

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

---

Raport z testu badawczego dotyczącego analizy zanieczyszczenia powietrza (powiat Nowy Sącz) z wykorzystaniem bioindykacji

Nadzór merytoryczny:

Dr Katarzyna Łuszczyńska

*1. Plan badawczy zawierający przebieg badań z podziałem na prace terenowe i laboratoryjne, wraz ze wskazaniem kolejnych kroków przebiegu prac badawczych*

a) Prace terenowe:

- wytyczenie obszaru badawczego
- wytypowanie odpowiednich drzew do poboru prób dendrochronologicznych (brak defoliacji, zranień, selekcja gatunkowa, posiadanie jednej strzały),
- pobór prób z drzew polegający na zastosowaniu świdra Presslera,
- spakowanie rdzeni do specjalnie przygotowanych pudełek i oznaczenie pudełek,
- dokumentacja stanowiska,
- opis cech morfologicznych drzewa,
- naniesienie pozycji GPS dla każdego drzewa.

b) Prace kameralne:

- wklejenie rdzeni do specjalnie przygotowanych desek drewnianych,
- szlifowanie rdzeni przy użyciu kolejno kilku typów papierów ściernych najpierw o granulacji 100, później 250, 500 i na końcu 1000,
- pomiar przyrostów rocznych przy użyciu aparatury badawczej LinTab z oprogramowaniem TSAPWin Professional 4.65, dokładność 0,01 mm,
- analiza z wykorzystaniem skeleton plot i eliminacja przyrostów brakujących i fałszywych,
- datowanie epizodów zanieczyszczenia powietrza poprzez identyfikację redukcji przyrostów rocznych,

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

- wytypowanie lat z redukcją przyrostów rocznych poprzez opracowanie wykresu zbiorowego ukazującego % lub ilość drzew zapisujących zanieczyszczenie powietrza w poszczególnych latach.

*2. Opis przebiegu prac badawczych z uwzględnieniem założeń teoretycznych, opisu metody, ewentualnego poboru prób w terenie i kolejnych kroków prac laboratoryjnych.*

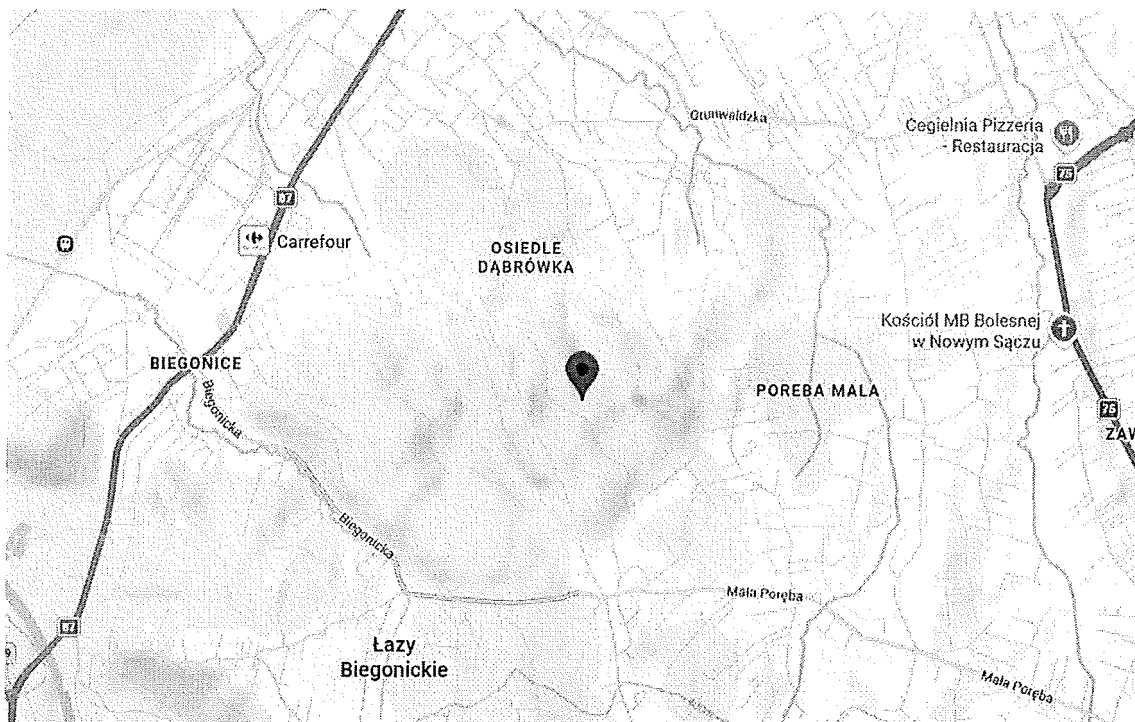
### Metoda badawcza

Badania przeprowadzono na podstawie analizy 25 rdzeni przyrostowych pobranych ze sosen rosnących w południowej części miasta Nowy Sącz (Ryc. 1). Na etapie przygotowawczym wykonano szczegółową ocenę wizualną drzewostanu, której celem było wyeliminowanie osobników wykazujących oznaki chorób, uszkodzeń mechanicznych lub innych zaburzeń mogących wpływać na przebieg przyrostu radialnego i obniżyć wiarygodność analiz. Uwzględniono ogólną kondycję drzew, stan aparatu asymilacyjnego oraz ewentualne deformacje pni. Rdzenie pobrano za pomocą świdra Presslera na wysokości pierśnicy (1,3 m) (Ryc. 2), zgodnie ze standardami dendrochronologicznymi. Z każdego drzewa uzyskano jeden rdzeń, co pozwoliło na pozyskanie reprezentatywnego materiału badawczego przy minimalnej ingerencji w tkanki drzewne. Próby zostały następnie osadzone w drewnianych listewkach w celu ich stabilizacji, zachowania właściwej orientacji oraz przygotowania do dalszych analiz. Kolejnym etapem było wielostopniowe szlifowanie powierzchni rdzeni przy użyciu papierów ściernych o gradacji 100, 250 i 500, co umożliwiło wyraźne uwidocznienie granic słoików rocznych. W przypadkach słabej czytelności granic zastosowano dodatkowo papier o gradacji 1000, co zwiększyło dokładność obserwacji makro- i mikroskopowych oraz ułatwiło pomiary. W pierwszym etapie analiz opracowano dla każdej próby indywidualne wykresy szkieletowe (skeleton plot), stanowiące podstawowe narzędzie w dendrochronologii. Umożliwiło to identyfikację lat o charakterystycznych zmianach przyrostowych, w tym okresów inicjujących redukcje przyrostów radialnych, oraz ocenę stopnia ich synchronizacji między drzewami (Ryc. 3). Analiza ta pozwoliła także na wstępne wykrycie anomalii w sekwencjach przyrostowych. Następnie przeprowadzono szczegółowe pomiary szerokości słoików rocznych, które posłużyły do opracowania lokalnej chronologii przyrostowej (Ryc. 4). Na tej podstawie wyodrębniono okresy obniżonego wzrostu oraz dokonano ich

## Polska – Słowacja

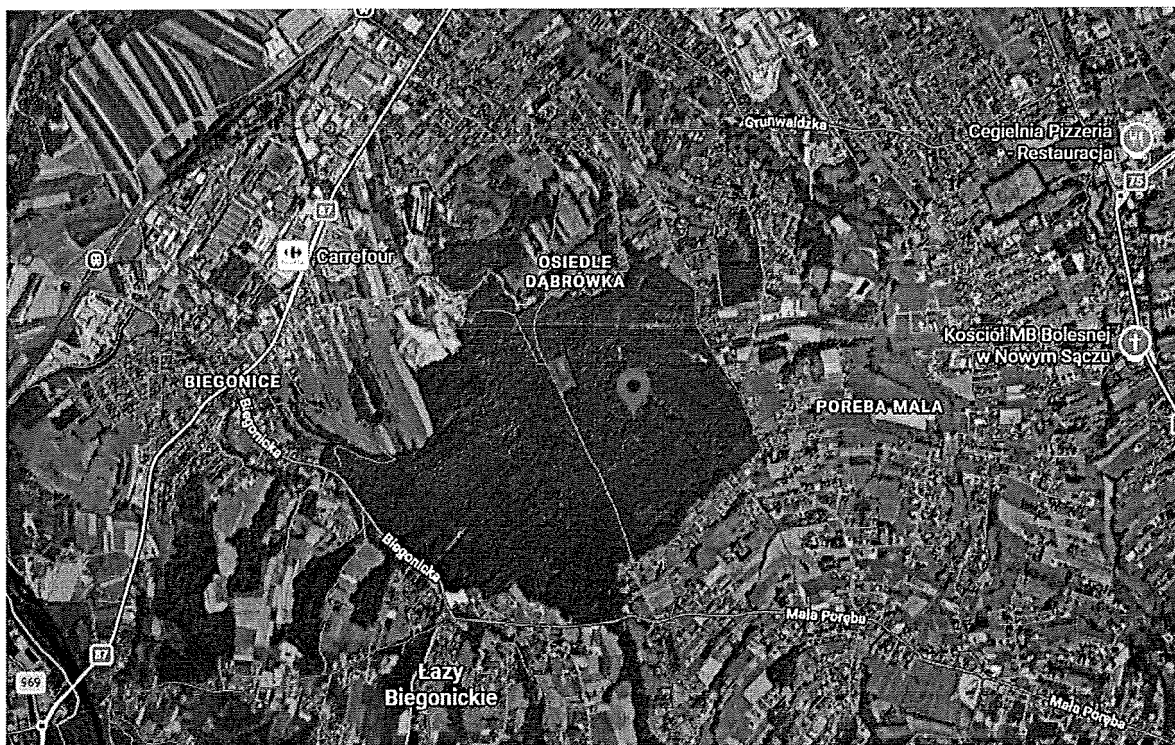
*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

charakterystyki ilościowej i jakościowej. Zidentyfikowane redukcje podzielono na słabe i silne, stosując jednoznaczne kryteria. Za redukcję uznano wystąpienie co najmniej trzech kolejnych przyrostów o zmniejszonej szerokości względem wcześniejszego okresu. Redukcją silną definiowano jako sytuację, w której średnia szerokość przyrostów spadała do poziomu  $\leq 50\%$  średniej z trzech poprzedzających je przyrostów. Redukcją słabą określano analogicznie, przy czym szerokość pojedynczego przyrostu mieściła się w przedziale 30–50% tej wartości. Uzyskane sekwencje redukcji zestawiono następnie z wykresami szkieletowymi, co umożliwiło weryfikację datowania, ocenę spójności chronologii oraz identyfikację potencjalnych brakujących lub trudnych do rozpoznania przyrostów. Takie podejście znacząco zwiększyło precyzję analiz i wiarygodność wyników dendrochronologicznych, stanowiących podstawę dalszych interpretacji środowiskowych.



## Polska – Słowacja

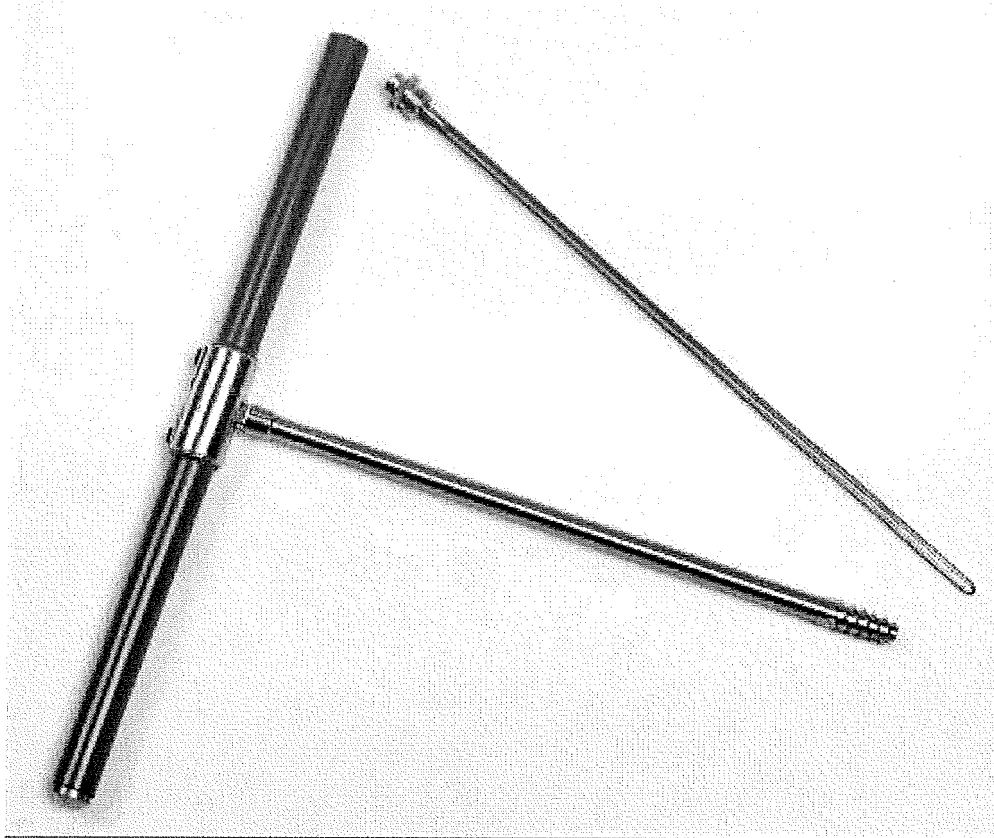
*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*



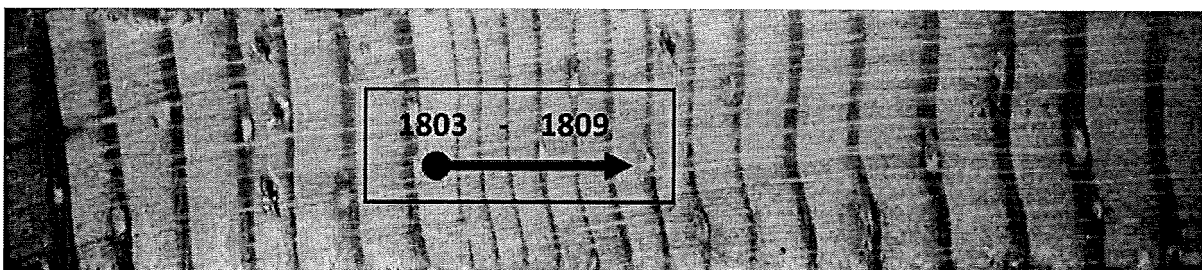
Rycina 1. Miejsce poboru prób z drzew zaznaczone na mapie topograficznej (górna mapa) i na ortofotomapie (dolna mapa).

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*



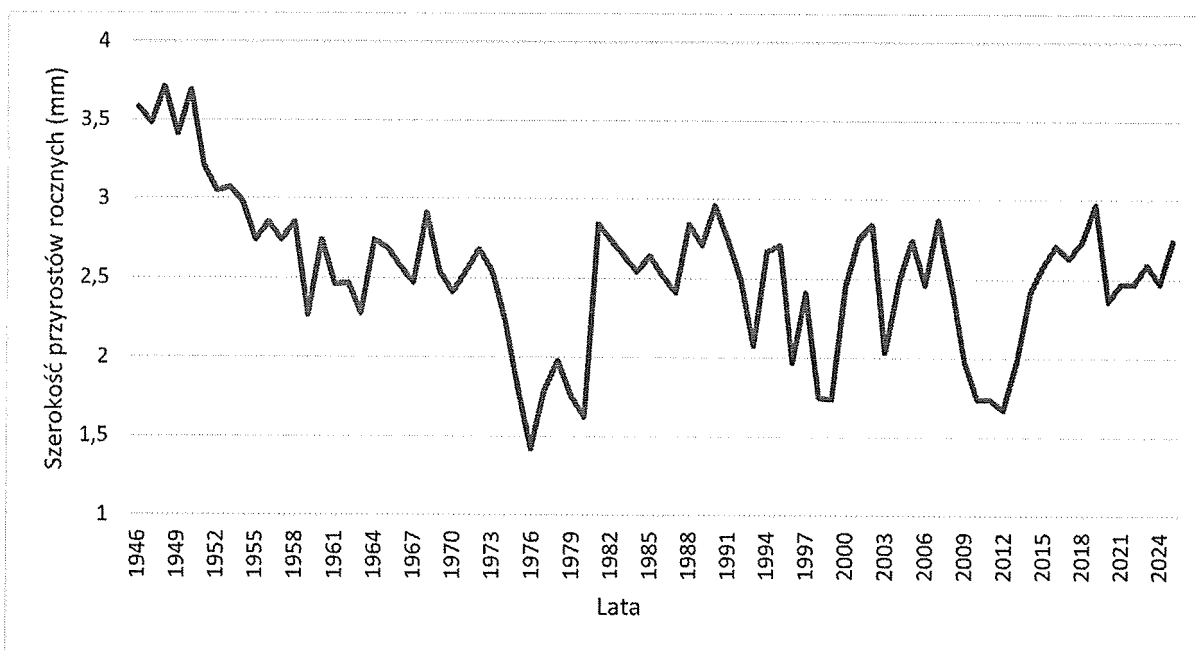
Rycina 2. Świder Presslera składający się z rączki, części rdzeniującej i łyżki do wyciągania rdzenia.



Rycina 3. Przykład redukcji przyrostów rocznych (redukcje przyrostów rocznych zaznaczono prostokątem)

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*



Rycina 4. Chronologia utworzona dla wszystkich opróbowanych drzew w czasie testu badawczego.

### 3. Wyniki badań w postaci obliczeniowej oraz niezbędną dokumentację w postaci tabel, wykresów i rysunków

Analiza przyrostów rocznych drzew objętych badaniem wykazała, że w niektórych latach doszło do wykształcenia pojedynczych, wyraźnie zredukowanych stojów rocznych. Zjawisko to ma charakter epizodyczny i wyróżnia się na tle ogólnej dynamiki wzrostu. W opracowanej w trakcie badań chronologii szczególnie wyraźnie zaznaczają się lata 1959, 1963, 1976, 1980, 1998, 1998 oraz 2003, w których odnotowano wystąpienie silnych redukcji przyrostów rocznych. W analizowanych sezonach drzewa reagowały w sposób jednoznaczny, tworząc wyjątkowo wąskie przyrosty, co wskazuje na oddziaływanie krótkotrwałych, lecz intensywnych czynników stresowych. Przyrost roczny drzew kształtowany jest w wyniku złożonego oddziaływania licznych czynników środowiskowych, biologicznych oraz antropogenicznych, które wspólnie determinują

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

tempo oraz przebieg procesów wzrostowych. Do najistotniejszych należą czynniki klimatyczne, przede wszystkim temperatura powietrza oraz suma i rozkład opadów atmosferycznych. Temperatura wpływa na długość i intensywność okresu wegetacyjnego, natomiast dostępność wody warunkuje prawidłowy przebieg podstawowych procesów fizjologicznych, takich jak fotosynteza czy transpiracja. Zarówno niedobory wody, związane z występowaniem susz, jak i jej nadmiar mogą prowadzić do ograniczenia przyrostu radialnego. Istotną rolę odgrywają również warunki glebowe, obejmujące żyzność, strukturę, wilgotność oraz głębokość gleby. Czynniki te decydują o dostępności składników pokarmowych oraz możliwościach rozwoju systemu korzeniowego, co bezpośrednio przekłada się na potencjał wzrostowy drzewa. Znaczenie ma także odczyn gleby (pH), który wpływa na przyswajalność makro- i mikroelementów oraz ogólną kondycję roślin. Kolejną grupę stanowią czynniki siedliskowe, takie jak ekspozycja stoku, nachylenie terenu czy wysokość nad poziomem morza. Determinują one warunki świetlne, termiczne oraz bilans wodny siedliska, a tym samym oddziałują na dynamikę przyrostów rocznych. W obszarach górskich szczególnie istotne są skrócony okres wegetacyjny oraz duża zmienność warunków pogodowych, które mogą prowadzić do częstszych zaburzeń wzrostu. Nie bez znaczenia pozostają również czynniki biotyczne, w tym konkurencja między drzewami o światło, wodę i składniki pokarmowe. W warunkach dużego zagęszczenia drzewostanu ograniczony dostęp do zasobów może skutkować obniżeniem przyrostów. Dodatkowo istotny wpływ wywierają organizmy szkodliwe, takie jak owady czy patogeny grzybowe, które osłabiają drzewa i mogą prowadzić do spadku ich aktywności wzrostowej. W przypadku analizowanych drzew można przypuszczać, że redukcje przyrostów rocznych odnotowane w latach 1959, 1963, 1976, 1980, 1998, 1998 oraz 2003 były w głównej mierze związane z oddziaływaniem niekorzystnych warunków klimatycznych, w szczególności okresowych susz oraz przymrozków wiosennych. Czynniki te mogły prowadzić do krótkotrwałego, lecz intensywnego stresu środowiskowego, skutkującego powstawaniem wąskich słoju rocznych. Niewykluczone jest również, że obserwowane redukcje były częściowo powiązane z oddziaływaniem zanieczyszczeń powietrza, które mogły dodatkowo osłabiać drzewa i potęgować ich reakcję na stres klimatyczny.

Analiza opracowanej chronologii pozwoliła wyróżnić trzy okresy redukcji przyrostów rocznych, pierwszy wystąpił w latach 1974-1981, drugi w okresie 1996-2000, a trzeci obejmowała czas pomiędzy 2009 a 2014 rokiem. Wszystkie trzy okresy cechują się stosunkowo krótkim czasem trwania. Redukcja pierwsza która wystąpiła w latach 70 XX i na początku lat 80 XX wieku, jest z pewnością związana z zanieczyszczeniem powietrza, które wystąpiło w tym okresie i zostało udokumentowane w całej Europie. Głównym źródłem zanieczyszczeń były elektrownie węglowe, hutnictwo oraz przemysł ciężki, które emitowały znaczne ilości dwutlenku siarki (SO<sub>2</sub>), tlenków

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

azotu ( $\text{NO}_x$ ) oraz pyłów. Jednym z najważniejszych mechanizmów oddziaływania było bezpośrednio uszkodzenie aparatu asymilacyjnego. Zanieczyszczenia gazowe, szczególnie  $\text{SO}_2$ , przenikały do wnętrza igieł przez aparaty szparkowe, powodując uszkodzenia komórek, chlorozy oraz nekrozy. W efekcie dochodziło do ograniczenia powierzchni aktywnej fotosyntetycznie, co prowadziło do spadku produkcji asymilatów niezbędnych do przyrostu drewna. Skutkiem tego były wyraźnie węższe słoje roczne. Drugim istotnym procesem było zakwaszenie gleb, wynikające z depozycji kwaśnych opadów. Związki siarki i azotu, reagując w atmosferze z wodą, tworzyły kwasy, które następnie trafiały do gleby. Prowadziło to do wypłukiwania ważnych składników pokarmowych, takich jak wapń i magnez, oraz zwiększenia dostępności toksycznych pierwiastków, zwłaszcza glinu. Taka zmiana warunków glebowych negatywnie wpływała na system korzeniowy, ograniczając pobieranie wody i składników mineralnych, co bezpośrednio przekładało się na zmniejszenie przyrostów radialnych. Kolejnym ważnym aspektem było osłabienie ogólnej kondycji drzew. Długotrwałe oddziaływanie zanieczyszczeń powodowało stres fizjologiczny, który nie zawsze prowadził do natychmiastowego zamierania drzew, ale skutkował ich stopniowym osłabieniem. W takim stanie drzewa stawały się bardziej podatne na inne czynniki stresowe, takie jak susze, przymrozki czy ataki szkodników. W rezultacie nawet umiarkowane warunki niekorzystne mogły wywoływać silniejsze reakcje przyrostowe niż w przypadku drzew zdrowych. Zanieczyszczenia emitowane w regionach uprzemysłowionych były przenoszone przez masy powietrza na znaczne dystanse, docierając także do obszarów górskich i leśnych oddalonych od źródeł emisji. W związku z tym redukcje przyrostów obserwowano również w miejscach uznawanych za relatywnie czyste. W efekcie działania tych procesów w latach 70. XX wieku często dochodziło do powstawania serii wąskich stojów rocznych, odzwierciedlających pogorszenie warunków wzrostu. Redukcje te miały charakter zarówno bezpośredni (wynikający z uszkodzeń tkanek), jak i pośredni (związany ze zmianami właściwości gleby i osłabieniem drzew), co czyniło wpływ zanieczyszczeń powietrza jednym z kluczowych czynników ograniczających przyrosty roczne w tym okresie.

Badane drzewa zapisały także stres środowiskowy w postaci dwóch kolejnych okresów redukcji przyrostów rocznych: Redukcje te były krótkie i obejmowały lata 1996-2000 i 2009- 2014. Tak krótkie okresy redukcji raczej nie wynikają z zanieczyszczenia powietrza. Raczej są one związane z jakimiś krótkotrwałymi czynnikami środowiskowymi oddziaływującymi na drzewa, np. okresową gradacją owadów, czy chorobami grzybowymi. Bardzo często zdarza się że czynniki środowiskowe nakładają się na siebie, lub występują cyklicznie, co daje obraz w postaci pogłębiających się redukcji przyrostów rocznych występujących po sobie. Głębokie ale krótkie redukcje przyrostów rocznych drzew rzadko są wynikiem oddziaływania pojedynczego czynnika środowiskowego. Najczęściej



## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

stanowią efekt nakładania się kilku stresów, które występują jednocześnie lub w krótkiej sekwencji czasowej, prowadząc do silnego zaburzenia procesów fizjologicznych. Jednym z najczęstszych przykładów jest współwystępowanie suszy i wysokich temperatur. Niedobór wody ogranicza jej dostępność dla drzewa, natomiast podwyższona temperatura zwiększa intensywność transpiracji oraz zapotrzebowanie na wodę, co prowadzi do silnego stresu hydrologicznego, zamykania aparatów szparkowych i zahamowania fotosyntezy. Podobny efekt może wystąpić w przypadku kombinacji przymrozków wiosennych i suchego lata. Przymrozki uszkadzają młode, rozwijające się tkanki na początku sezonu wegetacyjnego, natomiast późniejszy deficyt wody uniemożliwia ich regenerację. W rezultacie drzewa funkcjonują w stanie osłabienia przez cały sezon, co skutkuje wykształceniem bardzo wąskich słoju rocznych. Również nadmiar opadów w połączeniu z niską temperaturą może prowadzić do ograniczenia przyrostów – nadmierne uwilgotnienie gleby powoduje niedotlenienie systemu korzeniowego, a niska temperatura dodatkowo ogranicza aktywność kambium i przebieg fotosyntezy. Kolejnym przykładem są sytuacje, w których gradacje owadów lub występowanie patogenów nakładają się na niekorzystne warunki klimatyczne. Uszkodzenie aparatu asymilacyjnego przez szkodniki w połączeniu z suszą lub niskimi temperaturami znacząco ogranicza zdolność drzewa do regeneracji i produkcji asymilatów. W warunkach górskich dodatkowym czynnikiem może być okiśc, czyli zaleganie ciężkiego, mokrego śniegu powodującego uszkodzenia mechaniczne koron, które w połączeniu z kolejnymi stresami środowiskowymi prowadzą do dalszego pogorszenia kondycji drzew.

### Literatura

Danek M. 2007. The influence of industry on scots pine stands in the south-eastern part of the Silesia–Kraków Upland (Poland) on the basis of dendrochronological analysis. *Water, Air and Soil Pollution* 185: 265–277.

Dębski B., Olecka A., Bebkiewicz K., Kargulewicz I., Rutkowski J., Zasina D., Zimakowska - Laskowska M., Żaczek M. 2015. Krajowy Bilans Emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE), Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.

Elling, W., Dittmar, Ch, Pfaffelmoser, K., Rotzer, T. 2009. Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. *Forest Ecology and Management* 25: 1175–1187.

## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

Malik I., Danek M., Marchwińska-Wyrwał E., Danek T., Wistuba M., Krąpiec M. 2012. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth Suppression and Adverse Effects on Human Health Due to Air Pollution in the Upper Silesian Industrial District (USID), Southern Poland. *Water and Soil Pollution* 223: 3345–3364.

Michalik P. 2009. Niska emisja-świadomość zagrożenia z niej wynikających wśród różnych grup społecznych na przykładzie rolników z powiatu płockiego i sierpeckiego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 40: 617–622.

Sensuła B., Wilczyński S., Opała M. 2015. Tree Growth and Climate Relationship: Dynamics of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Growing in the Near-Source Region of the Combined Heat and Power Plant During the Development of the Pro-Ecological Strategy in Poland. *Water Air Soil Pollution* 226: 220–237.

Starzyk J.R., Grodzki W., Capecki Z. 2005. Występowanie kornika drukarza *Ips typographus* (L.) w lasach zagospodarowanych i objętych statusem ochronnym w Gorcach. *Leśne Prace Badawcze* 1: 7–30.

#### *4. Wnioski z przeprowadzonych badań w formie opracowania zawierającego szczegółowe analizy wraz z szacunkiem dotyczącym zagrożenia występującego w testowanym terenie (osuwiskowego, powodziowego, związanego z zanieczyszczeniem powietrza zależnie od typu testu badawczego)*

Pojedyncze redukcje przyrostów rocznych w badanych drzewach wystąpiły w latach 1959, 1963, 1976, 1980, 1998, 1998 oraz 2003. Redukcje te nie mają z pewnością związku z zanieczyszczeniem powietrza, raczej są one związane z silnymi impulsami środowiskowymi powodujących stres dla analizowanych sosen manifestujący się w postaci trwających jeden rok redukcji przyrostów rocznych. Najbardziej prawdopodobne jest, że redukcje te powstały w efekcie oddziaływania wczesnowiosennych przymrozków lub też całorocznych susz.

Przeprowadzony test badawczy ujawnił występowanie aż trzech serii przyrostów rocznych, pierwszej w latach 1974-1981, drugiej w okresie 1996-2000 i trzeciej w latach 2009-2014. Za pierwszy z okresów redukcji odpowiadają zanieczyszczenie powietrza, które wystąpiły w całej



## Polska – Słowacja

*Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien*

Europie w latach 70 i 80 XX wieku. W tym czasie doszło do emisji zanieczyszczeń atmosferycznych na dużą skalę i nawet do masowego zamieniania drzewostanów. Zanieczyszczenia przemysłowe docierały na bardzo duże odległości i były powodem chorób drzew i redukcji i przerostów rocznych. Dwóch kolejnych okresów przyrostów rocznych, które wystąpiły w latach 90 XX wieku i w drugiej dekadzie XXI wieku nie należy wiązać z zanieczyszczeniem powietrza. Raczej były one powiązane z występowaniem stresogennych czynników środowiskowych, które mogły powodować redukcje przyrostów rocznych. Okresy występujących po sobie, krótkotrwałych redukcji mogą być powiązane na przykład z gradacją owadów, która występuje okresowo i powoduje redukcje przyrostów rocznych występujących w interwałach czasowych. Niezależnie od przyczyny wystąpienia opisywanych redukcji przyrostów rocznych nie ma podstaw do wystąpienia zagrożenia związanego z niską emisją w badanym obszarze. Drzewa nie zapisują w ostatnich latach redukcji przyrostów rocznych, które mogłyby zwiastować pogorszenie warunków środowiskowych i trwały uszczerbek na zdrowiu drzew powodujący wystąpienie redukcji przyrostów rocznych w przyszłości.

PREZES ZARZĄDU  
Oddział Górnośląski, Polskie  
Towarzystwo Przyjaciół Lasu i Ziemi  
Katowice, 09.03.2026  
*[Signature]*  
dr hab. Jerzy Cabala