy for 2030), a ponadto lasów poza Unią tak, aby zagwarantować, że działania UE nie doprowadzą do wylesiania w innych regionach świata. Nie bez znaczenia jest także zmienność regionalna zachowanej różnorodności lasów w UE i potrzeba jej połączenia korytarzami ekologicznymi, co ma umożliwić migrację gatunków, aby zapobiec izolacji genetycznej. W celu wdrażania tej strategii promowane jest także leśnictwo bliskie naturze i przyjazne zachowaniu różnorodności biologicznej prowadzenie gospodarki leśnej. Głównymi celami strategii o ochronie bioróżnorodności do 2030 r. są: 1) objęcie co najmniej 30% unijnych obszarów lądowych i 30% unijnych obszarów morskich ochroną prawną i wprowadzenie korytarzy ekologicznych w ramach realnej transeuropejskiej sieci Natura; 2) ścisła ochrona co najmniej 1/3 unijnych obszarów chronionych, w tym wszystkich pozostałych w UE lasów pierwotnych i starodrzewów; 3) skuteczne zarządzanie wszystkimi obszarami chronionymi, w tym określenie jasnych celów i środków ochrony oraz ich odpowiednie monitorowanie (EU Biodiversity Strategy for 2030).

Strategie zachowania różnorodności biologicznej w lesie

Różnorodność biologiczna jest to zróżnicowanie form życia na wszystkich poziomach jego organizacji, tj.: 1) zróżnicowania w obrębie gatunku (różnorodność genetyczna); 2) zróżnicowania pomiędzy gatunkami oraz 3) zróżnicowania ekosystemów (Hunter 2004). Bez względu na poziom organizacji życia, od dłuższego czasu obserwowana jest utrata różnorodności biologicznej (Sala i in. 2000), a w związku z tym są podejmowane różne działania mające na celu zatrzymanie lub przynajmniej osłabienie tempa utraty różnorodności biologicznej. Działania te skupiają się w dwóch głównych kierunkach (strategiach): pierwszym, historycznie starszym, który opiera się na zasadzie segregacji i polega na wydzieleniu obszarów chronionych, wyłączonych z zagospodarowania i nadaniu im specjalnego statusu prawnego; drugim, dążącym do integracji działań ochronnych w ramach zarządzania zasobami przyrodniczymi i środowiskiem, zakładając ich użytkowanie w sposób trwały i zrównoważony. Charakterystykę segregacyjnego oraz integracyjnego podejścia do ochrony leśnej różnorodności biologicznej przedstawili Bollmann i Braunisch (2013). Według cytowanych autorów, w przypadku podejścia segregacyjnego, pewna część obszarów leśnych pełni wyłącznie funkcje związane z ochroną przyrody (np. rezerwat leśny), przy jednoczesnym dążeniu do maksymalizacji funkcji produkcyjnej na innych powierzchniach leśnych. W przypadku podejścia integracyjnego funkcje lasu o charakterze ekologicznym, ekonomicznym i społecznym są łączone na jak największym obszarze powierzchni leśnej.

Przykładem integracyjnego podejścia do problemu ochrony leśnej różnorodności biologicznej jest realizowana obecnie koncepcja trwale zrównoważonej gospodarki leśnej, sformułowana w ramach Ministerialnego Procesu Ochrony Lasów w Europie (MCPFE) (Nowakowski i Rozwałka 2000). W ramach tej koncepcji przyjęto założenie o wielofunkcyjnym charakterze lasów i gospodarki leśnej, w którym wszystkie istotne i ważne funkcje lasów

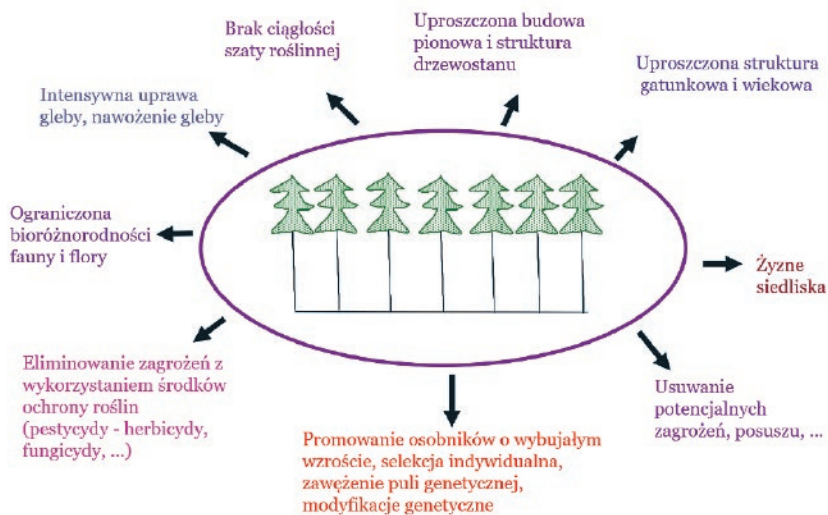
są równorzędne. Odzwierciedla to definicja trwale zrównoważonej gospodarki leśnej, zgodnie z którą oznacza ona zarządzanie i użytkowanie lasów i obszarów zadrzewionych w taki sposób i w takim tempie, które pozwolą zachować je jako odnawialne zasoby naturalne i nie uszczuplić ich w długim czasie, zachować ich różnorodność biologiczną, produktywność, zdolność do spełniania teraz i w przyszłości odpowiednich ekologicznych, ekonomicznych i społecznych funkcji na lokalnym, krajowym i globalnym poziomie, nie powodując przy tym szkód w innych ekosystemach.

Zagospodarowanie lasu w świetle zmian klimatycznych i strategii zachowania różnorodności biologicznej

Rosnąca częstotliwość zdarzeń o charakterze ekstremalnym, zarówno abiotycznym (huraganowe wiatry, ekstremalne susze, opady mokrego śniegu), jak i biotycznym (gradacje owadów, choroby grzybowe), powoduje znaczące szkody w wielu lasach w Polsce i na świecie. Przewiduje się, że w najbliższym czasie skala tych zjawisk będzie tylko rosła, dlatego zwiększenie zdolności adaptacyjnych lasów do zmian zachodzących w środowisku jest obecnie najważniejszym problemem gospodarki leśnej. Z tego względu poszukuje się sposobów mających na celu podniesienie odporności drzewostanów na oddziaływanie szkodliwych owadów leśnych, chorób i pożarów, jak również rozwiązań pozwalających na zwiększenie zdolności do odbudowy i regeneracji oraz zachowania różnorodności biologicznej po wystąpieniu wszelkiego rodzaju zaburzeń i katastrof. Praktyczna realizacja powyższych celów wymaga planowania i prowadzenia podstawowych działań hodowlanych w lasach, z uwzględnieniem 6 ogólnych zasad adaptacyjnych: 1) zasady kształtowania drzewostanów o zróżnicowanym składzie gatunkowym; 2) zasady kształtowania drzewostanów o zróżnicowanej strukturze wiekowej, wysokościowej i przestrzennej, 3) zasady zachowania i zwiększania wewnątrzgatunkowej zmienności genetycznej, 4) zasady zwiększania odporności poszczególnych

osobników (drzew) na stresy o charakterze abiotycznym i biotycznym, 5) zasady prewencyjnej przebudowy drzewostanów odznaczających się wysokim poziomem ryzyka powstania szkód różnego rodzaju, 6) zasady niedopuszczania do nadmiernego wzrostu zasobności drzewostanów (Brang i in. 2016) . W zagospodarowaniu lasu i jednocześnie realizacji powyższych zasad szczególnie ważną rolę odgrywa hodowla lasu, jako dziedzina nauk leśnych i praktycznego leśnictwa, która zajmuje się bezpośrednio drzewami i drzewostanami, stanowiącymi główny składnik szaty leśnej (Brzeziecki 2021). Rozwój hodowli lasu jako dyscypliny nauk leśnych i dziedziny praktycznego leśnictwa przeszedł i przechodzi nadal ewolucję, od XIX-wiecznego spojrzenia na hodowlę lasu traktowaną jako działalność zbliżoną w zakresie metod, środków i celów do uprawy rolniczej (ryc. 1, uprawa lasu), do współczesnego ujęcia istoty hodowli lasu jako działalności mającej na celu sterowanie, w pożądanym przez człowieka kierunku, procesami rozwojowymi przebiegającymi w lesie, traktowanym jako złożone zjawisko przyrodnicze (Bernadzki 1995; 2000). Kierunek ten określa się mianem półnaturalnej hodowli lasu (ryc. 2), w którym zachowanie walorów przyrodniczych ekosystemów leśnych jest równie ważne, jak zachowanie ich zdolności do pełnienia funkcji produkcyjnej (Bernadzki 1995). Pozwala to traktować półnaturalną hodowlę lasu jako główne narzędzie podejścia ekosystemowego i założeń trwale zrównoważonej, wielofunkcyjnej gospodarki leśnej w praktyce.

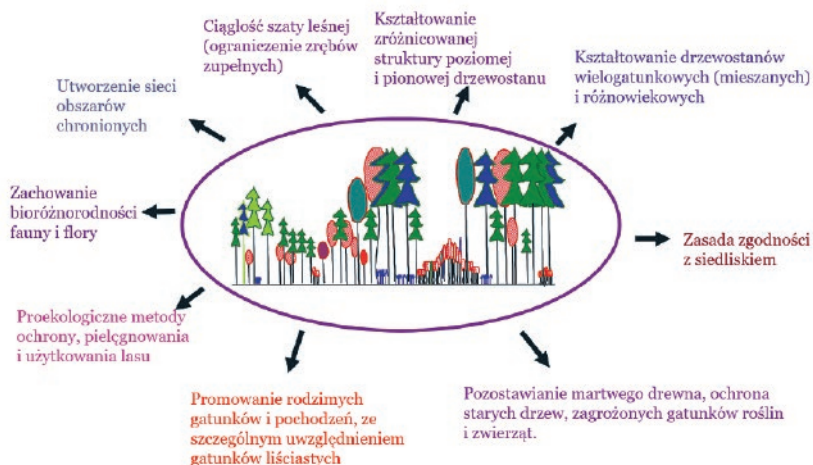
W ostatnim czasie zaproponowano szereg różnych zasad postępowania, mającego na celu zwiększenie zdolności adaptacyjnych lasów do zmieniających się warunków klimatycznych. Zdecydowana większość tych propozycji jest związana z koncepcją leśnictwa wielofunkcyjnego oraz założeniami półnaturalnej hodowli lasu (ryc. 2) i zmierza do obniżenia tzw. ryzyka hodowlanego. W tę ideę wpisują się trzy główne kierunki działań: 1) działania mające na celu zwiększenie odporności (rezystencji, wytrzymałości) istniejących lasów i niedopuszczenie do wystąpienia szkód powodowanych rosnącą destabilizacją



Ryc. 1. Cechy charakterystyczne plantacyjnej uprawy drzew leśnych i leśnictwa na wzorcach rolniczych.

warunków klimatycznych, 2) działania mające na celu wzrost potencjału lasów do samorzutnej regeneracji i powrotu do pożądanego stanu po wystąpieniu szkód (działania zwiększające tzw. rezyliencję lasów), 3) działania mające na celu zwiększenie zdolności lasów do płynnej (stopniowej, ewolucyjnej) adaptacji do zmieniających się warunków klimatycznych (Brang i in. 2014).

W idei półnaturalnej hodowli lasu wychodzi się z założenia, że zdecydowana większość lasów powinna być zagospodarowana i użytkowana (Schütz 2001). Ważne jest jednak to, według jakich zasad to użytkowanie się odbywa. Półnaturalna hodowla lasu jest równoznaczna z holistycznym rozumieniem lasów i gospodarki leśnej oraz kształtowaniem ich wielofunkcyjnego charakteru w możliwie jak najmniejszej skali przestrzennej. Podstawowe założenie półnaturalnej hodowli lasu sprowadza się do kształtowania możliwie jak najbardziej zróżnicowanej struktury lasów i drzewostanów, jako najważniejszych elementów ekosystemów leśnych. Zakłada się przy tym, że zróżnicowana struktura drzewostanu (pod względem gatunkowym, wymiarowym i przestrzennym, udziału drewna martwego) jest pozytywnie skorelowana z liczbą potencjalnych



Ryc. 2. Główne składowe półnaturalnej hodowli lasu (Pommerening i Murphy 2004).

nisz ekologicznych i gatunków roślin, zwierząt i grzybów, które te nisze mogą wykorzystywać. Stąd biorą się postulaty dotyczące ograniczania wielkopowierzchniowych zrębów, preferowania tzw. rębni złożonych oraz pozostawiania na następną generację jak największej liczby elementów odnawianych i przebudowywanych drzewostanów, w tym tzw. wysp starodrzewu (Bernadzki 1993), których główną funkcją jest zapewnienie odpowiedniej ilości martwego drewna w lasach zagospodarowanych.

Z licznych badań wynika, że zachowanie wysokiego poziomu leśnej różnorodności biologicznej wymaga przede wszystkim utrzymania, w sposób trwały, jak najbardziej urozmaiconego składu gatunkowego drzewostanów, ponieważ w przypadku każdego gatunku drzewa można znaleźć takie przykłady organizmów reprezentujących różne grupy taksonomiczne, które występują wyłącznie na tym gatunku. Potrzeba aktywnego kształtowania drzewostanów mieszanych, złożonych z wielu gatunków drzew, od dawna jest mocno podkreślana przez licznych specjalistów z zakresu gospodarki leśnej (Schütz 2001; Pretzsch i in. 2008; Brzeziecki i in. 2013; Brang i in. 2014; Ammer 2019). Z tego względu

w ostatnich 30 latach prowadzenia wielofunkcyjnej gospodarki leśnej często wykonywana jest przebudowa litych drzewostanów na mieszane (Fot. 1).



Fot. 1. Przebudowa litych świerczyn na drzewostany mieszane z udziałem jodły, buka i świerka.

Cały wysiłek gospodarki leśnej, wynikający z wdrożenia wielofunkcyjnej gospodarki leśnej, jaki już został włożony i jaki stale ma miejsce, w zakresie udoskonalenia sposobów zagospodarowania lasów w taki sposób, aby zapewnić trwałość wszystkich pełnionych przez nie funkcji, w tym funkcji ochrony różnorodności biologicznej, jest w dużym stopniu ignorowany przez osoby i instytucje zajmujące się ochroną przyrody, na różnych szczeblach (Brzeziecki 2021). Prawdziwym wyzwaniem czasu nie jest dalsze zwiększanie powierzchni terenów chronionych i wzrost powierzchni objętej ochroną ścisłą, tylko doskonalenie i wdrażanie na jak najszerszą skalę metod zagospodarowania lasów sprzyjających zachowaniu ich prawdziwie wielofunkcyjnego charakteru, w możliwie jak najmniejszej skali przestrzennej, a także zapewnienie efektywności ekonomicznej gospodarki leśnej oraz przygotowanie ekosystemów leśnych na problemy, jakie już się pojawiają i jakich należy spodziewać się w bliskiej przyszłości ze strony zmieniającego się klimatu i innych czynników środowiska (Brzeziecki 2021). W tym kontekście jest niezrozumiałe dążenie

do separacji funkcji lasu (wdrożenie Strategii na rzecz bioróżnorodności w obecnym rozumieniu), w którym rola produkcyjna (ekonomiczna) polegająca na zapewnieniu dóbr leśnych (drewno, grzyby, jagody i inne użytki nieдрzewne) ma być w dużej mierze realizowana przez plantacyjne uprawy drzew szybko rosnących lub ich kultywary o zawężonej puli genetycznej. Jest to niezrozumiałe również ze względu na to że, rozwój zagospodarowania lasu począwszy od gospodarki przebiegowej, prowadzi przez naśladowanie wzorców rolniczych (intensywna uprawa gleby, sztuczne odnowienie, uproszczona budowa lasu), do obecnego naśladowania i kierowania procesami naturalnymi – sukcesyjnymi, tj. tworzenia optymalnych warunków do powstania odnowienia, sztafety gatunków o różnych strategiach życiowych, rozpraszania ryzyka hodowlanego, biologicznej automatyzacji i kierowania rozwojem lasu. Rozwój ten w przypadku pielęgnacji lasu to droga począwszy od intensywnej, „totalnej” pielęgnacji, do koncepcji zakładających możliwie niską ingerencję człowieka w naturalne procesy lasotwórcze (sylwigenezę) oraz koncentracji na tym, co najważniejsze – to stanowi podstawę racjonalizacji ekonomicznej i biologicznej. W tym kontekście nasuwają się pytania, czy planowe leśnictwo w związku z opisywaną Strategią powinno powrócić do standardów opartych na wzorcach rolniczych? Powrócić do wzorców, które odrzucono w ramach ekologizacji gospodarki leśnej realizowanej już od ponad 30 lat? Pytania te budzą obecnie ogromne kontrowersje i dyskusję w środowisku zarówno naukowym, jak i gospodarczym.

Podsumowując powyższe rozważania należy mocno podkreślić, że dzisiaj dyskusja dotycząca Strategii na rzecz bioróżnorodności nie dotyczy pytania, czy chronić różnorodność w lasach, tylko jak chronić? Wzrost roli produkcyjnej, na ograniczonej powierzchni lasów w konsekwencji wdrożenia Strategii doprowadzi bowiem do ich zubożenia biologicznego i wzrostu podatności na zaburzenia, a tym samym obniżenia ich trwałości. Wdrożenie Strategii w świetle obecnie zauważalnych zmian środowiskowych i społecznych, niewątpliwie wpłynie negatywnie na postrzeganie planowej gospodarki leśnej, która zawróci do XIX

-wiecznych wzorców i rozwiązań opartych na uprawie rolniczej, tak krytykowanych przez środowiska uzurpujące sobie jako jedyne misję ochrony przyrody.

Literatura

- Ammer, C., 2019. Diversity and forest productivity in a changing climate. *New Phytologist*, 221(1), 50-66.
- Bernadzki E. 1993. Zwiększanie różnorodności biologicznej poprzez zabiegi hodowlano-leśne. *Sylwan* 3: 29-36.
- Bernadzki E. 1995. Półnaturalna hodowla lasu. W: Ochrona różnorodności biologicznej w zrównoważonej gospodarce leśnej. PTL i IBL. Warszawa.
- Bernadzki E. 2000. Półnaturalna hodowla lasu. Biblioteczka leśniczego. Zesz. 129. SITLiD. DGLP. Wyd. Świat. Warszawa.
- Brang P., Küchli Ch., Schwitter R., Bugmann H., Ammann P. 2016. Waldbauliche Strategien im Klimawandel. W: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Chapter 5.1. Publisher: Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien Editors.
- Brang P., Spathelf J., Larsen B., Bauhus J., Bončina A., Chauvin Ch., Drössler L., García-Güemes C., Heiri C., Kerr G., Lexer M.J., Mason B., Mohren F., Mühlethaler U., Nocentini S., Svoboda M. 2014. Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87, 492-503. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu018>.
- Brzeziecki B. 2021. Konsekwencje objęcia ochroną ścisłą znacznych obszarów leśnych Polski (wdrożenie jednego z celów unijnej Strategii na rzecz Bioróżnorodności do 2030 roku - objęcie ścisłą ochroną 10% obszarów lądowych, w tym wszystkich pozostałych w UE lasów pierwotnych i starodrzewów), ze szczególnym uwzględnieniem zagrożenia spowodowanego zmianami klimatycznymi oraz niekorzystnymi zmianami sukcesyjnymi zbiorowisk leśnych. Ekspertyza nr EZ.271.2.6.2021. Maszynopis KHL SGGW.

- Brzeziecki B., Drozdowski S., Bielak K., Buraczyk W., Gawron L., 2013. Kształtowanie zróżnicowanej struktury drzewostanów w warunkach nizinnych. *Sylwan* 157 (8), 597-606. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2013051>.
- Bollmann K., Braunisch V. 2013. To integrate or to segregate: balancing commodity production and biodiversity conservation in European forests. W: Kraus D., Krumm F. (red.). *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. European Forest Institute. p:18-31.
- EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives. European Commission. Brussels. https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_pl.
- Hunter Jr M. L. 2004. Biological diversity. W: Hunter Jr M. L. (red.). 2004. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge. p: 3-21.
- Nowakowski A., Rozwalka Z. 2000. Ogólne i szczegółowe cele trwałej, zrównoważonej i wielofunkcyjnej gospodarki leśnej. Biblioteczka Leśniczego. Zesz. 124. SITLiD. DGLP. Wyd. Świat. Warszawa.
- Pommerening A., Murphy S.T. 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry* 77, 1: 27-44.
- Pretzsch H., Grote R., Reineking B., Rötzer Th., Seifert St. 2008. Models for forest ecosystem management: a European perspective. *Ann. Bot.* 101, 1065-1087. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm246>.
- Sala O.E., Chapin III F. S., Armesto J.J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke F. L., Jackson B. R., Kinzig A., Leemans R., Lodge M. D., Mooney H. A., Oesterheld M., Poff N. L., Sykes T. M., Walker H. B., Walker M., Wall D.H. 2000. Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science* 287: 1770-1774.
- Schütz J.-Ph. 2001. *Der Plenterwald*. Berlin. Parey Buchverlag.

Andrzej M. Jagodziński

Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, Kórnik

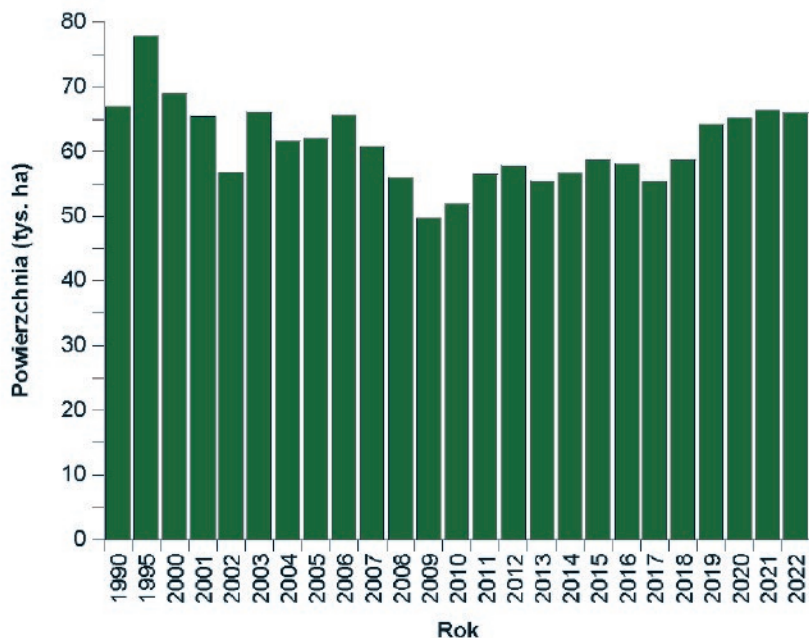
Konsekwencje podcinania korzeni drzew w produkcji szkółkarskiej

Wstęp

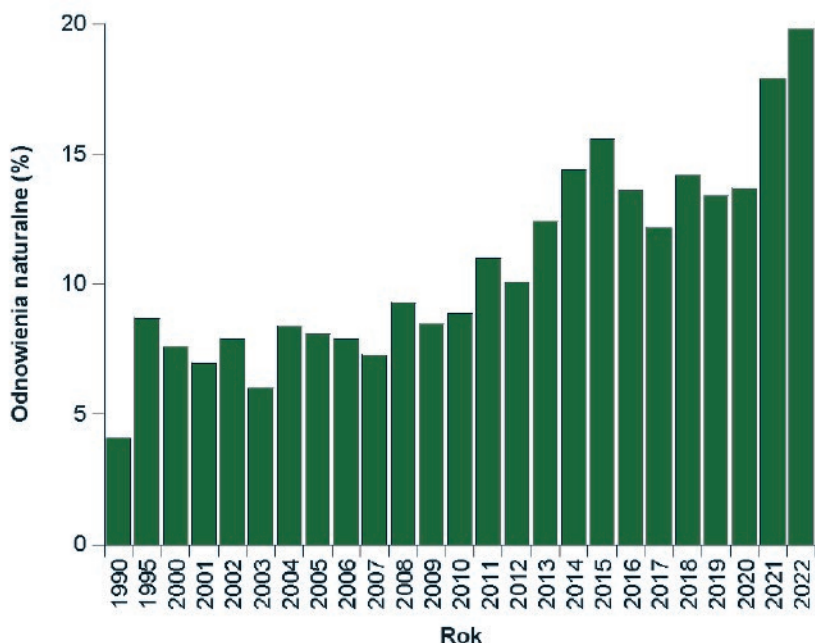
Nowa generacja drzewostanu może powstać na drodze dwóch procesów: odnowienia (na obszarach objętych produkcją leśną) lub zalesienia (na obszarach nieobjętych produkcją leśną). W obu przypadkach drzewostan może powstać drogą naturalną (samosiew, odrośla) bądź drogą sztuczną (siew, sadzenie).

Dominującym sposobem odnowienia lasu w Polsce jest odnowienie sztuczne, realizowane głównie poprzez sadzenie wyprodukowanego w szkółkach leśnych materiału sadzeniowego drzew i krzewów. W 2022 r. powierzchnia odnowień i zalesień w Polsce wynosiła 66,0 tys. ha (GUS 2023). Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS 2010, 2013, 2018, 2019, 2021, 2023), średnia powierzchnia odnowień i zalesień w latach 2000-2022 wynosiła 60,2 tys. ha i wahała się od 49,7 tys. ha w 2009 r. do 66,4 tys. ha w 2021 r. (Rycina 1). Na szczególną uwagę zasługuje wzrost udziału odnowień naturalnych w sumarycznej powierzchni odnowień i zalesień, obserwowany od początku lat 90. XX wieku (Rycina 2). W 1990 r. powierzchnia odnowień naturalnych w odniesieniu do sumy powierzchni odnowień i zalesień wynosiła 4,1%,

w 2000 r. – 7,6%, w 2010 r. – 8,9%, w 2015 r. – 15,6%, w 2020 r. – 13,7%, a w 2022 r. – 19,8% (GUS 2021, 2023). W Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe produkcja sadzonek realizowana jest w trzech systemach: polowym, tunelowym oraz kontenerowym. W 2021 r. produkcja sadzonek w szkółkach polowych stanowiła ponad 87% całkowitej produkcji, a w 2022 r. prawie 86%. Łączna produkcja sadzonek drzew i krzewów leśnych w Lasach Państwowych wynosiła w 2021 r. ok. 710 mln sztuk i 672,5 mln w 2022 r., a ponad połowę wyprodukowanych sadzonek stanowiły sadzonki drzew gatunków liściastych (Zajączkowski i in. 2022, 2023).



Ryc. 1. Powierzchnia odnowień i zalesień w latach 1990-2022 (na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego).



Ryc. 2. Udział odnowień naturalnych w sumarycznej powierzchni odnowień i zalesień w latach 1990-2022 (na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego).

Odnowienie naturalne

Odnowienie naturalne lasu, powstałe poprzez samosiew (ale i także, choć w mniejszym stopniu, przez odrośla), cechuje się licznymi zaletami, choć zawsze związane jest ze znacznym ryzykiem hodowlanym. Jego powstanie umożliwia zachowanie rodzimego drzewostanu (zasobów genowych), może zatem chronić lokalne ekotypy, najlepiej dostosowane do lokalnych warunków środowiskowych. Umożliwia w maksymalnym stopniu wykorzystanie naturalnych sił przyrody i pozwala na przetrwanie w składzie gatunkowym drzewostanu gatunków domieszkowych. Powstający nalot zapewnia ochronę gleby (zapobiega wydatnie degradacji gleb leśnych) oraz utrzymanie korzystnych warunków mikroklimatycznych. Obfitość siewek (duże zagęszczenie) umożliwia szerszy wybór osobników do dalszej hodowli (selekcja). Stwarza możliwość

kształtowania wielopiętrowej i wielogeneracyjnej struktury drzewostanu. Ponadto, wykorzystanie odnowienia naturalnego w lasach gospodarczych umożliwia utrzymanie ciągłości produkcji, nieprzerwanego jej toku (Bernadzki 1993; Szymański 2001; Bernadzki 2005; Leibundgut 2009; Jaworski 2011; Kocjan 2011; Szkamruk 2013). W lesie naturalnym odnowienie naturalne jest jedynym sposobem, dzięki któremu dochodzi do wymiany pokoleń drzew, natomiast w lasach pełniących funkcje gospodarcze, w których gospodarka leśna opiera się na ekologicznych podstawach, odnowienie naturalne powinno być sposobem podstawowym. W dorobku naukowym z zakresu hodowli lasu istnieje wiele publikacji, powstałych w oparciu o badania przeprowadzone w lasach gospodarczych, dokumentujących rezultaty zastosowania różnych metod uzyskiwania wartościowego odnowienia naturalnego. Współcześnie, mimo tego iż udział odnowień naturalnych w lasach gospodarczych Polski wzrasta, to jednak w wielu sytuacjach uniknięcie odnowienia sztucznego nie jest możliwe, i choć w proekologicznym modelu leśnictwa zaleca się wyeliminowanie odnowienia sztucznego, to w przypadku np. przebudowy składów gatunkowych drzewostanów czy budowy piętrowej może być konieczne (Barzdajn i in. 1999).

Zdaniem Rykowskiego (2006) wszędzie tam, gdzie warunki siedliskowo-drzewostanowe są korzystne, udział drzewostanów odnawianych naturalnie, poprzez samosiew, należy zwiększać, taka metoda odnowienia sprzyja bowiem selekcji naturalnej, wzrostowi odporności, adaptacji do lokalnych warunków środowiskowych, a przy tym korzystnie wpływa na różnorodność biologiczną. Ponadto, mając na względzie to, iż potencjał adaptacyjny populacji drzew leśnych w dużym stopniu zależy od ich zmienności genetycznej, to w jak najszerszym zakresie należy wykorzystywać właśnie odnowienie naturalne, co ma szczególne znaczenie w odniesieniu do aktualnie obserwowanych i przewidywanych zmian klimatu i ich skutków (Brzeziecki, Rostek 2021). Licząc na odnowienie naturalne powstałe na drodze samosiewu, trzeba

pamiętać jednak o pewnych niedogodnościach, jak chociażby uzależnieniu od tzw. lat nasiennych czy nierównomierności obsiewu (Bogdziewicz, Wróbel 2012; Hacket-Pain, Bogdziewicz 2021). Do najważniejszych warunków udatności samosiewu należą: dobry urodzaj nasion zdolnych do kiełkowania, odpowiednie warunki glebowe umożliwiające ich kiełkowanie, a także – co jest warunkiem utrzymania nalotu – odpowiednie warunki środowiskowe umożliwiające dalszy rozwój siewek (Ilmurzyński, Włoczewski 2003). Wówczas, gdy uzyskanie odnowienia naturalnego nie jest możliwe bądź też ze względów gospodarczych czy przyrodniczych niecelowe, wykorzystuje się odnowienie sztuczne (poprzez siew lub sadzenie).

Produkcja sadzonek

Produkcja sadzonek drzew i krzewów do odnowień i zalesień ma długą, udokumentowaną historię. Po II wojnie światowej w każdym nadleśnictwie zakładano kilka-kilkanaście niewielkich szkółek, których celem było zaspokojenie lokalnych potrzeb na sadzonki drzew i krzewów leśnych wykorzystywanych do odnowień i zalesień, a także jako materiał do zadrzewień (Puchniarski 2012). Zestaw uprawianych w takich szkółkach gatunków roślin drzewiastych nie był oczywiście duży, w ograniczonym stopniu stosowano mechaniczną uprawę i pielęgnację gleby i sadzonek, a mimo olbrzymiej pracochłonności produkcja sadzonek drzew i krzewów leśnych była imponująca (Bernadski 2006). Warto podkreślić, iż zaletą takiej hodowli sadzonek było produkowanie materiału roślinnego w warunkach zbliżonych do naturalnych, panujących w otaczających szkółki lasach. Produkcja sadzonek w takich szkółkach najczęściej realizowana była przez kilka lat, miały one charakter szkółek tymczasowych. Od połowy XX wieku zaczęły pojawiać się szkółki stałe, wciąż jednak niewielkie, dekadę później zaś, ze względu na bardzo duży pod względem powierzchniowym rozmiar odnowień i zalesień, rozpoczęto proces koncentracji produkcji szkółkarskiej, tworząc w latach 70. XX wieku model szkółki

wielkopowierzchniowej, na ogół z kilkoma kwaterami produkcyjnymi. Wzrost poziomu mechanizacji prac, rozwój i stosowanie nowych technologii produkcji sadzonek w szkółkach, a także implementowanie do praktyki wyników licznych badań dotyczących nasiennictwa i szkółkarstwa leśnego umożliwiły wzrost ilości i jakości produkowanego materiału sadzeniowego. W ostatniej dekadzie XX wieku rozpoczęto w Polsce intensywne wdrażanie technologii produkcji sadzonek drzew i krzewów z zakrytym systemem korzeniowym w warunkach kontrolowanych, technologii rozwijanej i udoskonalanej do dziś, choć warto wspomnieć, że hodowlę sadzonek w tym systemie realizowano w naszym kraju już w latach 70. XX wieku (Szabla, Pabian 2009). Zgodnie z aktualnie obowiązującymi „Zasadami hodowli lasu” (2023), „celem produkcji szkółkarskiej jest uzyskiwanie dobrej jakości materiału sadzeniowego o odpowiednim pochodzeniu, gwarantującego osiągnięcie efektu hodowlanego, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego”. Spośród trzech głównych technologii produkcji materiału sadzeniowego, wymienionych w „Zasadach hodowli lasu”, dominującą w Polsce technologią jest produkcja polowa sadzonek drzew i krzewów w szkółkach otwartych z odkrytym systemem korzeniowym. Sadzonki takie są najpowszechniej wykorzystywane w odnowieniach i zalesieniach, a także do tworzenia plantacji drzew leśnych, poprawek, uzupełnień, dolesień oraz wprowadzania podszytów. W trakcie produkcji materiału sadzeniowego w szkółkach stosuje się liczne zabiegi ochronne i pielęgnacyjne, a także agrotechniczne (stworzenie jak najlepszych warunków rozwoju wysianym nasionom, a następnie powstałym z nich roślinom), celem których jest wyprodukowanie dobrej jakości sadzonek oraz ochrona środowiska glebowego. Zabiegi te obejmują m.in. przygotowanie gleby, nawożenie organiczne (np. kompostem), nawożenie mineralne, zakwaszanie lub wapnowanie gleby, płodozmian, szkółkowanie lub pikowanie sadzonek, deszczowanie, odchwaszczanie i spulchnianie gleby, zwalczanie szkodników owadzych i innych szkodników zwierzęcych, ochronę przed chorobami grzybowymi,

kontrolowaną mykoryzację, a także formowanie systemów korzeniowych (Wesoły, Hauke 2009). Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 18 lutego 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakie powinien spełniać leśny materiał rozmnożeniowy, materiał sadzeniowy (z wyjątkiem topoli) powinien cechować się m.in. prostym i zdrewniałym na całej długości pędem głównym (oś pionowa sadzonki), wyraźnie wydłużonym wskutek przyrostu w ostatnim roku, skupionym i prawidłowo rozwiniętym systemem korzeniowym z licznie występującymi korzeniami drobnymi na korzeniach szkieletowych (zdefiniowanych jako najgrubsze korzenie tworzące podstawę systemu korzeniowego), nieuszkodzonym, zdrowym i dobrze wykształconym pękiem szczytowym, brakiem uszkodzeń mechanicznych (pędów i korzeni, z wyjątkiem ran powstałych podczas podkrzesywania, podcinania korzeni i wyorywania sadzonek) i spowodowanych mrozem, a także prawidłowymi proporcjami pomiędzy wielkością części nadziemnej a wielkością systemu korzeniowego. W przywołanym Rozporządzeniu określono także minimalne i maksymalne wysokości części nadziemnej oraz minimalne średnice sadzonek w szyjce korzeniowej (Rozporządzenie... 2004).

Efektom produkcji szkółkarskiej ma być wyhodowanie sadzonek drzew i krzewów dobrej jakości, tak by w przyszłości zapewniły one wysoką udatność zakładanych upraw (White 1990). Wydawać by się mogło, iż po wyprodukowaniu sadzonek w szkółce i ich wydaniu (sprzedaży) troska leśniczego-szkółkarza o ich los powinna się zakończyć, a od tego momentu powinno rozpocząć się troszczenie gospodarza lasu o to, by z otrzymanego materiału sadzeniowego powstał zdrowy, dobrej jakości drzewostan (szerzej – las). Funkcjonalne oderwanie od siebie tych dwóch etapów rozwoju roślin drzewiastych (w szkółce leśnej i w drzewostanie) nie jest jednak możliwe, albowiem jakość sadzonek przekłada się w dużym stopniu na jakość przyszłego drzewostanu, przy czym skutki wykorzystania sadzonek wyprodukowanych w konkretnych warunkach mogą zostać dostrzeżone dopiero po wielu latach

od posadzenia ich w uprawie (Barzdajn 2009). Ocena jakości sadzonek w fazie produkcji szkółkarskiej ważna jest nie tylko na tym etapie wzrostu i rozwoju roślin, istotna jest ona także dla zrozumienia późniejszego ich wzrostu, żywotności i przeżywalności w uprawach leśnych (Haase 2008). Jakkolwiek zakładanie upraw leśnych z wykorzystaniem sadzonek z pożądanymi cechami nie jest gwarancją wysokiej ich przeżywalności oraz dobrego wzrostu po posadzeniu, to jednak wysoka jakość sadzonek zwiększa szanse na udane odnowienie lasu, analizowane zarówno w krótkiej, jak i długiej perspektywie (Grossnickle, MacDonald 2018).

W literaturze naukowej wyróżnia się dwie podstawowe grupy parametrów opisujących jakość siewek (sadzonek) – morfologiczne oraz fizjologiczne (Mattsson 1997). Cechy morfologiczne siewek (sadzonek) można uznać za fizyczny przejaw aktywności fizjologicznej. Wśród parametrów morfologicznych najczęściej wykorzystywane są: wysokość, średnica na wysokości szyi korzeniowej, stosunek wysokości do średnicy, długość pąków, masa części nadziemnej, masa części podziemnej czy stosunek masy części nadziemnej do masy części podziemnej. Do oceny jakości siewek (sadzonek) na poziomie fizjologicznym korzysta się np. z analizy mrozoodporności, potencjału wzrostowego korzeni, spoczynku pąków, zawartości makro- i mikroelementów w biomasie roślin czy analizy fluorescencji chlorofilu (np. Tarasiuk 1993; Mohammed i in. 1995; Mattsson 1997; Szeligowski 2005; Haase 2008). Wymienione przykłady parametrów siewek (sadzonek) służących do oceny ich jakości nie stanowią katalogu zamkniętego, do tradycyjnych metod dołączają bowiem nowoczesne techniki biochemiczne, biofizyczne oraz molekularne (Wesoły 1997; Wesoły i in. 1998; Grossnickle, MacDonald 2018).

Sadzonki z dobrze rozwiniętym systemem korzeniowym (pod względem jakościowym i ilościowym) charakteryzują się większą przeżywalnością po wy-sadzeniu w uprawie, co szczególnie dobrze widoczne jest na słabych lub zdegradowanych siedliskach (Davis, Jacobs 2005; Grossnickle 2005). Pomiędzy

nadziemną (S) a podziemną (R) częścią rośliny istnieje pewna równowaga funkcjonalna, stąd też ważną cechą siewki/sadzonki wysokiej jakości jest odpowiednia relacja pomiędzy nimi (S:R). Rozwój korzeni drzew w warunkach naturalnych różni się od rozwoju korzeni w warunkach produkcji szkółkarskiej, a stosunek S do R związany jest z gatunkiem drzewa i zmienia się wraz z wiekiem rośliny. Na ogół gatunki drzew liściastych cechują się wyższym udziałem biomasy korzeni względem biomasy nadziemnej w porównaniu do gatunków drzew iglastych. Jednym z najczęściej podawanych w literaturze kryteriów oceny jakości sadzonek, poza ich budową morfologiczną, wysokością i średnicą na wysokości szyi korzeniowej roślin, jest właśnie stosunek masy części podziemnej do nadziemnej. Masa korzeni *per se* stanowi jeden z ważniejszych czynników krytycznych dla przeżywalności sadzonek. Ponadto większa biomasa korzeni jest powiązana z ich większym przyrostem biomasy (dynamiką przyrostu) – ten zaś, po przesadzeniu rośliny do uprawy, wpływa redukująco na poziom stresu wodnego i przyczynia się do większej przeżywalności sadzonek. Nierównowaga pomiędzy biomasą nadziemną (a szczególnie biomasą transpirującego aparatu asymilacyjnego) a biomasą podziemną (pobieranie wody z gleby) prowadzi do stresu wodnego, który jest szczególnie silnie widoczny, gdy S:R przekracza 3. Jeśli S:R waha się w przedziale od 1 do 3, sadzonki charakteryzują się wyższą przeżywalnością, przy czym im niższy jest stosunek S do R, tym większa jest przeżywalność siewek i sadzonek. Jednakże wysoki stosunek masy części nadziemnej do podziemnej roślin nie musi skutkować niską przeżywalnością w sytuacji, gdy sadzonka ma dobrze rozwinięty system korzeniowy (Duryea 1984; Grossnickle 2012). Stąd też jednym z celów podcinania systemów korzeniowych siewek i sadzonek, powszechnej praktyki w szkółkarstwie, jest obniżenie stosunku S do R (np. Faulkner 1953; Mullin 1966; South, Blake 1994; South, Donald 2002). Zabieg ten wpływa nie tylko na architekturę system korzeniowego (Schultz, Thompson 1990; Watson, Hewitt 2020). Podcięcie korzeni skutkuje także np. usunięciem znacznych rezerw węglowodanów i innych składników odżywczych,

które mogłyby zostać wykorzystane do wzrostu rośliny po jej przesadzeniu do uprawy leśnej (Canham i in. 1999). Odcięcie części korzeni drzew wywołuje szereg skutków, zarówno pozytywnych, jak i negatywnych, jednakże zagadnienie to nie zostało dotychczas dobrze rozpoznane, a istniejące wyniki badań są stosunkowo skąpe i dotyczą na ogół etapu produkcji sadzonek w szkółkach (Eis, Long 1973; Watson, Sydnor 1987; White 1990; Costello i in. 2017), rzadko starszych drzew, np. w warunkach zieleni miejskiej (Benson, Morgenroth 2019; Benson i in. 2019a, 2019b).

Podcinanie korzeni – podstawowe wytyczne

Wśród najczęstszych celów podcinania systemów korzeniowych drzew podczas produkcji szkółkarskiej wymienia się:

- produkcję wytrzymalszych i solidniejszych sadzonek (Stoeckeler, Jones 1957),
- wymuszenie rozwoju bardziej zwartego i bogatszego w korzenie drobne systemu korzeniowego (Toumey, Korstian 1942; Hawley, Smith 1954; Darby 1962),
- opóźnienie wzrostu sadzonek (w szczególności nadziemnej ich części) w szkółce (Toumey, Korstian 1942; Hawley, Smith 1954; Darby 1962; Gingerich, Hertel 1962),
- wyższą przeżywalność sadzonek w warunkach uprawy (Stoeckeler, Jones 1957; Shoulders 1959),
- zastąpienie procesu szkółkowania (Foster 1932; Hawley, Smith 1954; Wesoły i in. 2009).

Podcinanie korzeni w szkółkach jest zabiegiem stosowanym od ponad 100 lat, często właśnie wskazywanym jako zabieg zastępujący szkółkowanie, czyli przesadzanie siewek i sadzonek w celu stworzenia im lepszych warunków do wzrostu i rozwoju (Goor, Barney 1968; Racey, Racey 1988). Zabieg ten ma także ułatwić wyjmowanie sadzonek z gleby. Większość badań skutków podcinania korzeni drzew skupiała się na rozpoznaniu wpływu tego zabiegu na

morfologię sadzonek i dynamikę ich przyrostu w fazie produkcji szkółkarskiej i tuż po przesadzeniu roślin do warunków uprawy (Rook 1971; Larson 1975; Hobbs i in. 1987; Aldhous, Mason 1994). Zabieg ten ma szczególnie praktyczny wymiar w produkcji wieloletniego materiału sadzeniowego, a jednym z jego celów jest formowanie systemów korzeniowych tak, aby systemy korzeniowe koncentrowały się blisko szyi korzeniowej i obfitowały w korzenie drobne, a jednocześnie unika się takich deformacji korzeni, jakie są częstym zjawiskiem przy szkółkowaniu (Urbański 1998; Hauke 2009). Zabieg ten skutkuje czasowym spowolnieniem wzrostu nadziemnego pędu sadzonki (Duryea 1984). Szczegółowe zasady podcinania systemów korzeniowych wybranych gatunków drzew, wraz z omówieniem terminów i sposobów wykonania tego zabiegu, przedstawiła m.in. Kłoskowska (1996). Autorka tego opracowania zaleca podcinanie korzeni na różnych głębokościach w zależności od gatunku i celu produkcji, tj.:

- dla daglezi zielonej (2/0) i jodły olbrzymiej (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla jodły pospolitej (3/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla modrzewia europejskiego (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla sosny zwyczajnej (2/0) i sosny czarnej (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla świerka pospolitego na głębokość 6-8 cm (2/0) i 8-10 cm (3/0),
- dla brzozy (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla buka zwyczajnego na głębokość 6-8 cm (1/0) i 10-15 cm (2/0),
- dla dębu szypułkowego i bezszypułkowego na głębokość 5-8 cm (1/0) i 10-15 cm (2/0),
- dla grabu pospolitego (2/0) i jesionu wyniosłego (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla klonów (2/0) na głębokość 8-10 cm,
- dla lipy drobnolistnej i szerokolistnej (2/0) na głębokość 8-10 cm,
- dla olszy czarnej i szarej (2/0) na głębokość 6-8 cm,
- dla wiązu pospolitego (2/0) na głębokość 6-10 cm,
- dla topoli osiki (2/0) na głębokość 6-10 cm (Kłoskowska 1996).

Wśród rekomendacji dotyczących podcinania systemów korzeniowych drzew w warunkach produkcji szkółkarskiej Kłoskowska (1996) wymienia:

- podcinanie korzeni siewek o dwuletnim cyklu produkcji po pierwszym roku, a u starszych po drugim lub trzecim roku wzrostu,
- konieczność uwzględnienia w doborze terminu przeprowadzenia zabiegu rytmu wzrostu nadziemnej i podziemnej części roślin,
- konieczność obfitego deszczowania siewek (sadzonek) po wykonaniu zabiegu podcinania korzeni przez 12-16 dni, a na glebach skłonnych do wysychania także przed wykonaniem zabiegu.

Podobne rekomendacje znajdują się w opracowaniu Puchniarskiego (2012). Autor podkreśla, iż podcinanie systemu korzeniowego w produkcji wieloletek jest zabiegiem niezbędnym, a jego celem jest ograniczenie wzrostu korzenia głównego przy jednoczesnym wykształceniu licznych korzeni drobnych. Podstawową reakcją siewek, u których wykonano zabieg podcięcia systemów korzeniowych, jest rozwinięcie gęstego i rozległego systemu korzeniowego, który można uznać za reakcję kompensującą utratę części korzeni, a który umożliwia siewkom pobranie z gleby wystarczającej ilości wody oraz składników odżywczych do prawidłowego wzrostu i rozwoju (Bréda i in. 2006). Podcinać można korzenie główne, a także korzenie boczne. Podobnie jak Kłoskowska (1996), Puchniarski (2012) rekomenduje przeprowadzenie zabiegu w kwietniu, natomiast w odniesieniu do dębów, buka i sosny – w pierwszej połowie czerwca, a zabiegowi temu powinno towarzyszyć obfite deszczowanie – jednocześnie przed wykonaniem podcinania korzeni, a następnie przez dwa tygodnie po podcięciu systemów korzeniowych. W przypadku podcinania korzeni drzew w kwietniu, cytowany autor rekomenduje także nawożenie pogłównie.

Podcinanie korzeni – przykładowe konsekwencje

Wpływ podcinania systemów korzeniowych drzew w trakcie produkcji szkółkarskiej na kondycję i parametry wzrostowe siewek (sadzonek) był

przedmiotem badań naukowych, choć publikacje z tego zakresu nie są liczne, a wyniki często są przeciwstawne.

Interesujących danych dostarczają np. badania Kłoskowskiej (1995). Autorka badała m.in. wpływ podcinania korzeni dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) na głębokość 6-9 cm w pierwszym roku produkcji (po zakończeniu wiosennego przyrostu na wysokość, czerwiec) oraz na głębokość 10-12 cm w drugim roku produkcji (wiosną, kwiecień) na wydajność i cechy biometryczne jedno- i dwuletnich sadzonek. Po pierwszym roku badań wykazano istotną redukcję wysokości dębów, ich średnicy na wysokości szyi korzeniowej, masy części nadziemnej i systemu korzeniowego oraz liczby siewek I klasy jakości. Stwierdzono natomiast istotny wzrost liczebności drobnych korzeni oraz udziału ich masy w masie pozostałych korzeni. Z kolei wyniki uzyskane w drugim roku doświadczenia (po ponownym podcięciu korzeni w jednym z wariantów) wskazują na zahamowanie przyrostu na wysokość oraz masy części nadziemnej i systemu korzeniowego, a także zmniejszenie liczby sadzonek I klasy jakości w odniesieniu do wyników uzyskanych dla sadzonek, u których nie zastosowano zabiegu podcinania systemu korzeniowego lub u których zabieg podcinania korzeni wykonano jedynie w pierwszym roku wzrostu dębów. Odnotowano jednocześnie wzrost liczebności korzeni drobnych oraz wyższy stosunek masy korzeni do masy nadziemnej części roślin. Badania Kłoskowskiej (1995) dowodzą, że im intensywniejsze było podcinanie systemów korzeniowych (dwukrotny zabieg podcinania w okresie wzrostu siewek/sadzonek w szkółce), tym były one niższe, charakteryzowały się mniejszą średnicą na wysokości szyi korzeniowej, mniejszą masą części nadziemnej i korzeni, a także mniejszą liczbą sadzonek I klasy jakości. Autorka odnotowała jednocześnie większą liczebność korzeni drobnych oraz wyższy stosunek masy korzeni do masy części nadziemnej. W podsumowaniu wyników badań cytowana autorka stwierdza, iż sadzonki, których systemy korzeniowe podcięto dwukrotnie w cyklu produkcyjnym, były niższe o 37% względem sadzonek,

u których systemów korzeniowych nie podcinano, cieńsze o 19%, cechowały się one mniejszą o 55% masą części nadziemnej i o 23% w odniesieniu do korzeni. Liczebność korzeni drobnych sadzonek z podciętym systemem korzeniowym zwiększyła się natomiast o ponad 2000%, a masa korzeni drobnych o 80%, względem wariantu kontrolnego. Zdaniem Kłoskowskiej (1995), zabieg podcinania korzeni służy poprawie jakości sadzonek dębu, jeśli wyrazić go liczebnością korzeni drobnych oraz stosunkiem biomasy systemu korzeniowego i masy części nadziemnej.

Z kolei Buraczyk i Kapuścińska (2010) badali wpływ podcinania systemów korzeniowych jednorocznej sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na głębokości 5, 10, 15 i 20 cm. Korzenie sosen podcięto wiosną (w kwietniu), a sadzonki poddano szczegółowej analizie po upływie sezonu wegetacyjnego (w październiku). Najmniejszą przeżywalność sadzonek odnotowano dla roślin, których systemy korzeniowe podcięto na głębokości 5 cm (43,3%), największą zaś dla roślin, których systemy korzeniowe zostały podcięte na głębokości 20 cm (83,3%). Po upływie sezonu wegetacyjnego od wykonania zabiegu (sześć miesięcy) sadzonki różniły się istotnie wysokością: rośliny, których systemy korzeniowe zostały podcięte na głębokości 5 cm miały średnią wysokość wynoszącą 10,2 cm, na głębokości 10 cm – 11,6 cm, na głębokości 15 cm – 14,0 cm, a rośliny, których korzenie podcięto na głębokości 20 cm uzyskały średnią wysokość wynoszącą 14,7 cm. Im bardziej skrócono system korzeniowy, tym mniejszym przyrostem wysokości w okresie sezonu wegetacyjnego cechowały się sadzonki sosny: od 29,6% w przypadku roślin, których korzenie podcięto na głębokości 5 cm do 71,7% w przypadku roślin, których systemy korzeniowe podcięto na głębokości 20 cm. Przyrost grubości sadzonek na wysokości szyi korzeniowej po sześciu miesiącach od wykonania zabiegu był najniższy u roślin, których korzenie podcięto na głębokości 5 cm (75%), podczas gdy u roślin, których korzenie podcięto na głębokości 10 cm wynosił 139%, na głębokości 15 cm – 148%, a dla roślin, których korzenie przycięto na głębokości

20 cm – 145%. We wszystkich wariantach odnotowano wzrost liczby wierzchołków korzeniowych (ang. root tips) po wykonaniu zabiegu – u roślin, których korzenie podcięto na głębokości 5 cm liczba wierzchołków korzeniowych wzrosła 17-krotnie, w przypadku podcięcia korzeni na głębokości 10 i 15 cm – ośmiokrotnie, a na głębokości 20 cm – siedmiokrotnie. Omawiane badania wykazały negatywny wpływ silnego podcinania systemów korzeniowych sosny na jej późniejszy wzrost w warunkach szkółki leśnej. Takie skrócenie systemów korzeniowych wywierało wyraźniejszy wpływ na grubość sadzonek w szyi korzeniowej niż na ich wysokość. Zbyt silne podcięcie korzeni sosny skutkuje zatem mniejszą przeżywalnością siewek (sadzonek), wpływa także negatywnie na dynamikę wzrostu nadziemnej i podziemnej części rośliny.

Badania Buraczyka i in. (2011) dotyczące świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) H.Karst.) dowodzą, iż silne skrócenie korzeni szkieletowych dwuletnich sadzonek tego gatunku (do 5 cm) po pierwszym roku ich wzrostu pozytywnie wpływa na parametry biometryczne szkółkowanych sadzonek. Skrócenie korzeni szkieletowych skutkowało ograniczeniem przyrostu nadziemnej części sadzonek, natomiast systemy korzeniowe ulegały bardzo intensywnej regeneracji. Redukcja systemu korzeniowego do 5 cm nie wpłynęła negatywnie na przeżywalność sadzonek. Ponadto, w tym wariancie doświadczenia wykazano największą łączną długość korzeni oraz wierzchołków i rozgałęzień w relacji do parametrów uzyskanych u sadzonek, którym skrócono systemy korzeniowe do 10 i 15 cm. Rezultaty badań dowodzą zwiększenia proporcji części podziemnej do nadziemnej sadzonek, a zatem korzystne ukształtowanie stosunku S do R, a autorzy rekomendują skracanie korzeni szkieletowych sadzonek świerka do 5 cm w szkółkach gruntowych posiadających deszczownie i do 10 cm przed posadzeniem sadzonek świerka w uprawie.

Kasprzyk i Jastrzębowski (2016) przeprowadzili badania wpływu podcinania systemów korzeniowych oraz nawożenia azotowego na wysokości i średnice na wysokości szyi korzeniowej sadzonek buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.).

Zabieg podcinania korzeni na głębokości 12 cm wykonano w lutym, w rok po wysiewie nasion (maj). Autorzy wykazali istotny negatywny wpływ podcinania korzeni na oba analizowane parametry biometryczne dwuletnich sadzonek buka. W przypadku sadzonek z podciętym systemem korzeniowym zauważono pozytywny wpływ nawożenia azotowego na analizowane parametry biometryczne. Badania wykonane na tym samym materiale roślinnym przez Korzeniewicza i in. (2018) w warunkach uprawy leśnej, po roku od posadzenia sadzonek wskazują, iż zarówno podcinanie systemów korzeniowych, jak i nawożenie azotowe, wpływały istotnie na przeżywalność, wysokość oraz przyrost sadzonek buka. Choć najwyższe i najgrubsze były sadzonki z niepodcinanymi systemami korzeniowymi, to w uprawie charakteryzowały się one największą śmiertelnością.

Sposób produkcji sadzonek w szkółce może mieć istotny wpływ na ich wzrost w warunkach niedoboru wody. Zadworny i in. (2021) analizowali wzrost siewek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) powstałych z wykorzystaniem czterech metod produkcji: (1) wysiew żołądzi, (2) wysiew żołądzi, a następnie odcięcie pędu nadziemnego (odrośla), (3) wysiew żołądzi, a następnie podcięcie systemu korzeniowego na głębokości 15 cm, (4) sadzonki z produkcji kontenerowej. W eksperymencie zastosowano cztery poziomy nawodnienia: 25%, 50%, 75% i 100% dawki wody. Analizie poddano szereg parametrów morfologicznych, anatomicznych i biochemicznych korzeni dębów. Przeprowadzone badania wykazały, iż reakcja roślin powstałych z siewu oraz sadzonek kontenerowych na niedobór wody była podobna, różniła się zaś od reakcji roślin, u których odcięto część systemu korzeniowego lub które pozbawiono pędu nadziemnego. Analizowane warianty sadzonek nie różniły się udziałem biomasy podziemnej względem sumarycznej biomasy sadzonki (z wyjątkiem sadzonek powstałych z odrośli), odnotowano jednak wyraźne zmiany w udziale korzeni o odmiennych funkcjach (korzenie chłonne, korzenie strukturalne). Sadzonki powstałe z siewu oraz kontenerowe charakteryzowały się średnio

większą o 47% liczbą korzeni pionierskich przy 50% ograniczeniu dawki wody i o 33% przy redukcji dawki wody o 75%, podczas gdy sadzonki odroślowe i z podciętym systemem korzeniowym charakteryzowały się mniejszą produkcją korzeni pionierskich w warunkach stresu wodnego. Sadzonki dębu powstałe z siewu oraz pochodzące z produkcji kontenerowej lepiej znosiły warunki niedoboru wody niż sadzonki, które pozbawiono części nadziemnej (odrośla) lub którym podcięto systemy korzeniowe.

Z obserwacji Zadwornego i in. (2019b) wynika, że siewki dębu szypułkowego mogą wytwarzać korzeń palowy o długości ok. 1 m w pierwszym roku wzrostu. Autorzy wskazują, iż chociaż celem podcinania korzeni w produkcji szkółkarskiej jest wytworzenie dużej liczby korzeni drobnych, a system korzeniowy ma cechować się dużym zagęszczeniem tych korzeni, co z kolei ma sprzyjać poprawie jakości sadzonek przed ich wysadzeniem do uprawy, to jednak warto zastanowić się nad tym, jakie są długoterminowe konsekwencje tego zabiegu, szczególnie w sytuacji niesprzyjających roślinom warunków pogodowych czy też siedliskowych. Warto również wspomnieć, że dęby wytwarzają palowy system korzeniowy, który w okresie deficytu wody w wierzchnich warstwach gleby odgrywa kluczową rolę w zaopatrzeniu w nią rośliny. Uszkodzenie korzenia palowego dębów w wyniku czynników naturalnych czy też poprzez jego skrócenie podczas zabiegu podcinania korzeni w produkcji szkółkarskiej i brak możliwości jego odtworzenia, może być jedną z najważniejszych przyczyn osłabienia drzewostanów tego gatunku w okresie długotrwałych lub często powtarzających się susz, a nawet skutkować zamieraniem drzewostanów. Osłabienie drzew z kolei czyni je podatniejszymi na gradacje szkodliwych owadów czy też porażenie przez patogeny grzybowe. Badania Zadwornego i in. (2014), w których analizowano dęby w drzewostanach pochodzących z odnowienia naturalnego, sztucznego (sadzonki z podciętym systemem korzeniowym), a także powstałe z odrośli wykazały, iż mimo że długotrwałe susze osłabiały drzewa w każdym z nich, to jednak drzewa pochodzące z odnowienia naturalnego cechowały się najlepszą

kondycją i były lepiej zaopatrzone w wodę. Po odsłonięciu systemów korzeniowych drzew okazało się, że odcięte na etapie produkcji szkółkarskiej korzenie palowe dębów nie ulegają regeneracji, a są obecne u drzew powstałych z naturalnego odnowienia. Z dużym prawdopodobieństwem można zatem przyjąć, że skutki podcinania systemów korzeniowych dębów w szkółkach mogą być długoterminowe i widoczne szczególnie w okresach długotrwałych niedoborów wody. Podcinanie systemów korzeniowych dębów podczas produkcji sadzonek w szkółkach może być zatem jedną z ważniejszych przyczyn zamierania drzewostanów dębowych na skutek susz. Potwierdzają to przypuszczenie także rezultaty badań Zadwornego i in. (2019a), w wyniku których autorzy zalecają, by zwrócić szczególną uwagę na sposób odnowienia lasu (naturalne, sztuczne) i jego potencjalne długoterminowe znaczenie w kontekście globalnej zmiany klimatu i jej przewidywanych konsekwencji (Dyderski i in. 2018; Jagodziński i in. 2020; Jagodziński 2022, 2023, 2024; Puchałka i in. 2023).

Wyniki badań Muchy i in. (2018) pogłębiają z kolei naszą wiedzę o wpływie podcinania systemów korzeniowych dębów (*Quercus robur* L.), rosnących w różnych zagęszczeniach, na długoterminowy wzrost sadzonek tego gatunku (pięć lat). Nasiona dębów wysiane zostały do 120-litrowych beczek, a u części wyrosłych z nich siewek w drugim sezonie wegetacyjnym uprawy zastosowano zabieg podcinania systemów korzeniowych na głębokości 15 cm. Analizy materiału roślinnego wykonano po drugim, czwartym oraz piątym roku wzrostu dębów w warunkach kontrolowanych. Cytowani autorzy wykazali, iż na całkowitą suchą masę sadzonek dębu większy wpływ wywierało ich zagęszczenie aniżeli podcinanie systemów korzeniowych. U pięcioletnich dębów, u których na etapie siewek zastosowano zabieg podcięcia korzeni, wykazano niższy udział biomasy korzeni i wyższy udział biomasy łodygi (pędu głównego) w porównaniu do sadzonek z nieprzyciętym systemem korzeniowym. Skutki podcięcia systemu korzeniowego mogą zatem pojawić się po wielu latach od wykonania zabiegu, a szczególnie istotnym pytaniem jest, czy

podcinanie systemów korzeniowych dębów (i innych gatunków) w fazie produkcji szkółkarskiej nasila skutki stresu wodnego w warunkach długotrwałej suszy w starszych drzewostanach. Warto przy tym pamiętać, że maksymalna głębokość korzenienia się drzew determinowana jest często już w fazie siewki (Hoffmann, Lyr 1967; Lyr, Hoffmann 1967).

Pomimo tego, iż podcinanie systemów korzeniowych siewek (sadzonek) drzew w praktyce szkółkarskiej jest techniką powszechnie stosowaną, niewiele uwagi poświęcono wpływowi tego zabiegu na podatność sadzonek na patogeny. Interesujących danych na ten temat dostarczają badania Łakomego i in. (2019). W eksperymencie zastosowano cztery organizmy patogeniczne: *Phytophthora cactorum* i *Globisporangium intermedium* oraz *Fusarium oxysporum* i *Thanatephorus cucumeris*, powszechnie występujące w szkółkach leśnych, oraz jednoroczne sadzonki dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) z podciętymi na głębokość 10 cm systemami korzeniowymi i z korzeniami nieprzyciętymi (wariant kontrolny), rosnącymi w warunkach kontrolowanych. Przeprowadzone badania wykazały, że po roku od inokulacji istotnie zmniejszyła się biomasa korzeni bocznych, jednak w większym stopniu u sadzonek z nieprzycinanymi korzeniami, przy czym siła reakcji zależała od gatunku patogena (patogeny o różnej wirulencji). W reakcji na oddziaływanie patogenów, dęby z podciętymi korzeniami charakteryzowały się tendencją do osiągnięcia wyższej frakcji (udziału) suchej masy łodyg, ale niższej frakcji suchej masy liści. Ponadto, oddziaływanie patogenów wpływało redukująco na udział suchej masy liści w stosunku do suchej masy części podziemnej w większym stopniu u sadzonek z podciętym systemem korzeniowym, w porównaniu do sadzonek, gdzie tego zabiegu nie zastosowano. Wyniki cytowanych autorów wskazują zatem, że podcinanie korzeni dębów w trakcie produkcji szkółkarskiej może wzmacniać redukcję udziału masy liści w odniesieniu do biomasy korzeni wynikającą z porażenia sadzonek przez patogeny, co w konsekwencji może prowadzić do obniżenia jakości siewek (sadzonek).

Reakcja drzew na przycięcie (mechaniczne uszkodzenie) korzeni widoczna jest także u drzew w starszym wieku. Badania przeprowadzone w Instytucie Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, w 30-letnich drzewostanach sosnowych (*Pinus sylvestris* L.), wskazują na wyraźne różnice w biomasie i morfologii korzeni drobnych powstałych po mechanicznym ich uszkodzeniu względem korzeni rozwijających się w sposób naturalny. W eksperymencie analizowano korzenie wrastające do pułapek korzeniowych (ang. ingrowth core) wypełnionych przesianą glebą pozbawioną korzeni w ciągu roku od ich założenia (instalacja pułapek wiąże się z odcięciem korzeni na obwodzie pułapki w związku z zastosowaniem próbnika) i porównano z korzeniami, które wrosły do identycznych pułapek, ale zainstalowanych w glebie bez uszkadzania (odcinania) korzeni (zastosowano rozpychanie gleby próbnikiem o zaostrozonym końcu, korzenie na obwodzie powstałego otworu nie były mechanicznie odcinane). W wielu sytuacjach, gdzie po roku z gleby wyjęto korzenie przycięte, zaobserwowano rozwój licznych, nowych korzeni drobnych (Fot. 1, Fot. 2). Biomasa korzeni drobnych sosny (g m^{-2}), uzyskana z pułapek, podczas instalacji których uszkodzono korzenie, była o 44% wyższa w porównaniu do biomasy korzeni drobnych pobranych z pułapek, gdzie korzenie naturalnie występujące w glebie nie zostały mechanicznie przycięte. Ponadto sumaryczna długość korzeni drobnych (m m^{-2}) była o 37% wyższa, objętość korzeni drobnych ($\text{cm}^3 \text{m}^{-2}$) o 5%, liczba wierzchołków korzeni na jednostce powierzchni (szt. m^{-2}) o 46%, liczba wierzchołków korzeni w przeliczeniu na jednostkę suchej ich masy (szt. g^{-1}) o 26%, natomiast średnia średnica korzeni drobnych (mm) była niższa o 14% względem parametrów opisujących korzenie wyjęte z pułapek, gdzie na ich obwodzie podczas instalacji naturalnie rozwijające się w glebie korzenie nie zostały mechanicznie uszkodzone (przycięte). Z przedstawionych danych wynika, iż przycięcie korzeni u starszych drzew także powoduje ich zwiększony przyrost oraz liczne zmiany parametrów morfologicznych.



Fot 1. Rozwój korzeni drobnych po mechanicznym uszkodzeniu (przycięciu) korzeni sosny naturalnie rozwijających się w glebie.



Fot. 2. Rozwój korzeni drobnych po mechanicznym uszkodzeniu (przycięciu) korzeni sosny naturalnie rozwijających się w glebie.

Podsumowanie

Głównym celem produkcji szkółkarskiej jest wyhodowanie takich sadzonek, które będą w przyszłości tworzyły zdrowe drzewostany (Barzdajn, Urbański 1997). Produkcja materiału sadzeniowego w szkółkach wymaga gruntownej wiedzy o wymaganiach ekologicznych poszczególnych gatunków drzew i krzewów, a także znajomości najnowszych rozwiązań technologicznych (Dziemidek, Tarasiuk 2005; Szabla, Pabian 2009). Poza wysoką wartością genetyczną (pochodzenie nasion), sadzonki wykorzystywane do odnowienia lasu powinny cechować się dobrym stanem fizjologicznym (nawożenie, podlewanie), a także właściwymi parametrami morfologicznymi i dobrze rozwiniętym systemem korzeniowym zaopatrzonym w mykoryzy (Rudawska 2000; Rudawska, Leski 2009; Wesoły, Hauke 2009). Jak wynika z licznych badań, istotnym elementem adaptacji sadzonek do nowych warunków środowiska, szczególnie skrajnych, jest stosunek masy części nadziemnej do podziemnej. Zdaniem wielu autorów, stosunek biomasy części nadziemnej do podziemnej sadzonek drzew powinien wynosić co najmniej 1:1, a dobrze rozwinięty system korzeniowy sadzonek z odkrytym systemem korzeniowym uzyskuje się poprzez podcinanie korzeni w okresie produkcji (np. Faulkner 1953; Mullin 1966; Duryea 1984; Gorzelak, Łukaszewicz 1994; South, Blake 1994; South, Donald 2002; Grossnickle 2012). Podcinanie korzeni jest zabiegiem powszechnie stosowanym w produkcji szkółkarskiej, a jednym z jego celów jest ukształtowanie skupionego systemu korzeniowego o dużej liczbie korzeni drobnych. Po podcięciu korzenie pozostają w glebie i zachowują swoją pierwotną pozycję. Jakkolwiek zabieg ten ma wiele zalet, to jednak nie można zapominać o tym, iż może on nieść także konsekwencje długoterminowe o negatywnym charakterze, które ujawnić się mogą dopiero w warunkach ekstremalnych, np. w trakcie długotrwałych susz. Długoterminowa reakcja drzew na podcinanie korzeni przeprowadzone na etapie produkcji szkółkarskiej może być zróżnicowana i zależna od biologii i ekologii gatunku, a także warunków siedliskowych ich

wzrostu w drzewostanie. Analiza źródeł literatury wskazuje, iż wpływ podcinania korzeni drzew i krzewów w okresie produkcji szkółkarskiej na jakość produkowanego materiału sadzeniowego, a także konsekwencje tego zabiegu dla roślin po ich wysadzeniu w uprawach leśnych, są stosunkowo słabo poznane.

Literatura

- Aldhous J.R., Mason W.L. (eds.) 1994. Forest Nursery Practice. Forestry Commission Bulletin 111. HMSO, London.
- Barzdajn W. 2009. Sadzonki do zalesień. W: Wesoły W., Hauke M. (red.). Szkółkarstwo leśne od A do Z. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. Ss. 321-323.
- Barzdajn W., Ceitel J., Danielewicz W., Zientarski J. 1999. Leśnictwo proekologiczne. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- Barzdajn W., Urbański K. 1997. Znaczenie warunków ekologicznych w produkcji sadzonek drzew leśnych. Sylwan (141)4: 85-94.
- Benson A.R., Koeser A.K., Morgenroth J. 2019a. A test of tree protection zones: Responses of *Quercus virginiana* Mill trees to root severance treatments. Urban Forestry & Urban Greening 43: 54-63.
- Benson A.R., Morgenroth J. 2019. Root pruning negatively affects tree value: A comparison of tree appraisal methods. Urban Forestry & Urban Greening 43: 126376.
- Benson A.R., Morgenroth J., Koeser A.K. 2019b. The effects of root pruning on growth and physiology of two *Acer* species in New Zealand. Urban Forestry & Urban Greening 38: 64-73.
- Bernadzki E. 1993. Zwiększanie różnorodności biologicznej poprzez zabiegi hodowlano-leśne. Sylwan 137(3): 29-36.
- Bernadzki E. 2005. Poszukiwanie racjonalnych rozwiązań w hodowli lasu. Sylwan 149(12): 21-29.

- Bernadzki E. 2006. Postępy w zagospodarowaniu lasów. W: Bernadzki E. (red. nauk.). Z dziejów Lasów Państwowych i leśnictwa polskiego 1924-2004. Lata powojenne i współczesność. Tom 3(1). Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. Ss. 123-172.
- Bogdziewicz M., Wróbel A. 2012. Ekologiczne aspekty lat nasiennych u drzew. Kosmos – Problemy Nauk Biologicznych 61(297): 667-675.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science 63(6): 625-644.
- Brzeziecki B., Rostek K. 2021. Wyzwania dla hodowli lasu w warunkach dynamicznych zmian klimatu. W: Szabla K. (red.). Wyzwania dla gospodarki leśnej w warunkach globalnych zmian w środowisku. Polskie Towarzystwo Leśne, Katowice. Ss. 141-156.
- Buraczyk W., Drozdowski S., Szeligowski H., Gawron L., Karpiuk M. 2011. Wpływ skracania systemów korzeniowych dwuletnich sadzonek świerka pospolitego (*Picea abies* L. Karst.) na ich wzrost po posadzeniu. Sylwan 155(7): 482-492.
- Buraczyk W., Kapuścińska M. 2010. Effects of pruning of vertical roots on growth of one-year Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in the first year after transplanting. Folia Forestalia Polonica, ser. A Forestry 52(1): 26-32.
- Canham C.D., Kobe R.K., Latty E.F., Chazdon R.L. 1999. Interspecific and intraspecific variation in tree seedling survival: effects of allocation to roots versus carbohydrate reserves. Oecologia 121: 1-11.
- Costello L.R., Watson G., Smiley E.T. 2017. Best Management Practices: Root Management. International Society of Arboriculture, Champaign, Illinois, USA.
- Darby S.P. 1962. Intensified nursery practices – the key to high-quality, custom-grown field-graded forest tree seedlings. Tree Planters' Notes 52: 7-11.
- Davis A.S., Jacobs D.F. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. New Forests 30: 295-311.

- Duryea M.L. 1984. Nursery cultural practices: impacts on seedling quality. W: Duryea M.L., Landis T.D. (eds.). Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers. The Hague/Boston/Lancaster. Oregon State University, Corvallis. Ss. 143-164.
- Dyderski M.K., Paż S., Frelich L.E., Jagodziński A.M. 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24: 1150-1163.
- Dziemidek T., Tarasiuk S. 2005. Produkcja szkółkarska buka zwyczajnego *Fagus sylvatica* L. w szkółkach gruntowych północno-wschodniej Polski. *Sylvan* 149(1): 15-24.
- Eis S., Long J.R. 1973. Root pruning in the nursery. *Tree Planters' Notes* 24(1): 20-22.
- Faulkner R. 1953. Early observations on the root development of one-year-old Corsican pine seedlings following root pruning. *Scottish Forestry* 7: 23-26.
- Foster C.H. 1932. Improvements in planting stock production. *Journal of Forestry* 30: 797-799.
- Gingerich R.E., Hertel H.G. 1962. The effect of horizontal and vertical root pruning on 2-0 Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold). *Tree Planters' Notes* 52: 1-6.
- Główny Urząd Statystyczny. 2010. Leśnictwo. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny. 2013. Leśnictwo. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny. 2018. Rocznik Statystyczny Leśnictwa. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny. 2019. Rocznik Statystyczny Leśnictwa. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Główny Urząd Statystyczny. 2021. Rocznik Statystyczny Leśnictwa. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.

- Główny Urząd Statystyczny. 2023. Rocznik Statystyczny Leśnictwa. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa-Białystok.
- Goor A.Y., Barney C.W. 1968. Forest tree planting in arid zones. Ronald Press, New York.
- Gorzela A., Łukaszewicz J. 1994. Sadzonki do odnowień w różnych warunkach siedliskowym pożarzyska. Sylwan 138(6): 101-105.
- Grossnickle S.C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. New Forests 30: 273-294.
- Grossnickle S.C. 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. New Forests 43: 711-738.
- Grossnickle S.C., MacDonald J.E. 2018. Seedling quality: history, application and plant attributes. Forests 9: 283.
- Haase D.L. 2008. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. Tree Planters' Notes 52(2): 24-30.
- Hacket-Pain A., Bogdziewicz M. 2021. Climate change and plant reproduction: trends and drivers of mast seeding change. Philosophical Transactions of the Royal Society B 376: 20200379.
- Hauke M. 2009. Podcinanie korzeni. W: Wesoły W., Hauke M. (red.). Szkółkarstwo leśne od A do Z. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. Ss. 381-382.
- Hawley R.C., Smith D.M. 1954. The practice of silviculture. John Wiley and Sons, New York.
- Hobbs S.D., Stafford S.G., Slagle R.L. 1987. Undercutting conifer seedlings: effect on morphology and field performance on droughty sites. Canadian Journal of Forest Research 17(1): 40-46.
- Hoffmann G., Lyr H. 1967. Über die Wirkung der winterlichen Thermoperiode auf das Wurzel- und Sproßwachstum von *Pinus sylvestris* L. Flora 158(4): 373-383.
- Ilmurzyński E., Włoczewski T. 2003. Hodowla lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.

- Jagodziński A.M. 2022. Prognozowane problemy z utrzymaniem trwałości lasów wobec postępujących zmian klimatycznych. W: Szabla K. (red.). Leśnictwo przyszłości. Polskie Towarzystwo Leśne, Stare Jabłonki. Ss. 55-75.
- Jagodziński A.M. 2023. Różnorodność biologiczna ekosystemów leśnych a zmiany klimatyczne. W: Skrzecz I., Sikora K. (red.). Wpływ zmian klimatu na środowisko leśne. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary. Ss. 19-45.
- Jagodziński A.M. 2024. Konsekwencje rezygnacji z metod aktywnej ochrony i użytkowania gospodarczego lasów na dużych obszarach. W: Szabla K., Gil W. (red.). Aktualne dylematy rozwojowe polskiego leśnictwa. Polskie Towarzystwo Leśne, Nałęczów. Ss. 75-106.
- Jagodziński A.M., Ziemblińska K., Urbaniak M., Olejnik J. 2020. Wpływ gospodarki leśnej na sekwestrację węgla w ekosystemach leśnych. W: Olejnik J., Małek S. (red.). Rola lasu w pochłanianiu dwutlenku węgla z atmosfery. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Ss. 65-76.
- Jaworski A. 2011. Hodowla lasu. Tom I. Sposoby zagospodarowania, odnawianie lasu, przebudowa i przemiana drzewostanów. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Kasprzyk W., Jastrzębowski Sz. 2016. Wpływ podcinania korzeni i nawożenia na cechy biometryczne dwuletnich sadzonek buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.). Leśne Prace Badawcze 77(3): 256-260.
- Kłokowska A. 1995. Wpływ podcinania systemów korzeniowych na wzrost jedno- i dwuletnich siewek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) w szkółce leśnej. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, seria A 801-808: 59-76.
- Kłokowska A. 1996. Formowanie systemów korzeniowych sadzonek drzew leśnych. Biblioteczka leśniczego 67. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Kocjan H. 2011. Wybrane zagadnienia techniki hodowli lasu. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Korzeniewicz R., Multańska J., Kasprzyk W. 2018. Wpływ nawożenia azotowego i podcinania korzeni na wzrost i przeżywalność buka zwyczajnego

- (*Fagus sylvatica* L.) w uprawie. Acta Scientiarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria 17(3): 211-219.
- Łakomy P., Kuźmiński R., Mucha J., Zadworny M. 2019. Effects of oak root pruning in forest nurseries on potential pathogen infections. Forest Pathology 49(3): e12513.
- Larson M.M. 1975. Pruning northern red oak seedlings: effects on root regeneration and early growth. Canadian Journal of Forest Research 5(3): 381-386.
- Leibundgut H. 2009. Naturalne odnowienie lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Lyr H., Hoffmann G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. International Review of Forestry Research 2: 181-236.
- Mattsson A. 1997. Predicting field performance using quality assessment. New Forests 13: 227-252.
- Mohammed G.H., Binder W.D., Gillies S.L. 1995. Chlorophyll fluorescence: A review of its practical forestry applications and instrumentation. Scandinavian Journal of Forest Research 10(1-4): 383-410.
- Mucha J., Jagodziński A.M., Bułaj B., Łakomy P., Oleksyn J., Zadworny M. 2018. Functional response of *Quercus robur* L. to taproot pruning: a five-year case study. Annals of Forest Science 75(1): 22.
- Mullin R.E. 1966. Root pruning of nursery stock. Forestry Chronicle 7: 256-264.
- Puchałka R., Paż-Dyderska S., Jagodziński A.M., Sádlo J., Vítková M., Klisz M., Koniakin S., Prokopuk Y., Netsvetov M., Nicolescu V.-N., Zlatanov T., Mionskowski M., Dyderski M.K. 2023. Predicted range shifts of alien tree species in Europe. Agricultural and Forest Meteorology 341: 109650.
- Puchniarski T. 2012. Szkółki otwarte i podokapowe. Biblioteczka leśniczego 347. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Racey J.E., Racey G.D. 1988. Undercutting of root wrenching of tree seedlings: an annotated bibliography. Ontario Ministry of Natural Resources. Forest Research Report 121.

- Rook D.A. 1971. Effect of undercutting and wrenching on growth of *Pinus radiata* D. Don seedlings. Journal of Applied Ecology 8(2): 477-490.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 lutego 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakie powinien spełniać leśny materiał rozmnożeniowy. Dz.U. Nr 31 Poz. 272.
- Rudawska M. 2000. Rola ektomikoryz w biologicznej ochronie drzew leśnych przed patogenami glebowymi. Sylwan 144(4): 27-39.
- Rudawska M., Leski T. 2009. Znaczenie wiedzy o zbiorowiskach grzybów mikoryzowych w szkołkach leśnych dla rozwoju mikoryzacji sterowanej. Sylwan 153(1): 16-26.
- Rykowski K. 2006. O leśnictwie trwałym i zrównoważonym. W poszukiwaniu definicji i miar. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Schultz R.C., Thompson J.R. 1990. Nursery practices that improve hardwood seedling root morphology. Tree Planters' Notes 41(3): 21-32.
- Shoulders E. 1959. Root pruning boosts longleaf survival. Tree Planters' Notes 36: 15-19.
- South D.B., Blake J.I. 1994. Top-pruning increases survival of pine seedlings. Highlights of Agricultural Research 41(2): 9.
- South D.B., Donald D.G.M. 2002. Effect of nursery conditioning treatments and fall fertilization on survival and early growth of *Pinus taeda* seedlings in Alabama, U.S.A. Canadian Journal of Forest Research 32: 1171-1179.
- Stoeckeler J.H., Jones G.W. 1957. Forestry Nursery Practice in the Lake States. U.S. Department of Agriculture – Forest Service. Agriculture Handbook 110.
- Szabla K., Pabian R. 2009. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Wydanie II. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Szeligowski H. 2005. Potencjał wzrostowy korzeni sadzonek sosny zwyczajnej, świerka pospolitego i modrzewia europejskiego. Sylwan 149(10): 28-34.

- Szkamruk Z. 2013. Odnowienie naturalne. Biblioteczka leśniczego 361. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Szymański S. 2001. Ekologiczne podstawy hodowli lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Tarasiuk S. 1993. Określanie jakości sadzonek za pomocą potencjału wzrostowego korzeni. *Sylvan* 137(11): 63-67.
- Toumey J.W., Korstian C.F. 1942. Seeding and planting in the practice of forestry. John Wiley and Sons, New York.
- Urbański K. 1998. Ekologiczne czynniki produkcji sadzonek w szkółkach leśnych. Biblioteczka leśniczego 89. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Watson G., Hewitt A. 2020. Changes in tree root architecture resulting from field nursery production practices. *Journal of Environmental Horticulture* 38(1): 22-28.
- Watson G.W., Sydnor T.D. 1987. The effect of root pruning on the root system of nursery trees. *Journal of Arboriculture* 13(5): 126-130.
- Wesoły W. 1997. Praktyczna ocena żywotności sadzonek w warunkach odnowienia zgodnego z zasadami ekologii. *Sylvan* 141(4): 145-152.
- Wesoły W., Hauke M. (red.) 2009. Szkółkarstwo leśne od A do Z. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Wesoły W., Kowalkowski W., Piórkowski M. 2009. Szkółkowanie. W: Wesoły W., Hauke M. (red.). *Szkółkarstwo leśne od A do Z*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. Ss. 376-381.
- Wesoły W., Pukacki P.M., Naparty E. 1998. Zastosowanie metod biofizycznych do oceny żywotności sadzonek sosny, świerka i modrzewia. *Sylvan* 142(8): 55-64.
- White J.J. 1990. Nursery stock root systems and tree establishment – a literature review. Forestry Commission Occasional Paper 20. Forestry Commission, Edinburgh.
- Zadworny M., Jagodziński A.M., Łakomy P., Mucha J., Oleksyn J., Rodríguez-Calcerrada J., Ufnalski K. 2019a. Regeneration origin affects radial growth

- patterns preceding oak decline and death – insights from tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Agricultural and Forest Meteorology* 278: 107685.
- Zadworny M., Jagodziński A.M., Łakomy P., Ufnalski K., Oleksyn J. 2014. The silent shareholder in deterioration of oak growth: common planting practices affect the long-term response of oaks to periodic drought. *Forest Ecology and Management* 318: 133-141.
- Zadworny M., Mucha J., Jagodziński A.M. 2019b. Praktyka szkółkarska a rozwój systemu korzeniowego dębów. *Las Polski* 24: 12-13.
- Zadworny M., Mucha J., Jagodziński A.M., Kościelniak P., Łakomy P., Modrzejewski M., Ufnalski K., Żytkowiak R., Comas L.H., Rodríguez-Calcerada J. 2021. Seedling regeneration techniques affect root systems and the response of *Quercus robur* seedlings to water shortages. *Forest Ecology and Management* 479: 118552.
- Zajączkowski G., Jabłoński M., Jabłoński T., Sikora K., Kowalska A., Małachowska J., Piwnicki J. 2022. Raport o stanie lasów w Polsce 2021. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Zajączkowski G., Jabłoński M., Jabłoński T., Szmidla H., Kowalska A., Małachowska J., Piwnicki J., Kaliszewski A. 2023. Raport o stanie lasów w Polsce 2022. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Zasady hodowli lasu. 2023. Załącznik nr 1 do Zarządzenia Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych nr 108 z 5 grudnia 2023 r. Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, Warszawa.

Piotr Robakowski,

Wojciech Kowalkowski, Władysław Barzdajn

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny i Technologii Drewna,
Katedra Hodowli Lasu

Tomasz Wyka

Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Biologii,
Zakład Botaniki Ogólnej

Artur Jankowski

Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Biologii,
Zakład Botaniki Ogólnej, Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, Kórnik

Emilia Pers-Kamczyc

Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, Kórnik

Barbara Politycka

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ogrodnictwa i Architektury
Krajobrazu, Katedra Fizjologii Roślin

Wzrostowa i fizjologiczna reakcja drzew na regulowany deficyt wodny w szkółkach leśnych

Streszczenie

Zbadano reakcję siewek buka zwyczajnego, dębu bezszypułkowego, jodły pospolitej i sosny zwyczajnej na zróżnicowany poziom nawadniania w szkółce kon-
tenerowej i otwartej. Wyniki wskazują, że reakcja siewek zależy od gatunku i za-
stosowanej dawki polewowej. Gatunki iglaste były mniej wrażliwe na zmianę

poziomu nawadniania w porównaniu do liściastych. Sosna i buk wykazały dużą plastyczność morfologiczną i fizjologiczną w reakcji na różne warianty nawadniania. Buk był bardziej wrażliwy na zmianę poziomu nawadniania w porównaniu do dębu. Spośród zbadanych gatunków iglastych, sosna była bardziej plastyczna i wyraźnie zareagowała na redukcję nawadniania zmniejszeniem wzrostu, alokacją biomasy do korzeni oraz niższym natężeniem fotosyntezy. Poznanie wymagań wilgotnościowych drzew w młodocianej fazie rozwoju w warunkach regulowanego deficytu wodnego przyczyni się do wydajniejszego gospodarowania wodą bez obniżenia liczby i jakości sadzonek produkowanych w szkółkach.

Wstęp

Globalne zmiany klimatyczne w krótkiej perspektywie będą wiązały się ze wzrostem średniej rocznej temperatury globu o około 1,2 do 1,5°C oraz z redukcją sumy rocznych opadów i dostępności wody (IPCC 2022). W Polsce spodziewamy się większej częstotliwości i dłuższego trwania okresów suszy, co będzie miało negatywny wpływ na funkcjonowanie ekosystemów leśnych, a w szczególności dynamikę wzrostu i kondycję drzew (Chmura et al. 2010; Kędziora et al. 2014). Susza bezpośrednio powoduje obniżenie poziomu asymilacji CO₂, redukcję tempa wzrostu, zwiększenie natężenia oddychania, a tym samym obniżenie produkcji drewna. Pośrednio susza przyczynia się do obniżenia kondycji drzew i zwiększenia ich podatności na atak patogenicznych grzybów lub szkodników owadzych. Drzewostany osłabione przez zespół czynników stresowych łatwiej padają ofiarą huraganów lub pożarów.

Woda jest mniej dostępna do spożycia, do celów przemysłowych i gospodarczych, a zapotrzebowanie na nią stale rośnie, co przyczynia się do ciągłego podnoszenia jej ceny. Deficyt i koszty wody są szczególnie dotkliwie odczuwalne w szkółkarstwie. Przy masowej produkcji sadzonek i jednocześnie redukcji opadów rośnie zapotrzebowanie na wodę do nawadniania. Regulowany deficyt wodny polegający na zmniejszeniu poziomu nawadniania lub na okresowym

jego zaprzestaniu może przynieść oszczędności w zużyciu wody bez hamowania rozwoju, obniżenia jakości i fizjologicznej kondycji siewek (Koniarski, Matysiak 2015). Do ustalenia optymalnych dawek polewowych konieczne jest lepsze poznanie wzrostowej i fizjologicznej reakcji gatunków drzew na zróżnicowane nawadnianie, zarówno w szkółce kontenerowej, jak i w szkółce otwartej.

Dotychczasowa wiedza o wodnych wymaganiach drzew opiera się przede wszystkim na korelacjach ich zasięgów geograficznych z sumą rocznych opadów, częstotliwością i okresem trwania suszy w powiązaniu z temperaturą powietrza. Brakuje danych empirycznych dotyczących ekofizjologicznej tolerancji drzew eksponowanych na suszę w juvenilnym stadium rozwoju, dlatego nasze badania dotyczą sadzonek ważnych gospodarczo gatunków: buka zwyczajnego, dębu bezszypułkowego, jodły pospolitej i sosny zwyczajnej. Przyjęto następujące hipotezy: (1) gatunki iglaste będą miały mniejsze wymagania wodne niż gatunki liściaste. Sosna zwyczajna będzie bardziej tolerancyjna na obniżenie dawek polewowych niż jodła pospolita, a dąb bezszypułkowy bardziej niż buk zwyczajny; (2) redukcja wysokości i grubości sadzonek przy obniżonych dawkach nawadniania będzie zależała od gatunku i wielkości dawki wody; (3) w warunkach deficytu wodnego nastąpi alokacja biomasy do korzeni kosztem części nadziemnej sadzonek. Gatunki o większej wrażliwości na deficyt wodny lub bardziej plastyczne zareagują poprzez istotne podwyższenie stosunku masy korzeni do masy całej sadzonki; (4) siewki gatunków wrażliwych na obniżone dawki nawadniania będą charakteryzowały się niższym poziomem maksymalnego potencjału wodnego liści i obniżoną asymilacją CO₂.

Teren badań

Badania przeprowadzono w Nadleśnictwie Babimost, w Zielonogórskiej Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych. Doświadczenia założono w Rogozińcu, w szkółce otwartej i w module kontenerowym (N 52° 18'; E 15° 46'). Kontenery znajdowały się w nieogrzewanym tunelu foliowym o wymiarach 50 × 8 m.

Szkółka położona jest w miejscu otwartym. Średnia roczna temperatura w szkółce wynosi około 8,5°C, suma rocznych opadów 526 mm i jest niższa od średniej krajowej. W okresie około 90 dni występują tutaj przymrozki. Długość okresu wegetacyjnego wynosi przeciętnie 225 dni. W okresie doświadczenia, w tunelu foliowym średnia temperatura od czerwca do sierpnia wynosiła 23,4°C, temperatura maksymalna osiągnęła chwilowo w lipcu aż 42,5°C, minimalna 7,1°C, a wilgotność względna powietrza wahała się przeciętnie od 60 do 65%.

Materiał i metody

Materiał

Do badań wybrano cztery gatunki drzew: sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.), jodłę pospolitą (*Abies alba* Mill.), dęba bezszypułkowego (*Quercus petraea* L.) i buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) ze względu na ich duże znaczenie gospodarcze oraz kontrastowe wymagania wilgotnościowe. Na podstawie dotychczasowej wiedzy testowane gatunki można uszeregować od najmniej do najbardziej wymagającego względem wody: sosna zwyczajna, jodła pospolita, dąb bezszypułkowy i buk zwyczajny.

Nasiona wszystkich badanych gatunków z wyjątkiem jodły, która pochodziła z Sudetów, były miejscowej proveniencji. Nasiona wysiano do styropianowych kontenerów umieszczonych w tunelu foliowym oraz do gruntu w szkółce otwartej. Kiełkowanie nasion jodły było nierównomierne, zarówno w kontenerach, jak i w gruncie. Ze względu na niewielką udatność wschodów w szkółce otwartej obserwacje siewek jodłowych były prowadzone tylko w szkółce kontenerowej.

Metody

Układ doświadczenia

Zarówno w szkółce otwartej, jak i kontenerowej sadzonki 4 badanych gatunków rosły w 4 blokach (16 obiektów). Po skiełkowaniu nasion, w każdym bloku ustalono 4 warianty nawadniania. W szkółce kontenerowej: 0,8, 1,6, 2,4, 3,2 mm, a w szkółce otwartej: 3,0, 6,0, 9,0 i 12,0 mm. Dawki nawadniania przyjęto na podstawie instrukcji Pierzgałskiego et al. (2002) i wieloletniego doświadczenia leśniczego szkółkarza. Podział doświadczenia na cztery poziomy nawodnienia dla czterech gatunków to 16 obiektów. Szesnaście obiektów w czterech powtórzeniach to 64 jednostki eksperymentalne. Z uwagi na prowadzenie doświadczenia w dwóch rodzajach szkółek, ostatecznie badano 128 jednostek eksperymentalnych.

Zawartość wody w glebie i status wodny sadzonek

Warunki wodne w substracie, w kontenerach oraz w glebie szkółki otwartej zmierzono metodą wagową (grawimetryczną) oraz na podstawie pomiarów przenikalności elektrycznej (Klamkowski, Treder 2010). Status wodny badanych sadzonek określono dwiema metodami: (1) zawartość wody w liściach (szkółka kontenerowa) określana wagowo i (2) pomiar potencjału wodnego liści przy pomocy tzw. „bomby Scholandra”.

Pomiary parametrów wzrostu i alokacji biomasy

Pod koniec okresu doświadczenia zmierzono wysokość i grubość sadzonek w szyi korzeniowej. Część materiału roślinnego wyjęto z kontenerów, umyto korzenie i podzielono siewki na organy. Zważono świeżą i suchą masę korzeni, liści i pędów, a następnie po wysuszeniu w temperaturze 65°C przez 14 dni ich suchą masę. Obliczono zawartość wody w poszczególnych organach siewek

oraz alokację biomasy do korzeni, pędów i liści, odpowiednio stosunek suchej masy korzeni, pędów i liści do całkowitej masy sadzonki.

Wymiana gazowa liści

W doświadczeniu w szkółce otwartej wykonano pomiary wymiany gazowej liści przy pomocy analizatora LiCor 6400XT (LiCor Inc., Nebraska, USA). Sadzonki ze szkółki były wyjmowane z bryłką korzeniową i przenoszone w doniczkach do laboratorium. W komorze pomiarowej strumień powietrza wynosił $500 \mu\text{mol mol}^{-1}$, koncentracja CO_2 $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, poziom światła czynnego w fotosyntezie $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a temperatura w pobliżu liścia wynosiła 25°C . Stabilizacja warunków klimatycznych po umieszczeniu w komorze liścia lub pędu trwała od 25 do 30 minut. Asymilację netto CO_2 (A_{max}), przewodność aparatów szparkowych (g_s), zawartość CO_2 w liściu oraz wydajność zużycia wody w fotosyntezie (A_{max}/T_r ; T_r – transpiracja) porównano między gatunkami i w ramach gatunku między wariantami nawadniania.

Wyniki

Szkółka kontenerowa

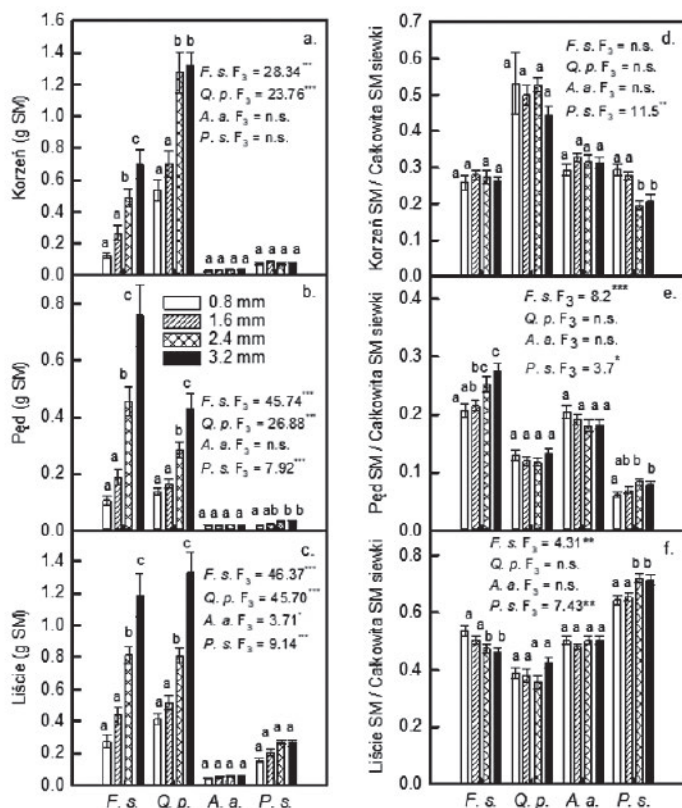
Parametry wzrostowe i alokacja biomasy

Sadzonki buka pozytywnie zareagowały na wyższe dawki nawadniania, osiągając większą wysokość i grubość w wariantach 2,4 i 3,2 mm przy jednocześnie wyższym stopniu smukłości w porównaniu do wariantów z niższym poziomem nawadniania (Tabela 1). Podobny był wpływ zróżnicowanych dawek podlewania na wzrost i stopień smukłości sadzonek dębowych. W przypadku tegorocznych sadzonek jodły nie zaobserwowano istotnych różnic między wariantami podlewania, natomiast sadzonki sosny zareagowały większymi przyrostami przy podwyższonych dawkach wody.

Gatunek	Wariant nawadniania (mm)	h (mm)	d (mm)	h/d
<i>Fagus sylvatica</i>	0,8	104±5a	1.88±0.08a	57±2a
	1,6	124±5a	2.13±0.09a	59±2ab
	2,4	185±7b	2.77±0.08b	68±3c
	3,2	225±11c	3.37±0.11c	67±3bc
<i>F</i>		65.1***	55.9***	6.0**
<i>Quercus petraea</i>	0,8	82±3a	1.90±0.07a	44±2a
	1,6	94±3a	1.97±0.06a	48±2ab
	2,4	117±7b	2.48±0.08b	48±3ab
	3,2	148±8c	2.78±0.08c	54±3b
<i>F</i>		24.6***	35.8***	3.2*
<i>Abies alba</i>	0,8	35±1a	1.00±0.03a	36±1a
	1,6	37±1a	1.05±0.03a	36±1a
	2,4	38±1a	1.03±0.03a	38±1a
	3,2	38±1a	1.00±0.02a	38±1a
<i>F</i>		n.s.	n.s.	n.s.
<i>Pinus sylvestris</i>	0,8	35±1a	1.01±0.03a	35±1a
	1,6	39±1a	1.06±0.03a	37±1ab
	2,4	48±1b	1.17±0.04b	43±1b
	3,2	51±2b	1.18±0.04b	45±2b
<i>F</i>		33.1***	6.4***	11.9***

Tabela 1. Wysokość (h), średnica w szyi korzeniowej (d) i stosunek h/d sadzonek *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Abies alba* i *Pinus sylvestris* rosnących w jednym z czterech wariantów nawadniania (0,8, 1,6, 2,4, 3,2 mm). Analizę wariancji przeprowadzono dla każdego gatunku oddzielnie. Te same litery oznaczają brak istotnych różnic między wariantami podlewania według testu Tukey'a na poziomie istotności $\alpha = 0.05$ (średnia±błąd standardowy, n = 40). F – wartość funkcji Snedecore'a, P – prawdopodobieństwo, * $0.01 \leq P < 0.05$, ** $0.001 \leq P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

Sucha masa korzeni, pędu głównego i liści badanych gatunków liściastych była większa w wariantach z większymi dawkami wody (Ryc. 1a, b, c). Spośród gatunków iglastych tylko sadzonki sosnowe wykazały istotnie większą masę pędu w wariantach 2,4 i 3,2 mm, chociaż zaobserwowano także statystycznie nieistotny



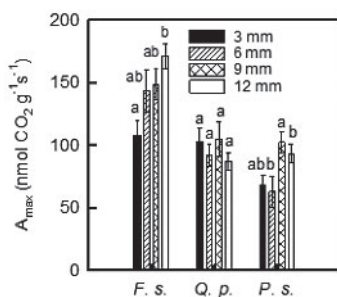
Ryc. 1. Sucha masa organów a. korzeni, b. pędu głównego, c. liści oraz alokacja masy do poszczególnych organów (d, e, f) sadzonek badanych gatunków w zależności od wariantu nawadniania. Na rycinie podano wyniki analizy wariancji. Te same litery oznaczają brak istotnych różnic między średnimi według testu Tukey'a na poziomie istotności $\alpha = 0.05$. Pozostałe objaśnienia patrz Tabela 1.

wzrost suchej masy igieł sosny wraz ze wzrostem poziomu podlewania. Udział korzenia w suchej masie sadzonki był większy w wariantach z niższymi dawkami wody, co świadczy o wysokiej plastyczności morfologicznej tego gatunku. Podobną tendencję zaobserwowano dla sadzonek dębu bezszypułkowego, jednak nie była ona statystycznie istotna (Ryc. 1d). Alokacja do pędu była większa w sadzonkach bukowych i sosnowych przy wyższym poziomie nawadniania (Ryc. 1e).

Alokacja do liści malała w sadzonkach buka i rosła w przypadku sosny (Ryc. 1f). Tegoroczne siewki jodły nie zareagowały zmianą wartości cech wzrostowych i alokacją biomasy na zróżnicowanie nawadniania.

Szkółka otwarta

Parametry wzrostu i alokacja biomasy sadzonek buka, dębu i sosny zmieniały się w zależności od intensywności nawadniania podobnie jak w szkółce kontenerowej. Natężenie asymilacji netto w przeliczeniu na suchą masę igieł ($A_{\max}$) zależało od poziomu nawadniania w przypadku buka i sosny (Ryc. 2). Wpływ zwiększenia dawki wody był korzystny. Sadzonki buka zwiększały $A_{\max}$ o 1/3 przy jednoczesnym czterokrotnym zwiększeniu intensywności nawadniania, sadzonki sosny wykazały istotnie wyższe natężenie $A_{\max}$ w wariancie 9 mm.



Ryc. 2. Asymilacja netto CO_2 ($A_{\max}$) w przeliczeniu na g suchej masy liści sadzonek *Fagus sylvatica* (F. s.), *Quercus petraea* (Q. p.) i *Pinus sylvestris* (P. s.) (średnia $\pm$ błąd stand.) przystosowanych do jednego z czterech wariantów nawadniania. Pozostałe objaśnienia patrz Ryc. 1.

Podsumowanie i wnioski

W tunelu foliowym reakcja sadzonek na różne warianty podlewania była wyraźniejsza w porównaniu do sadzonek tych samych gatunków rosnących w warunkach szkółki otwartej. Brak istotnych różnic między wariantami podlewania 75 i 100% wskazuje na możliwość stosowania niższych o 25% dawek wody

w porównaniu do maksymalnej. Obniżenie dawek wody istotnie zmniejszyło grubość i wysokość sadzonek buka, dębu i sosny, jednak tegoroczne siewki jodły nie zareagowały zmianą tempa wzrostu lub alokacją biomasy na warianty nawadniania. W pierwszym sezonie wzrostu siewki jodły rosły krótko, dlatego ich zapotrzebowanie na wodę i substancje odżywcze jest niewielkie. Sucha masa poszczególnych organów sadzonek była pozytywnie skorelowana z nawadnianiem, jednak większą plastycznością alokacji biomasy charakteryzowały się sadzonki buka i sosny w porównaniu do jodły i dębu bezszypułkowego. Ograniczenie podlewania prowadzi do wyprodukowania mniejszych sadzonek, które nie są jakościowo gorsze w porównaniu do większych wyhodowanych w warunkach intensywnego nawadniania. Ze względu na dobrze rozwinięty system korzeniowy mogą one łatwiej adaptować się po przesadzeniu ze szkółki do warunków uprawy i są bardziej przydatne na siedliskach z niedoborem wody (Sánchez-Blanco et al. 2004; Mushtaq i Moghaddasi 2011).

Buk zwyczajny i sosna zwyczajna silniej zareagowały na obniżone dawki podlewania niż dąb i jodła. Spośród gatunków liściastych bardziej wrażliwy na zmniejszone nawadnianie był buk zwyczajny niż dąb bezszypułkowy. Sosna wykazała większą plastyczność morfologiczną w reakcji na obniżony poziom podlewania. Natężenie asymilacji CO_2 sadzonek buka i sosny w szkółce otwartej było niższe w wariantach ze zredukowanym poziomem nawadniania. Było to spowodowane zamykaniem aparatów szparkowych, które doprowadziło do zmniejszenia ich przewodności. Regulacja szparkowa jest mechanizmem obronnym roślin w warunkach umiarkowanej suszy powodującym redukcję transpiracji kosztem asymilacji CO_2 (Chaves et al. 2002). Przy silnej suszy rosną opory dyfuzyjne wewnątrz liścia i następuje obniżenie wydajności procesów biochemicznych, co sprzyja gromadzeniu się CO_2 w jego wnętrzu przy jednocześnie malejącej fotosyntezie (Lawlor and Cornic 2002). Początkowo deficyt wodny powoduje hamowanie wzrostu, a następnie obniżenie natężenia asymilacji CO_2 spowodowane zamykaniem aparatów szparkowych, obni-

żaniem wydajności fotochemicznej fotosyntezy i hamowaniem tego procesu na poziomie biochemicznym. W warunkach naszego doświadczenia w tunelu foliowym z sadzonkami kontenerowymi wystąpił dodatkowy stres, który spoutęgował oddziaływanie suszy. Na liściach buka zaobserwowano przebarwienia i w końcu nekrozy spowodowane oddziaływaniem wysokiej temperatury, która w lipcu w godzinach od 14:00 do 17:00 przekraczała chwilowo 42°C. Przy tak wysokiej temperaturze powietrza nawet sadzonki intensywnie podlewane ulegają uszkodzeniu. Synergiczne oddziaływanie stresu suszy i wysokiej temperatury w tunelu foliowym było szczególnie niebezpieczne dla gatunków cienioznośnych.

Podsumowanie:

1. Buk i sosna silniej zareagowały na obniżone dawki nawadniania niż dąb i jodła.
2. Spośród gatunków liściastych bardziej wrażliwy na zmniejszone nawadnianie był buk zwyczajny niż dąb bezszypułkowy. Sosna zwyczajna wykazała większą plastyczność w reakcji na obniżony poziom nawadniania.
3. W szkółce kontenerowej w tunelu foliowym reakcja siewek na różne warianty nawadniania była wyraźniejsza w porównaniu do siewek tych samych gatunków rosnących w warunkach szkółki otwartej.
4. Brak istotnych różnic między wariantami nawadniania 50, 75 i 100% wskazuje na możliwość stosowania niższych dawek polewowych, zarówno w szkółce kontenerowej, jak i otwartej. Mniejsze sadzonki z relatywnie dużym systemem korzeniowym mogą być przydatne na siedliskach z niedoborem wody, a jednocześnie nie muszą być jakościowo gorsze.
5. Regulowany deficyt wodny może być wykorzystany w szkółkarstwie leśnym do oszczędzania wody i produkcji sadzonek o rozbudowanym systemie korzeniowym. W odniesieniu do każdego gatunku konieczne są badania w ściśle określonych warunkach glebowych i klimatycznych, aby

osiągnąć kompromis między intensywnością nawadniania, żywotnością i jakością sadzonek, celami produkcji, wymaganiami gatunku oraz zmiennością wewnątrzgatunkową.

Bibliografia

- Chaves M.M., Pereira J.S., Maroco J., Rodrigues M.L., Ricardo C.P.P., Osorio M.L. 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89(7):907-916. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>.
- Chmura J.D., Howe G.T., Anderson P.D., StClair J.B. 2010. Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych. *Sylwan* 154(9): 587-602.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Kędziora A., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczak P., Kundzewicz Z.W., Miler A.T., Pierzgałski E., Tokarczyk T. 2014. Zagrożenia związane z niedoborem wody. *Nauka* 1: 149-172.
- Klamkowski K., Treder W. 2010. Metody pomiaru wilgotności gleby. *Hasło Ogrodnicze* 6:12-16. <http://www.nawadnianie.inhort.pl/add/article/metody%20pomiaru.pdf>.
- Koniarski M., Matysiak B. 2015. Zastosowanie regulowanego deficytu nawadniania (RDI) w pojemnikowej uprawie krzewów ozdobnych. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* 2/1: 197-208.

- Lawlor D.W., Cornic G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment* 25: 275-294.
- Mushtaq S., Moghaddasi M. 2011. Evaluating the potentials of deficit irrigation as an adaptive response to climate change and environmental demand. *Environmental Science and Policy* 14: 1139-1150.
- Pierzgalski E., Tyszka J., Boczoń J., Wiśniewski J., Jeznach J., Żakowicz S. Wytyczne Nawadniania Szkółek Leśnych na Powierzchniach Otwartych. CILP: Warszawa, 2002; s. 5-63.
- Sánchez-Blanco J., Ferrández T., Navarro A., Bañon S., Alarcón J.J. 2004. Effects of irrigation and air humidity preconditioning on water relations, growth and survival of *Rosmarinus officinalis* plants during and after transplanting. *Journal of Plant Physiology* 161: 1133-1142.

**Wojciech Kowalkowski, Władysław Barzdajn,
Maria Hauke, Robert Korzeniewicz**

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny i Technologii Drewna,
Katedra Hodowli Lasu

Marcin Zadworny

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny i Technologii Drewna,
Katedra Hodowli Lasu

Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, Kórnik

Sadzonki z odkrytym czy zakrytym systemem korzeniowym – dylemat wyboru

Wstęp

Termin, a tym bardziej rodzaj stosowanych podczas zakładania upraw leśnych sadzonek, żywo interesował leśników i właścicieli lasów już od początków wprowadzania sztucznego odnawiania zrębów. Uprawy sosny, ale i innych gatunków drzew, początkowo odnawiano siewem bezpośrednim nasion do gruntu (Burckhardt 1870), z czasem jednak coraz powszechniejsze w użyciu stało się sadzenie. Wykorzystywano wówczas sadzonki z bryłką korzeniową, pozyskane zarówno z samosiewów, jak i z zasiewów. Rodzaj materiału narzucał wiosnę jako dominującą porę sadzenia (marzec do połowy maja), odrzucając inne okresy

jako nieodpowiednie z różnych i pozbawionych naukowych podstaw powodów. Przyjęta praktyka znalazła swoje odzwierciedlenie w ówczesnej literaturze fachowej. Podręczniki Sokołowskiego (1921), Włoczewskiego i Ilmurzyńskiego (1957), Tyszkiewicza i Obmińskiego (1963) i Ilmurzyńskiego (1969) zgodnie wskazują na wczesną wiosnę jako najlepszą porę sadzenia jednolatek sosnowych. Wynikające nieraz z konieczności, letnie terminy sadzenia, prowadziły jednak do podobnych, bądź wręcz lepszych udatności i bardzo dobrej kondycji samej uprawy. Dopiero w podręcznikach Tyszkiewicza i Obmińskiego (1963) oraz Ilmurzyńskiego (1969) pojawiają się pierwsze, nieśmiało i ostrożne wzmianki o możliwości letniego sadzenia sosny, choć autorzy zachowują duży dystans do proponowanego rozwiązania. Zupełnie odmienne podejście było wyrażane w literaturze niemieckiej, podkreślającej zalety letniego terminu sadzenia wobec trudnego oraz zawodnego, ze względu na warunki pogodowe, sadzenia w kwietniu. Zwłaszcza na terenach górskich przesunięcie terminu sadzenia było wręcz koniecznością. Przy niekorzystnym układzie warunków pogodowych zalecano zatem wysadzanie świerka, daglezi i sosny w okresie od sierpnia do połowy października, a więc poza okresem wiosennym (Volná 1975; Gunia, Sobczak 1981; Fonder, Berft 1998; Banach 1999; Gunia 1999). Starano się również znaleźć rozwiązania optymalizujące i zwiększające udatność upraw w tym terminie, zdając sobie sprawę z zagrożeń wynikających z późniejszego terminu sadzenia. Coraz powszechniej zaczęto zatem wykorzystywać sadzonki produkowane w szkółkach kontenerowych z zakrytym systemem korzeniowym, jako alternatywę dla sadzonek nagokorzeniowych. Wśród szeregu zalet sadzonek kontenerowych, do najważniejszych zaliczono: 1) zwiększenie udatności upraw- a więc zmniejszenie kosztów poprawek; 2) szybsze dochodzenie upraw do zwarcia; 3) zwiększenie efektywności pracy- rezygnację z uprzątania zrębów, przygotowania gleby; 4) wzrost ogólnej kondycji materiału sadzeniowego- zmniejszenie zagrożeń wynikających z przesuszenia systemu korzeniowego podczas przechowywania i transportu; 5) a przede wszystkim wydłużenie czasu sadzenia.

Sadzonki z bryłką nie są jednak pozbawione wad. Produkcja w pojemnikach trwale deformuje architekturę systemów korzeniowych, przybierających kształt pojemników nie tylko w okresie produkcji, ale już po wysadzeniu na uprawie. Problemem, z którym zmagają się szkółkarze i leśnicy jest zatem nadanie odpowiedniego kształtu pojemnikom. Równie istotne jest właściwe dobranie zabiegów stosowanych podczas produkcji szkółkarskiej, umożliwiających swobodny wzrost korzeni w warunkach uprawy leśnej i uformowanie systemu korzeniowego, najbardziej zbliżonego w strukturze i funkcji do „naturalnego wzorca” występującego u drzew pochodzących z siewu bezpośredniego nasion do gruntu (Lokvenc 1985; Gorzelak 1998; Zadworny i in. 2021).

Zarówno dane literaturowe oraz obserwacje płynące z praktyki leśnej potwierdzają nie tylko możliwość stosowania zarówno sadzonek z bryłką oraz z nagim korzeniem, możliwość stosowania różnych terminów sadzenia, ale przede wszystkim wskazują na konieczność wykonania w szerokim zakresie kompleksowych badań porównawczych. Dotychczasowe dane, z wielu przyczyn, nie mogą bowiem stanowić podstawy podejmowania praktycznych decyzji na szeroką skalę. Kluczowe znaczenie dla praktyki leśnej miałyby zatem opracowanie rozwiązań, umożliwiających sadzenie jednolatek sosnowych nie tylko podczas przedwiosnia i wiosny. Podobne założenia należy przyjąć wobec sadzonek nagokorzeniowych. Pozyskanie sadzonek z kwater produkcyjnych szkółek w okresie jesiennym, przed zimą, uczyni warunki podstawowej uprawy gleby na szkółkach bardziej optymalnymi.

Podejmując polowe badania porównawcze, dotyczące wpływu różnych systemów produkcji sadzonek i pewnych aspektów związanych z zakładaniem upraw na kondycję odnowień należy postawić istotne pytania dotyczące:

1. wpływu technologii produkcji sadzonek zarówno na jakość samych sadzonek, jak i długotrwałe skutki przyjętych rozwiązań dla wzrostu samej uprawy i rozwoju drzewostanu w perspektywie wieloletniej;

2. roli żyznego substratu i mykoryzacji sadzonek z bryłką na udatność nasadzeń i ich kondycję w porównaniu do sadzonek uzyskanych tradycyjnymi technikami;
3. zasadności na poziomie zarówno ekonomicznym, jak i biologicznym wydłużenia okresu sadzenia jednorocznej sosny na późne lato i wczesną jesień.

W świetle postawionych pytań, zasadniczym celem opisanych poniżej badań było poznanie czynników sprzyjających poprawie efektywności zakładania i prowadzenia drzewostanów.

Doświadczenie w Nadleśnictwie Oleśnica Śląska

Doświadczenie założono w późnym latem i jesienią 2003 r. oraz wiosną 2004 r. na zalesianym nieużytku porolnym. W badaniach testuje się sadzonki posadzone 26 i 27 sierpnia 2003 r. (S), 25 i 26 września 2003 r. (W), 27 i 28 października 2003 r. (P) oraz 7 kwietnia 2004 r. (K). We wszystkich terminach posadzano roczne sadzonki wyprodukowane z bryłką przez szkółkę kontenerową w Nadleśnictwie Śnieżka (1) oraz sadzonki wyprodukowane z nagim korzeniem przez szkółkę gospodarczą Nadleśnictwa Oleśnica (2). Oba rodzaje sadzonek wyhodowano z tej samej partii nasion. Doświadczenie założono w układzie bloków losowanych kompletnych z pięcioma powtórzeniami. Jest to doświadczenie dwuczynnikowe, w którym pierwszym czynnikiem są daty sadzenia (4 poziomy), a drugim – rodzaje sadzonek (2 poziomy). Razem w doświadczeniu jest 8 obiektów, posadzonych na 40 poletkach. Wielkość elementarnego poletka wyniosła 390 m². Na każdym z nich posadzano 390 sadzonek w więźbie 1,5 × 0,67 m.

Wyniki

Dla terminu sierpniowego, październikowego i kwietniowego wykazano większą udatność dla sadzonek z bryłką. W terminie wrześniowym nie wykazano różnic między technologią produkcji sadzonek. Szczególnie wyraźna



Fot. 1. Doświadczenie w Nadleśnictwie Oleśnica Śląska.

różnica pomiędzy oboma typami sadzonek wystąpiła przy sadzeniu w kwietniu, gdyż do wieku 6 lat przetrwało 94% drzewek z sadzonek z bryłką i 47% z sadzonek nagokorzeniowych. Wynik ten można wytłumaczyć wielotygodniową suszą w kwietniu 2004 r., którą lepiej zniosły sadzonki z bryłką. Pod względem udatności sadzonki z bryłką okazały się niewrażliwe na termin sadzenia. Ocena wzrostu wysokości jest nieco inna. Przy sadzeniu sierpniowym jedynie trzyletnie (w roku 2005) drzewa posadzone z bryłką miały istotnie większą wysokość. W pozostałych latach różnice nie były istotne, a w latach 2007, 2008 i 2013 drzewa z sadzonek nagokorzeniowych przerosły drzewa posadzone z bryłką. Przy sadzeniu wrześniowym jedynie w 2004 r. dwuletnie drzewa posadzone z bryłką były większe od drzew posadzonych z nagim korzeniem. W pozostałych przypadkach różnica wysokości nie przekroczyła progu istotności. Przy sadzeniu październikowym większą wysokość osiągały drzewa z sadzonek z bryłką, choć istotna różnica wystąpiła tylko w 2005 r., natomiast w 2013 r. to drzewa posadzone z nagim korzeniem osiągnęły większą wysokość. Jedynie przy sadzeniu kwietniowym sadzonki z bryłką wyrastały

w drzewa istotnie wyższe od drzew z sadzonek nagokorzeniowych. Opisane wyżej wyniki obrazują pewne tendencje wzrostu uprawy, zależne od obu badanych czynników. Z jednej strony obserwuje się nieznaczne (i wciąż nieistotne) powiększanie się przewagi wzrostu drzewek z sadzonek nagokorzeniowych z sadzenia sierpniowego i wrześniowego. Z drugiej strony pogłębia się różnica na niekorzyść sadzonek nagokorzeniowych, sadzonych w kwietniu.

Doświadczenie w Nadleśnictwie Milicz

Powierzchnia została założona w latach 2011-2012. Sadzonki z zakrytym systemem korzeniowym zostały wyprodukowane w szkółce Kostrzyca w Nadleśnictwie Śnieżka, a z odkrytym systemem korzeniowym w szkółce Nadleśnictwa Milicz w Świątoszynie. Materiał sadzeniowy został wyhodowany w 2010 r. Gleba została przygotowana frezem.

Doświadczenie zaprojektowane zostało w sposób czynnikowy, a czynniki które zostały użyte to:

- pora sadzenia (1 - 1 września, 2 - 1 października, 3 - 1 listopada, 4 - 1 kwietnia);
- sposób produkcji sadzonki (z nagim systemem korzeniowym lub z bryłką);
- ekspozycja na wiatr (sadzonki, których korzenie nie były poddawane ekspozycji na wiatr, i te, których korzenie zostały na 10 minut wystawione na działanie wiatru);
- żelowanie (zastosowano ochronę żelową lub jej brak).

Wszystkie możliwe kombinacje każdego czynnika w bloku dały łącznie 32 różniące się obiekty. Aby zwiększyć dokładność uzyskiwanych danych, obiekty te zostały powtórzone czterokrotnie, zakładając 4 bloki. Na każdym poletku znajdowało się 390 sadzonek. Wymiary poletka to $19,5 \times 20$ m, co w rezultacie daje powierzchnię 0,04 ha dla jednego poletka, a dla obiektu 0,16 ha. Całe doświadczenie to 5,12 ha.



Fot. 2. Doświadczenie w Nadleśnictwie Milicz.

Wyniki

Pomiary i obserwacje wykonano w 2013 r., dwa lata po założeniu uprawy. Na tym etapie uprawy wyższą przeżywalnością wykazały się sadzonki z bryłką (87,7%), przy średniej dla sadzonek z nagim systemem korzeniowym wynoszącej 70,7%. Najwyższą przeżywalność wśród sadzonek z nagim systemem korzeniowym osiągnęły te posadzone 1 kwietnia (76,8%), a najniższą posadzone 1 października (62,2%). Najwyższą przeżywalność wśród sadzonek z bryłką osiągnęły te posadzone 1 września (91,8%), a najniższą posadzone 1 listopada (84,2%).

Pomiar wysokości wykazał, że sadzonki z bryłką osiągnęły średnio 54,2 cm, przy średniej dla sadzonek z nagim systemem korzeniowym wynoszącej 42,3 cm. Największą wysokość wśród sadzonek z nagim systemem korzeniowym osiągnęły te posadzone 1 września (43,8 cm), a najniższą posadzone 1 października (42,2 cm). Natomiast wśród sadzonek z bryłką, największą wysokość osiągnęły posadzone 1 września (56,6 cm), a najniższą posadzone

1 kwietnia (51,8 cm). Natomiast niejednoznaczny okazał się wpływ ekspozycji korzeni na warunki atmosferyczne i zastosowanie ochrony agrozelem.

Doświadczenie z jodłą pospolitą założone w czterech lokalizacjach

W 2017 r. na terenie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych we Wrocławiu założono doświadczenie porównawcze, mające na celu testowanie sadzonek jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) wyhodowanych według różnych technologii szkółkarskich. Powierzchnie badawcze zlokalizowane są w trzech różnych nadleśnictwach: Międzyzlesie, Kamienna Góra oraz Złotoryja. Wykorzystano następujące techniki produkcji sadzonek:

1. 3/0- sadzonki wyprodukowane w gruncie w szkółce otwartej,
2. 3/0- sadzonki wyprodukowane w gruncie w szkółce podokapowej pod sosną,
3. 3/0- sadzonki wyprodukowane w gruncie w szkółce podokapowej pod świerkiem,



Fot. 3. Sadzonki jodły pospolitej w pojemnikach Kosterkiewicza.

4. 2/1- sadzonki rosnące 2 lata pod osłoną, rok po szkółkowaniu w gruncie,
5. 2/1- sadzonki 2 lata pod osłoną, rok po szkółkowaniu do pojemników Kosterkiewicza,
6. 3/0- sadzonki wyprodukowane w gruncie w szkółce otwartej z nasion z wyłączonych drzewostanów nasiennych z Nadleśnictwa Międzylesie.

Techniki o numerach od 1 do 5 wykorzystano we wszystkich nadleśnictwach, natomiast technikę nr 6 tylko w Nadleśnictwie Międzylesie.

Wielkość elementarnego poletka wynosi 0,04 ha i jest ono kwadratowego kształtu. Na poletku posadzono 100 sadzonek w więźbie 2×2 m. Każdy obiekt został powtórzony 5- krotnie. Wszystkie sadzonki wyprodukowano w szkółce leśnej Nadleśnictwa Międzylesie.

Wyniki

W 2021 r., na 5-letnich uprawach, zaobserwowano istotne różnice. Były to różnice pomiędzy nadleśnictwami (powierzchniami doświadczalnymi) oraz pomiędzy asortymentami sadzonek, przy nadal znikomej interakcji pomiędzy tymi źródłami zmienności. Zaobserwowano istotne kontrasty pomiędzy sadzonkami szkółkowanymi a nieszkółkowanymi, w obrębie sadzonek nieszkółkowanych pomiędzy sadzonkami ze szkółki pod sosną i ze szkółki pod świerkiem. W obrębie sadzonek szkółkowanych wykryto różnice pomiędzy sadzonkami nagokorzeniowymi a pojemnikowymi.

Najlepiej rosną jodły na powierzchni w Złotoryi, najgorzej na powierzchni w Śnieżce, co jest odbiciem warunków wzrostu. Najlepiej na wszystkich powierzchniach rosną jodły z sadzonek szkółkowanych do pojemników (2/1 K), najgorzej rosły jodły wyprodukowane w luce drzewostanu świerkowego (3/0 Św), co znalazło wyjaśnienie w badaniach fizjologicznych. Jodły spod świerka cechowały się najgorszymi parametrami fizjologicznymi

Doświadczenie w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym Siemianice

Doświadczenie założono wiosną 2017 r. jako doświadczenie dwuczynnikowe w układzie bloków kompletnie zrandomizowanych. Liczba powtórzeń (5) każdego obiektu w doświadczeniu jest jednakowa, a rozmieszczenie obiekt-



Fot. 4. Doświadczenie w LZD Siemianice.

tów w bloku jest losowe. Przedmiotem badań jest wpływ dwóch czynników: gatunku i sposobu produkcji materiału odnowieniowego. Użyto sadzonek z bryłką i nago korzeniowych trzech gatunków (sosny zwyczajnej, buka zwyczajnego i dębu szypułkowego) o symbolu produkcyjnym 1/0.

Wyniki

Po drugim i czwartym sezonie wegetacyjnym oceniono przeżywalność. Pierwsza obserwacja (jesień 2018) wykazała dla sadzonek nagokorzeniowych i z bryłką, zarówno dla buka (80% i 79,5%) i dębu (93,2% i 94,2%) porównywalne wartości dla obu sposobów produkcji. Dla sosny te wartości się różniły, dla sadzonek nagokorzeniowych 79,5%, a sadzonek z bryłką 86,4%. Kolejna obserwacja wykonana po czwartym sezonie wegetacyjnym wykazała zróżnicowanie wartości dla testowanych obiektów. Wartości dla buka były wyraźnie niższe i wyniosły 52,6% dla sadzonek nagokorzeniowych oraz 56,8% dla sadzonek z bryłką. Dla dębu niższą przeżywalność stwierdzono dla sadzonek nagokorzeniowych (68%), przy 90,2% dla sadzonek z bryłką. Przeżywalność sosny była na podobnym poziomie jak przy poprzedniej obserwacji, 77,8% dla sadzonek nagokorzeniowych i 85,6% dla sadzonek z bryłką.

Doświadczenia w Nadleśnictwach Jarocin i Olesno

Badania zależności wzrostu i czynników regulujących wzrost od techniki wyprowadzenia materiału sadzeniowego przeprowadzono na 2 stanowiskach w nadleśnictwach Jarocin oraz Olesno, obejmujących 3 jednowiekowe typy odnowienia, tj. siew bezpośredni nasion do gruntu, drzewa uzyskane z sadzonek z nagim systemem korzeniowym oraz drzewa uzyskane z sadzonek wyhodowanych w szkółce kontenerowej. Kluczowymi czynnikami był wzrost wszystkich typów odnowień w dużej bliskości oraz wyprowadzenie drzewostanów dębu szypułkowego z tej samej partii nasion, oczywiście różnej dla Jarocina i Olesna.

Wyniki

Przeprowadzone badania wykazały osłabienie wzrostu dębów, zwłaszcza podczas pamiętnej suszy w 2019 r., niezależne od sposobu zakładania uprawy. Uprawy dębów zakładane z sadzonek z nagim systemem korzeniowym lub kontenerowych cechowały się większym osłabieniem wzrostu w przeciwieństwie do pochodzących z naturalnego odnowienia. Ponadto typ zastosowanych kaset istotnie różnicował, przyrost drzew, zwłaszcza w okresach suszy. Uśredniając dane dla obu stanowisk, jednoznacznie wykazano wyższe wartości pola przyrostu drewna w obrębie dębów sianych, niż dębów wyprowadzonych z sadzonek z nagim systemem korzeniowym bądź kontenerowych w okresie suszy, a parametrem najwyższym kształtującym ten wzór był spadek szerokości rocznych przyrostów drewna późnego. Okazało się również, że stopień wykorzystania wody przez dęby z produkcji kontenerowej zrównywał się z wartościami charakteryzującymi dęby siane w Oleśnie.

Podsumowanie

Hipoteza robocza tego typu doświadczeń porównawczych zakłada, że różnice pomiędzy obiektami z czasem będą się zacierały. Wyniki wskazują jednak, że początkowe różnice we wzroście mogą zanikać, zmieniać kierunek i przebieg lub się pogłębiać. Oznacza to konieczność wykonywania długoterminowych oraz wielowymiarowych obserwacji i pomiarów. W tym kontekście już na etapie zakładania uprawy należy podejmować decyzje o przyjęciu względnie dużej powierzchni poletek, pozwalającej pobierać materiał sekwencyjnie i prowadzić badania przez wiele lat. Ostatnie kilkanaście lat obserwowanego występowania długotrwałych susz w trakcie okresu wegetacyjnego jednoznacznie wskazuje na pogarszające się warunki wzrostu i doświadczanie przez sadzonki szoku związanego z tym niekorzystnym zjawiskiem. Chroniczny i zarazem powiększający się z czasem efekt szoku przesadzeniowego wskazuje jednoznacznie, jak ważne dla wzrostu uprawy jest eliminowanie wszelkich czynników mo-

gących go pogłębić. W doświadczeniu w Nadleśnictwie Oleśnica susza mająca miejsce na początku okresu wegetacyjnego najprawdopodobniej spowodowała znaczne straty na uprawie sadzonek nagokorzeniowych posadzonych w kwietniu. Sama zaś uprawa w rezultacie została uznana za przepadłą. Jednak w innych terminach sadzenia nie odnotowano zróżnicowania kondycji pomiędzy sadzonkami z nagim korzeniem w porównaniu do sadzonek z bryłką, które to generalnie były niewrażliwe na termin sadzenia. Można więc wskazać na sadzonki z nagim systemem korzeniowym wysadzone wiosną jako najbardziej wrażliwe i podatne na uszkodzenia w obrębie wszystkich testowanych wariantów. Nie można jednak przyjąć, że niepowodzenie wiosennego sadzenia jest powszechnie występującą regułą. Otrzymane wyniki jednakże jednoznacznie potwierdzają brak istotnych zależności pomiędzy porą sadzenia a stopniem udatności i późniejszą kondycją wzrostu jednorocznych sadzonek sosny zwyczajnej wysadzanych z bryłką. Innymi słowy, rosły one równie dobrze niezależnie czy zostały wysadzone wiosną, czy jesienią. Zwłaszcza ten późny termin sadzenia jednoznacznie sprzyjał wzrostowi zarówno sadzonek z bryłką, jak i nagim systemem korzeniowym. Zatem w omawianym terminie sadzonki z bryłką i z nagim korzeniem mogą być równocenne.

W doświadczeniu założonym w Nadleśnictwie Milicz jest testowanych kilka czynników mających wpływ nie tylko na udatność uprawy, ale także wzrost drzew w późniejszych fazach rozwojowych. Znając wyniki podobnych doświadczeń, dopiero wieloletnie badania będą mogły wspomóc decyzje gospodarcze. Uzyskane przez nas wstępne obserwacje wskazują, że podobnie jak w Nadleśnictwie Oleśnica, sadzenie letnie i jesienne dawało lepsze wyniki udatności i parametry wysokości osiągane przez sadzonki na uprawie od sadzenia wiosennego.

Uzyskane wyniki zatem potwierdzają przyjęte założenie o możliwości szerokiego stosowania sadzonek z bryłką jako pozytywnej alternatywy dla produkcji sadzonek z nagim systemem korzeniowym.

Sadzonki jodły pospolitej są produkowane różnymi technikami, przy różnej pracochłonności, a tym samym kosztochłonności. Doświadczenie założone w czterech lokalizacjach daje także możliwość porównania sposobów produkcji w różnych warunkach siedliskowych. Wyniki uzyskane po pięciu latach od założenia upraw wskazują, że najlepszym materiałem są sadzonki szkółkowane do pojemników, podobnej wartości są sadzonki nagokorzeniowe szkółkowane do gruntu w szkółce otwartej, a pomimo domniemyanych zalet sadzonki ze szkółek podokapowych im nie dorównują. Drugim bardzo ważnym wnioskiem nasuwającym się po 5 latach obserwacji jest wykazanie utrzymania początkowych różnic jakościowych między sadzonkami, pomimo upływu czasu, a zatem wysokiej jakości uprawy możliwe są wyłącznie do uzyskania z wysokiej jakości materiału sadzeniowego. Dotychczasowe badania upoważniają do stwierdzenia, że również dla jodły pospolitej technologia produkcji sadzonek ma więc daleko idący wpływ na późniejszy wzrost upraw, a w konsekwencji kolejnych etapów wzrostu drzewostanu.

Porównanie wzrostu kilku gatunków wyprodukowanych różnymi sposobami jest wyjątkowo cennym eksperymentem badawczym. Powierzchnia porównawcza założona w LZD Siemianice, gdzie testuje się trzy ważne gatunki lasotwórcze, pozwoli na długoterminowe obserwacje istotne zarówno dla nauki, jak i praktyki leśnej. Pierwsze wyniki przeżywalności wskazują, że dla sosny i buka oba sposoby produkcji są alternatywne. Susza w okresie wegetacyjnym w 2019 r. wpłynęła na przeżywalność buka i sadzonek nagokorzeniowych dębu szypułkowego. Takie wyniki wskazują, że w warunkach ograniczonego dostępu wody sadzonki buka obniżają żywotność niezależnie od sposobu produkcji, ale w przypadku dębu szypułkowego wyraźnie negatywnie reagują sadzonki z nagim korzeniem. Znajduje to swoje potwierdzenie w mniejszym polu przyrostu drewna przez sadzonki z nagim systemem korzeniowym na stanowisku w Oleśnie w porównaniu do sadzonek kontenerowych i sianych, a wyższe wartości pola przyrostu drewna tych ostatnich mogą wynikać z dostępu do głębszych

pokładów wody i jej efektywniejszego wykorzystania. Ponadto, obserwowanie zróżnicowanie pola przyrostu i reakcji fizjologicznej 20-letnich dębów jednoznacznie wskazuje na konieczność prowadzenia zarówno krótkookresowych, ale przede wszystkim długookresowych obserwacji przed wydaniem rekomendacji dotyczących stosowania określonego materiału sadzeniowego podczas odnowień i zalesień.

Wpływ sposobów produkcji oraz warunków przyjmowania się podstawowych gatunków drzewiastych, po posadzeniu, na dalszy wzrost jest bardzo silny zarówno na początkowym, jak i późniejszym etapie wzrostu drzewostanu, tj. nie zanika z wiekiem. Praktyczną implikacją tego faktu są znane zalecenia, aby używać materiału sadzeniowego najwyższej jakości i nie dopuszczać do żadnych zaniedbań podczas wyjmowania, sortowania, przechowywania, transportu i sadzenia oraz optymalizować warunki przyjmowania się sadzonek.

Podziękowania

Badania nad wpływem sposobu odnowienia na wzrost dębów na terenie Nadleśnictw Jarocin i Olesno sfinansowano w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki (2018/29/B/NZ9/00272), realizowanego w Instytucie Dendrologii PAN.

Badania nad wpływem różnych technologii szkółkarskich na wzrost jodły pospolitej sfinansowano w ramach projektu Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

Literatura

- Banach J. 1999. Zastosowanie metod produkcji materiału szkółkarskiego z zakrytym systemem korzeniowym w warunkach górskich. Sylwan 143 (1): 61-75.
- Barzdajn W. 2006. Wpływ technologii produkcji i pory sadzenia jednolatek sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) na udatność i początkowy wzrost uprawy. Sylwan 150 (8): 38-51.

- Barzdajn W. 2010. Wzrost uprawy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) przy użyciu sadzonek z bryłką i z nagim korzeniem w różnych terminach sadzenia. Sylwan 154 (5): 312-322.
- Burckhardt H. 1870. Säen und Pflanzen nach forstlicher Praxis. Vierte verbesserte Auflage. Carl Rümpler, Hannover.
- Fonder W., Berft M. 1998. Szkółkarstwo w Lasach Państwowych: stan oraz kierunki rozwoju. Postępy techniki w leśnictwie 65: 7-17.
- Gorzelać A. 1998. Ogólne zasady hodowania sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym w niektórych pojemnikach. Postępy techniki w leśnictwie 65: 62-76.
- Gunia S. 1999. Produkcja sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym. W: Sobczak R. [red.]. Szkółkarstwo leśne, ozdobne i zadrzewieniowe. Oficyna „Wydawnictwo Świat”, Warszawa.
- Gunia S., Sobczak R. 1981. Metody intensywnej produkcji sadzonek drzew leśnych. PWRiL, Warszawa.
- Ilmurzyński E. 1969. Szczegółowa hodowla lasu. PWRiL, Warszawa.
- Lokvenc T. 1985. Vývoj kořenových systémů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v kulturách založených obaleným sadbovým materiálem. Lesnictví 31: 601-620.
- Sokołowski S. 1921. Hodowla lasu wyd. II. Księgarnia Polska Bernarda Połonieckiego, Lwów i Warszawa.
- Tyszkiewicz S., Obmiński Z. 1963. Hodowla i uprawa lasu. PWRiL, Warszawa.
- Volná M. 1975. Doba síje a sadby, péče o kultury. W: Kantor J. Zakládání lesů a šlechtění lesních dřevin. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- Włoczewski T., Ilmurzyński E. 1957. Hodowla lasu. Wydanie II poprawione i rozszerzone. PWRiL, Warszawa.
- Zadworny M., Mucha J., Jagodziński A.M., Kościelniak P., Łakomy P., Modrzejewski M., Ufnalski K., Żytkowiak R., Comas L.H. and Rodríguez-Calcerada J.. 2021. Seedling regeneration techniques affect root systems and the response of *Quercus robur* seedlings to water shortages. Forest Ecology and Management. 479:11.

Cała nadzieja w nasionach. Znaczenie żywotności nasion dla produkcji szkółkarskiej w kontekście zmian klimatu

Znaczenie nasion w szkółkarstwie leśnym

Oczywistym jest, że to głównie nasiona służą drzewom do rozmnażania i rozprzestrzeniania się. Zatem to przede wszystkim od nasion będzie zależało, czy dany gatunek będzie nadal występował, czy też wyemigruje z powodu zaistniałych niekorzystnych dla niego warunków środowiska. Jakość nasion związana jest ze stopniem ich odporności na działanie całego kompleksu czynników wewnętrznych (genetycznych, strukturalnych, fizjologicznych) oraz zewnętrznych (warunki klimatyczne w czasie ich dojrzewania i rozwoju oraz warunki ich przechowywania) (Ratajczak i wsp. 2015; Hacket-Pain i Bogdziewicz 2021; Kijowska-Oberc i wsp. 2021a). Dwa najważniejsze spośród czynników środowiskowych – temperatura i wilgotność – kształtują cechy biochemiczne nasion od początku ich rozwoju, w czasie dojrzewania, spoczynku i ostatecznie podczas kiełkowania.

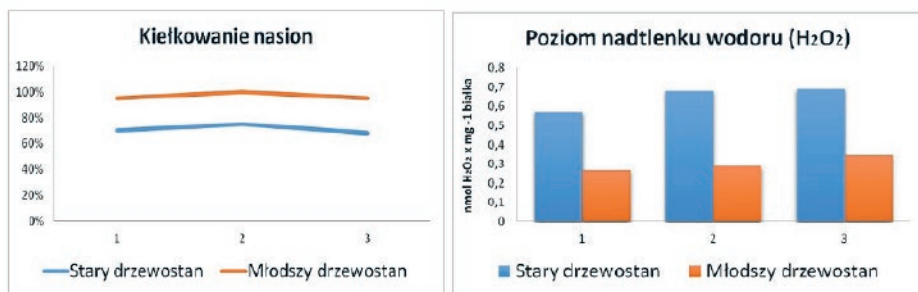
„Program zachowania leśnych zasobów genowych i hodowli selekcyjnej drzew w Polsce na lata 2011-2035” obejmuje ochronę i wzbogacanie istniejącej

w lasach różnorodności genetycznej oraz poprawę wartości genetycznej populacji drzew leśnych poprzez wykorzystywanie w hodowli jednostek nasiennych pochodzących z istniejącej bazy nasiennej. Program zakłada ponadto, że wyniki badań przyczynią się „do ulepszania populacji pod względem cech ilościowych i jakościowych, a tym samym do wzrostu efektywności ekonomicznej gospodarki leśnej wskutek zwiększenia odporności populacji i genotypów na czynniki środowiskowe”. Od 2005 r. w Lasach Państwowych realizowany jest również „Program testowania potomstwa wyłączonych drzewostanów nasiennych, drzew doborowych, plantacji nasiennych i plantacyjnych upraw nasiennych”, który ma na celu „doskonalenie gospodarki leśnej na podstawach ekologicznych” poprzez m.in. określenie wartości hodowlanej wyłączonych drzewostanów nasiennych (WDN) oraz podniesienie wartości handlowej leśnego materiału rozmnożeniowego (LMR). Ze względu na fakt, iż ok. 90% powierzchni odnawianych stanowi odnowienia sztuczne, struktura i trwałość lasów „zależy w dużej mierze od użytych do odnowienia nasion”.

Zamiany klimatu a kondycja drzewostanów

Wraz z wiekiem drzewa w wolniejszym tempie wytwarzają biomasę oraz akumulują węgiel, co skutkuje obniżeniem aktywności procesów fizjologiczno-biochemicznych zachodzących w ich komórkach (Jagodźński i wsp. 2018). Co więcej, kondycja najstarszych i lokalnie zaadaptowanych drzewostanów może również obniżyć się w wyniku gwałtownie zachodzących zmian klimatu (Dyderski i wsp. 2018). Coraz bardziej powszechne zjawisko suszy skutkuje obniżeniem poziomu wód gruntowych, a to z kolei prowadzi do osłabienia drzewostanów. Musimy pamiętać, że wszelkie modyfikacje w mechanizmach adaptacyjnych (np. modyfikacje budowy systemu korzeniowego) będą dotyczyły niemal wszystkich drzewostanów, z wyjątkiem tych należących do starszych klas wieku, w przypadku których takie modyfikacje nie są możliwe (Oszako 2007). Wstępne wyniki badań pokazały, że żołądźce pozyskane

z drzewostanów dębowych II-IV klas wieku oraz VII i wyższych klas charakteryzują się niższą zdolnością kiełkowania i wyższym poziomem zawartości toksycznych cząsteczek reaktywnych form tlenu (RFT), aniżeli pochodzące z drzewostanów młodszych (Ryc. 1).



Ryc. 1. Poziom kiełkowania oraz zawartość nadtlenu wodoru w nasionach zebranych z młodszych i wiekowych drzewostanów dębowych.

W odniesieniu do wyżej przytoczonych wyników badań przeprowadzonych w drzewostanach dębowych, rodzi się wątpliwość, czy w przypadku pozostałych gatunków starsze drzewostany produkują nasiona o jakości pozwalającej na ich długoterminowe przechowywanie, przy zachowaniu wysokiej jakości i żywotności. Przechowując słabe jakościowo nasiona sprzyjamy wzrostowi nasilenia tego procesu, obniżamy procent żywotności nasion i generujemy dodatkowe koszty związane z produkcją materiału sadzeniowego. Odpowiedź na to pytanie wydaje się być szczególnie istotna z uwagi na wysokie koszty zbioru oraz przechowywania nasion. Wagę tego problemu potęguje fakt, iż najnowsze badania opisane poniżej wskazują, że dochodzi obecnie do zaburzenia cykliczności produkcji nasion, zwłaszcza w przypadku gatunków liściastych. Tymczasem „Program zachowania leśnych zasobów genowych i hodowli selekcyjnej drzew na lata 2011-2035” zakłada wzrost powierzchni zajmowanej przez wyłączone drzewostany nasienne właśnie gatunków liściastych.

Wpływ klimatu na produkcję nasion

Z obserwacji i wstępnych wyników badań wynika, że zmieniające się warunki klimatyczne mają istotny wpływ na zaburzenia cykliczności i synchronizacji urodzaju ważnych gospodarczo gatunków drzew: sosny, dębów i buka (Hackett-Pain i Bogdziewicz 2021; Kijowska-Oberc i wsp. 2021b; Bogdziewicz 2022).

Większość dotychczas przeprowadzonych badań nad cyklicznością obradzenia owoców (nasion) dotyczy drzewostanów bukowych. Buk jest gatunkiem hiperwrażliwym, gwałtowny wzrost temperatury latem jest dla niego sygnałem, że kolejny rok będzie rokiem nasiennym. Buki owocują wtedy w pełnej synchronizacji, nie tylko w jednym lesie lub kraju, ale w całej Europie. Daje to gwarancję, że duża liczba roślin w tym samym momencie kwitnie i produkuje pyłek, a przez to zwiększają się szanse, że pyłek zapyli większą liczbę kwiatów, dzięki czemu powstanie większa liczba pełnych nasion (Bogdziewicz i wsp. 2021). Zmieniające się gwałtownie warunki środowiska (m.in. wysokie temperatury latem), powodują, że buki otrzymują sygnał do produkcji nasion co dwa lata, a nawet co rok. Nie mają więc wystarczająco dużo czasu na ponowne zgromadzenie energii po wydaniu owoców, co bardzo osłabia ich kondycję. Z tego powodu dochodzi do wspomnianych wcześniej zaburzeń w synchronizacji obradzenia. Drzewa nie nadążają z coroczną produkcją nasion, więc wytwarzają je w mniejszej ilości, nie mając przerw na regenerację. Drzewostany bukowe obradzając co 1-2 lata stają się słabe, bardziej narażone na gradację szkodników owadzych, a produkowane przez nie nasiona charakteryzują się niską jakością (Ryc. 2).

Dlaczego? Aby odpowiedzieć na to pytanie, musimy zajrzeć w głąb struktur budujących komórki roślinne. Niekorzystne warunki środowiskowe indukują tzw. stan stresu oksydacyjnego. W normalnych warunkach w komórkach produkowane są (RFT), które powstają w wyniku niepełnej redukcji tlenu. Do reaktywnych form tlenu zaliczamy: anionorodnik ponadtlenkowy, nadtlenek wodoru, rodnik hydroksylowy, tlen singletowy (Bailly 2004). Wchodząc



Ryc. 2. Wpływ klimatu na zmiany w produkcji i żywotności nasion drzew.

w reakcje ze składnikami komórek, cząsteczki te są sygnałem przesyłanym między komórkami, wyzwalającym wiele procesów metabolicznych. RFT towarzyszą nasionom od początku ich rozwoju, poprzez dojrzewanie i spoczynek, aż do momentu kiełkowania (Ratajczak i wsp. 2015; Ratajczak i wsp. 2019a, 2019b). Poziom cząsteczek RFT w komórce jest regulowany przez obronny system antyoksydacyjny. Działanie stresowego czynnika środowiskowego (np. nagła zmiana warunków abiotycznych) powoduje, że aktywność tego systemu obronnego obniża się i nie jest on w stanie kontrolować poziomu RFT. Dochodzi do zachwiania równowagi pomiędzy szybkością tworzenia i usuwania RFT, a tym samym do inicjacji stresu oksydacyjnego, który w przypadku nasion powoduje obniżenie ich żywotności (Ratajczak i wsp. 2015; Ratajczak i wsp. 2019b). Kontrolowanie poziomu stresu oksydacyjnego jest niezmiernie ważne, szczególnie u nasion z kategorii *recalcitrant*, do jakich należą nasiona m.in. dębów czy klonu jawora. Pozostają one bowiem aktywne metabolicznie również w trakcie przechowywania, co oznacza, że są wówczas bardziej narażone na uszkodzenia oksydacyjne, a co za tym idzie – na utratę żywotności i późniejszy spadek zdolności kiełkowania. Kontrola i zachowanie równowagi

między szybkością tworzenia i usuwania RFT jest ważna również w przypadku nasion kategorii *suborthotox*, do której zaliczamy nasiona buka zwyczajnego.

W czasie dojrzewania zachowują się one jak nasiona kategorii *orthodox*: mają aktywny metabolizm oraz bardzo dobrze funkcjonujący system antyoksydacyjny kontrolujący poziom produkowanych RFT. Jednak podczas przechowywania bardzo szybko tracą tę równowagę, dochodzi do szybkiej nadprodukcji RFT i inicjacji procesu starzenia, którego wynikiem jest spadek żywotności tych nasion (Ratajczak i wsp. 2015; Ratajczak i wsp. 2019b; Małecka i wsp. 2021).

Starzenie się nasion – problem w ochronie bioróżnorodności

Możemy zapobiegać utracie materiału siewnego, niezbędnego dla zachowania trwałości lasów, gromadząc go i przechowując w ściśle kontrolowany sposób, zależny oczywiście od gatunku. Okazuje się jednak, że podczas przechowywania nasiona są narażone na intensywne działanie procesu starzenia, w wyniku którego tracą swoją najważniejszą właściwość, jaką jest zdolność do kiełkowania. Od kilku już lat naukowcy poszukują odpowiedzi na pytanie, co jest główną tego przyczyną, i gdzie ten proces w komórce jest inicjowany. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że powodem utraty żywotności przez nasiona podczas ich długoterminowego przechowywania jest wzrost poziomu RFT, obniżona aktywność systemu antyoksydacyjnego, zmiany w metabolizmie białek i cukrów, a w konsekwencji zaburzenia w regulacji stanu redoks (Ratajczak i wsp. 2015; Ratajczak i wsp. 2019a; Ratajczak i wsp. 2019b). Do tej pory udało się określić, że główną przyczyną utraty żywotności nasion w czasie przechowywania są RFT (Kibinza i wsp. 2006; Kibinza i wsp. 2011; Ratajczak i wsp. 2015). Miejscem inicjacji procesu starzenia się w nasionach są mitochondria. Mitochondria to ważne organelle komórkowe, które nie tylko biorą udział w produkcji energii, lecz pełnią istotną rolę w regulacji stanu re-

doks oraz w sygnalizacji komórkowej. Stanowią główne miejsce generowania RFT, które w nadmiarze wpływają destrukcyjnie na ich strukturę i prowadzą do ich nieprawidłowego funkcjonowania (Navrot 2007; Xia Xua i wsp. l. 2015; Małecka i wsp. 2021). Wykazano, że w przechowywanych nasionach buka zwyczajnego następują zmiany w strukturze mitochondrium, przez co obniża się ich żywotność. W komórkach nasion buka zwyczajnego przechowywanych przez okres 14-20 lat obserwowano zdecydowanie mniejszą liczbę mitochondriów, aniżeli w nasionach przechowywanych przez krótszy okres (3 lata), a także zmiany w budowie tych organelli, które jednoznacznie wskazywały na ich obniżoną aktywność energetyczną. Jednocześnie w tych mitochondriach zauważono znaczny wzrost poziomu RFT i aldehydu dimalonowego (MDA), wskazujący na występowanie oksydacyjnych uszkodzeń oraz obniżoną aktywność enzymów systemu antyoksydacyjnego – szczególnie katalazy (Małecka i wsp. 2021). Prawidłowy przebieg procesów metabolicznych w czasie kiełkowania wymaga dużego nakładu energii, która produkowana jest głównie w mitochondriach. Mierzac aktywność oddechową nasion, a tym samym ich stan energetyczny, możemy określić poziom ich żywotności. Aktywność oddechową nasion możemy zmierzyć za pomocą analizatora Seahors. Służy on do jednoczesnych pomiarów oddychania mitochondrialnego (poprzez pomiar szybkości zużycia tlenu – OCR) oraz glikolizy (poprzez pomiar szybkości zakwaszenia zewnątrzkomórkowego – ECAR). Pozwala to na badanie: fenotypu metabolicznego komórek, aktywności mitochondriów w oddychaniu komórkowym oraz aktywności glikolitycznej, zależności komórek od różnych substratów metabolicznych, takich jak glukoza czy kwasy tłuszczowe. Zgodnie z wynikami Zgodnie z wynikami opublikowanych badań (Fuchs i wsp. 2023), znaczący spadek oddychania obserwowany jest w mitochondriach nasion przechowywanych, tym większy, im nasiona były dłużej przechowywane. Zaobserwowane zmiany wskazują, że mitochondria te nie mogą spełniać swoich podstawowych funkcji – generowania odpowiedniej ilości energii dla

zapewnienia ciągłości metabolizmu komórkowego. Najlepsze parametry oddychania mitochondrialnego obserwowano w mitochondriach z nasion przechowywanych krótko (nasiona buka przez okres do 3 lat). Mitochondria te wykazywały więc wysoką aktywność energetyczną. Świadczy to o bardzo dobrej wydajności funkcjonalnej mitochondriów, dużej ich sprawności i dobrym przystosowaniu do np. niekorzystnych warunków stresowych. Na podstawie uzyskanych wyników uważamy, że procesy starzenia się nasion są związane głównie z mitochondriami, a ich uważna analiza pozwoli nam je lepiej zrozumieć.

Biochemiczne wskaźniki żywotności nasion

Konsekwencje deficytu wody i wysokich temperatur sięgają w głąb tkanek nasion. Dzieje się to już nawet w okresie dojrzewania na drzewie rodzicielskim. Żywotność nasion ma niebagatelne znaczenie dla ciągłości istnienia gatunków i populacji, ale także dla kształtowania zasięgów ich występowania (Kijowska-Oberc i wsp. 2020). W obliczu zmian klimatu pojawia się konieczność zidentyfikowania populacji o wysokiej żywotności nasion, które dałyby początek bardziej stabilnym i odpornym na nowe warunki lasom. Taka identyfikacja wymaga jednak zastosowania odpowiedniego markera. Naszym zdaniem za ów biochemiczny marker może posłużyć prolina.

Akumulacja proliny jest mechanizmem uruchamianym przez rośliny w celu przeciwdziałania uszkodzeniom komórek powstającym wskutek stresu oksydacyjnego. Prolina jest aminokwasem oraz nieenzymatycznym elementem systemu antyoksydacyjnego. Usuwa nadmiar RFT, a także stabilizuje strukturę błon komórkowych i związanych z nimi białek, które regulują ważne procesy biochemiczne. W ten sposób prolina ogranicza zaburzenia podstawowych funkcji komórek, hamując tym samym spadek żywotności nasion. Pełni ponadto rolę osmolitu ograniczającego utratę wody przez komórki, co ma istotne znaczenie w warunkach suszy (Rejeb i wsp. 2014).

Poziom proliny można w stosunkowo prosty sposób ustalić w laboratorium, stosując pomiar spektrofotometryczny (na podstawie stopnia zabarwienia próbki). Przeprowadzając takie analizy na nasionach kategorii *recalcitrant* pozyskiwanych co 2 tygodnie przez cały okres dojrzewania zaobserwowano, że poziom proliny wyraźnie wzrasta wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem sum opadów. W ten sposób nasiona bronią się – więcej proliny to zabezpieczenie przed spadkiem wilgotności, który mógłby doprowadzić do trwałych uszkodzeń, a w konsekwencji – do śmierci zarodka. W przypadku nasion kategorii *orthodox* zmiany w zawartości proliny pod wpływem suszy nie były silnie skorelowane ze zmianami temperatury i sum opadów. Dlatego też jej poziom możemy potraktować jako wskaźnik stopnia odporności nasion na stres – im niższa zawartość proliny, tym większa tolerancja nasion na podsuszanie (Kijowska-Oberc i wsp. 2021a). Co ciekawe, efekt akumulacji proliny pod wpływem suszy w liściach siewek drzew jest silniejszy również w przypadku gatunków produkujących nasiona kategorii *recalcitrant*. Ponadto efekt ten zaznacza się wyraźniej u gatunków liściastych niż u iglastych, a także jest tym większy, im cięższe nasiona wytwarza dany gatunek. Zastosowanie proliny w identyfikacji populacji, których nasiona wykazują większą żywotność, może zatem pomóc w łagodzeniu skutków globalnego ocieplenia. Prawdopodobnie będą to populacje lepiej przystosowane do prognozowanych zmian klimatycznych, a więc wykorzystywanie ich nasion podniesie udatność odnowień w lasach.

Podsumowanie

Adaptacja lasotwórczych gatunków drzew do skutków zmian klimatu jest jednym z najważniejszych wyzwań, przed jakimi stoi współczesne leśnictwo. Określenie granicznego wieku drzewostanów, których nasiona charakteryzują się zwiększoną odpornością na stres, może przynieść korzyści ekologiczne, ekonomiczne i społeczne w obliczu globalnego ocieplenia. Minimalizacja ryzyka utraty stabilności drzewostanów poprzez identyfikację populacji, których

potomstwo wykazuje wysoką żywotność, jest dziś kluczowa dla trwałości lasów. Identyfikacja ta jest możliwa dzięki zastosowaniu uniwersalnych wskaźników biochemicznych, spośród których obiecującym wydaje się być poziom proliny. Holistyczne ujęcie problemu stresu oksydacyjnego i procesu starzenia zachodzącego w komórkach nasion, poprzez uwzględnienie zarówno fizjologii, biochemii, jak też biologii molekularnej, pozwala na szersze postrzeganie problematyki wpływu zmian zachodzących w środowisku na początkowy etap rozwoju drzew – tj. na początek organizmów w postaci nasion, które w przyszłości mają stać się filarami ekosystemu leśnego.

Literatura:

- Bailey C. 2004. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Science Research* 14: 93-107.
- Bogdziewicz M., Hacket-Pain A., Kelly D., Thomas P.A., Lageard J., Tanentzap A.J. 2021. Climate warming causes mast seeding to break down by reducing sensitivity to weather cues. *Global Change Biology* 27: 1952-1961.
- Bogdziewicz M. 2022. How will global change affect plant reproduction? A framework for mast seeding trends. *New Phytologist* 234: 5-6.
- Dyderski M.K., Paź S., Frelich L.E., Jagodziński A.M. 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24: 1150-1163.
- Hacket-Pain A., Bogdziewicz M. 2021. Climate change and plant reproduction: trends and drivers of mast seeding change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 376(1839): 20200379.
- Fuchs H., Małecka A., Budzińska A., Jarmuszkiewicz W., Ciszewska L., Staszak A.M., Kijowska-Oberc J., Ratajczak E. 2023. High-throughput method for oxygen consumption rate measurement (OCR) in plant mitochondria. *BMC Plant Biology* 23(1): 496.

- Jagodziński A.M., Dyderski M.K., Gęsikiewicz K., Horodecki P., Cysewska A., Wierczyńska S., Maciejczyk K. 2018. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? – Allometric equations and biomass conversion and expansion factors. *Forest Ecology and Management* 409: 74-83.
- Kibinza S., Bazin J., Bailly C., Farrant J.M., Corbineau F., El-Maarouf-Bouteau H. 2011. Catalase is a key enzyme in seed recovery from ageing during priming. *Plant Science* 181: 309-315.
- Kibinza S., Vinel D., Côme D., Bailly C., Corbineau F. 2006. Sunflower seed deterioration as related to moisture content during aging, energy metabolism and active oxygen species scavenging. *Physiologia Plantarum* 128: 496-506.
- Kijowska-Oberc J., Staszak A.M., Wawrzyniak M.K., Ratajczak E. 2021a. Changes in proline levels during seed development of orthodox and recalcitrant seeds of genus *Acer* in a climate change scenario. *Forests* 11(12): 1362.
- Kijowska-Oberc J., Staszak A.M., Kamiński J., Ratajczak E. 2020. Adaptation of forest trees to rapidly changing climate. *Forests* 11(2):123.
- Kijowska-Oberc J., Staszak A.M., Ratajczak E. 2021b. Climate change affects seed aging? Initiation mechanism and consequences of loss of forest tree seed viability. *Trees* 35: 1099-1108.
- Kijowska-Oberc J., Dylewski Ł., Ratajczak E. 2023. Proline concentrations in seedlings of woody plants change with drought stress duration and are mediated by seed characteristics: a meta-analysis. *Scientific Reports* 13(1): 15157.
- Małecka A., Ciszewska L., Staszak A.M., Ratajczak E. 2021. Relationship between mitochondria changes and seed aging as a limitation of viability for the storage of beech seed (*Fagus sylvatica* L.). *PeerJ* 9: 10569.
- Navrot N., Rouhier N., Gelhaye E., Jacquot J.P. 2007. ROS generation and antioxidant systems in plant mitochondria. *Physiologia Plantarum* 129: 185-195.
- Oszako T. 2007. Przyczyny masowego zamierania drzewostanów dębowych. *Sylvan* 6: 62-72.

- Ratajczak E., Dietz K.J., Kalembe E.M. 2019a. The occurrence of peroxiredoxins and changes in redox state in *Acer platanoides* and *Acer pseudoplatanus* during seed development. *Journal of Plant Growth Regulation* 38: 298-314.
- Ratajczak E., Małecka A., Bagniewska-Zadworna A., Kalembe E.M. 2015. The production, localization and spreading of reactive oxygen species contributes to the low vitality of long-term stored common beech (*Fagus sylvatica* L.) seeds. *Journal of Plant Physiology* 174: 147-156.
- Ratajczak E., Staszak A.M., Wojciechowska N., Bagniewska-Zadworna A., Dietz K.J. 2019b. Regulation of thiol metabolism as a factor that influences the development and storage capacity of beech seeds. *Journal of Plant Physiology* 239: 61-70.
- Rejeb K.B., Abdelly C., Savouré A. 2014. How reactive oxygen species and proline face stress together. *Plant Physiology and Biochemistry* 80: 278-284.
- Xia F.S., Wang M.Y., Li M.L., Mao P.S. 2015. Mitochondrial structural and antioxidant system responses to aging in oat (*Avena sativa* L.) seeds with different moisture contents. *Plant Physiology and Biochemistry* 94: 122-129.

KONFERENCJA W OBIEKTYWIE



Otwarcie Konferencji przez Dyrektora RDLP w Toruniu



Przedstawiciele organizatorów Konferencji podczas sesji referatowej w sali konferencyjnej Hotelu Bulwar w Toruniu



Skomplikowane kwestie w przystępnym przekazie dla praktyków podczas wystąpień przedstawicieli nauki



Leśnicy z różnych regionów Polski podczas sesji referatowej. Rzeczowa dyskusja praktyków z przedstawicielami nauki



Zwiedzanie szkółki kontenerowej Bielawy (Nadleśnictwo Dobrzejewice)



Sesja terenowa ze wspólnym sadzeniem sosny z kontenera (Nadleśnictwo Dobrzejewice)



Obserwacje rozkopanych korzeni w młodniku sosnowym (Nadleśnictwo Dobrzejewice)



Wspólne zdjęcie przy tablicy upamiętniającej Konferencję

