


Interreg




Współfinansowany przez
UNIE EUROPEJSKĄ

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



INSTRUKCJA DO PRZEPROWADZENIA TESTU ZAGROŻENIA ZANIECZYSZCZENIEM POWIETRZA NOWOCZESNYMI METODAMI



Opis techniczny analizy zagrożenia związanego z zanieczyszczeniem powietrza z zastosowaniem metody pomiarów poprzez mobilne laboratorium

I. Instrukcja pozwalająca ocenić zagrożenie związane z zanieczyszczeniem powietrza z zastosowaniem metody pomiarów poprzez mobilne laboratorium

Krok 1. Planowanie wykonania pomiarów

Pierwszym etapem jest staranne zaplanowanie zadania pomiarowego. Trzeba ustalić, jaki jest cel pomiaru, a więc jakie zanieczyszczenia powinny być badane, w jakiej lokalizacji oraz w jakim okresie. Istotne jest także zdecydowanie, czy pomiar ma być przeprowadzony jednorazowo, czy w regularnych odstępach czasu. Następnie warto dokładnie przeanalizować mapę terenu i wybrać odpowiednie miejsca do pomiarów – najlepiej te, które będą reprezentatywne dla danego obszaru. Powinno się wziąć pod uwagę ewentualne przeszkody w terenie, takie jak budynki, drzewa czy linie energetyczne.

Krok 2. Dobór odpowiedniego dronu i czujników do badania zanieczyszczenia powietrza

W tym etapie ważne jest, aby wybrać dron, który nadaje się do przeprowadzenia badań środowiskowych. Powinien on mieć odpowiednią nośność, aby podnieść moduły pomiarowe (czujniki) oraz wystarczający czas lotu, by zrealizować całą misję bez potrzeby częstych lądowań. Istotne jest również zapewnienie zgodności systemów: czujniki powinny być połączone z dronem w taki sposób, aby umożliwić zbieranie danych. Typowe czujniki stosowane do oceny jakości powietrza zapewniają możliwość pomiarów m. in. PM2.5, PM10, NO₂, SO₂, CO, O₃, drony wyposażone są także w czujniki temperatury i wilgotności. Niezbędne jest, aby czujniki były kalibrowane i miały w dobry stan techniczny. Wybór sprzętu ma istotny wpływ na precyzję i rzetelność pomiarów. Poniżej przedstawiono przykład drona z zamontowanymi czujnikami do analizy zanieczyszczenia powietrza oraz przykład drona wykorzystywanego do transportu sprzętu pomiarowego pozwalającego ocenić jakość powietrza.

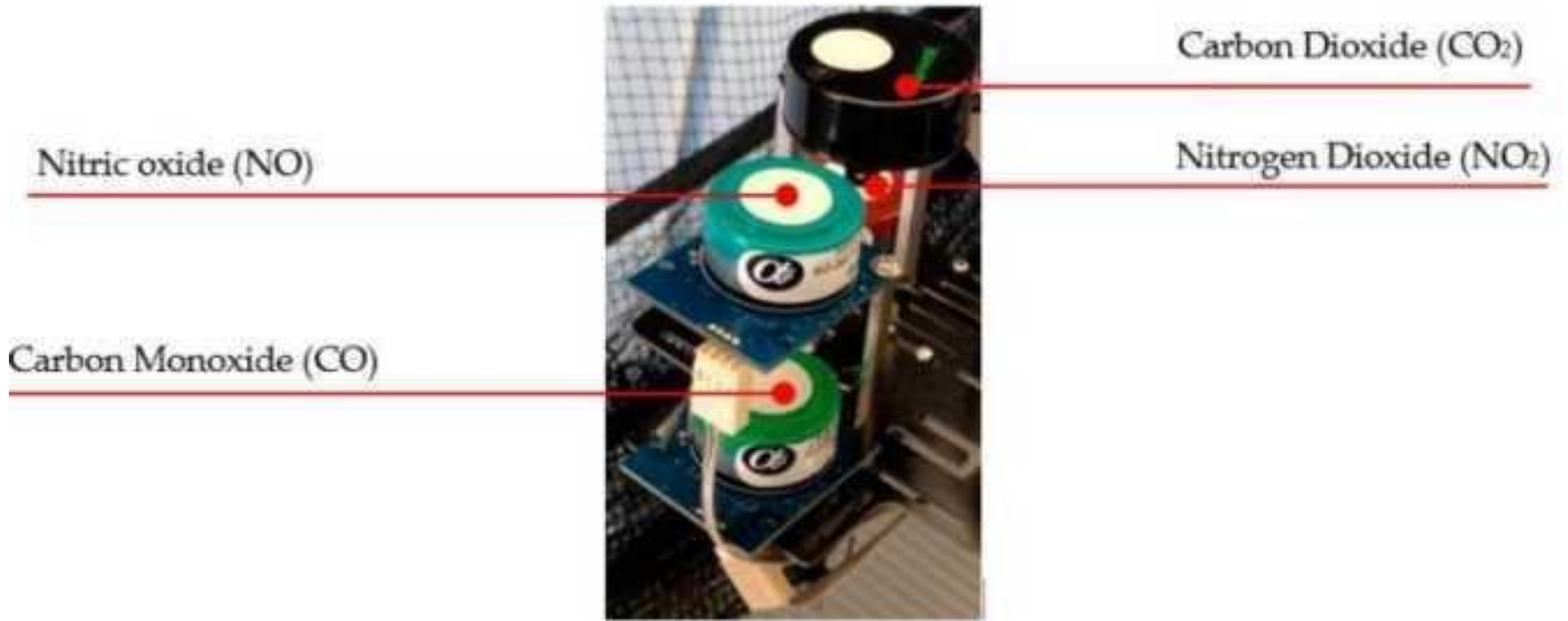


Krok 3. Przygotowanie uprzednio skompletowanego sprzętu do lotu

Po wyborze dronu oraz czujników, trzeba przygotować cały sprzęt do pracy. W tym celu należy zweryfikować poziom naładowania akumulatorów, zarówno dronu, jak i urządzeń pomiarowych. Warto też upewnić się, że oprogramowanie odpowiedzialne za kontrolę lotu i rejestrację danych jest zaktualizowane i działa poprawnie. Kluczowe jest przeprowadzenie testów czujników przed lotem – na przykład w bezpiecznych warunkach przy ziemi. Wszystkie elementy muszą być mocno przymocowane, by uniknąć zakłóceń w pomiarach spowodowanych drganiami. Tuż przed startem dobrze jest również sprawdzić prognozę pogody, aby nie narażać misji na niepowodzenie z powodu silnego wiatru lub opadów. Poniżej przedstawiono przykład drona wykorzystywanego do transportu sprzętu pomiarowego pozwalającego ocenić jakość powietrza.



Poniżej przedstawiono przykład drona z zamontowanymi czujnikami do analizy zanieczyszczenia powietrza.



Krok 4. Przeprowadzenie testowego lotu kalibracyjnego

Zanim zaczniemy główne pomiary, należy wykonać krótki testowy lot. To pozwala ocenić, czy wszystkie systemy działają prawidłowo w realnych warunkach, a czujniki zbierają dane tak, jak powinny. W trakcie testu warto zwrócić uwagę na stabilność podczas lotu, funkcjonowanie GPS oraz interakcję z systemem naziemnym. Przydatne jest także porównanie wyników z czujników dronu z danymi referencyjnymi, na przykład ze stacji monitorującej, aby wstępnie ocenić dokładność pomiarów. Testowy lot może ujawnić błędy w ustawieniach, które łatwiej naprawić na etapie prób niż w trakcie właściwej misji pomiarowej. Przeprowadzenie testowego lotu kalibracyjnego to kluczowy krok, który zwiększa wiarygodność całego procesu pomiarowego.

Krok 5. Przeprowadzenie lotu pomiarowego

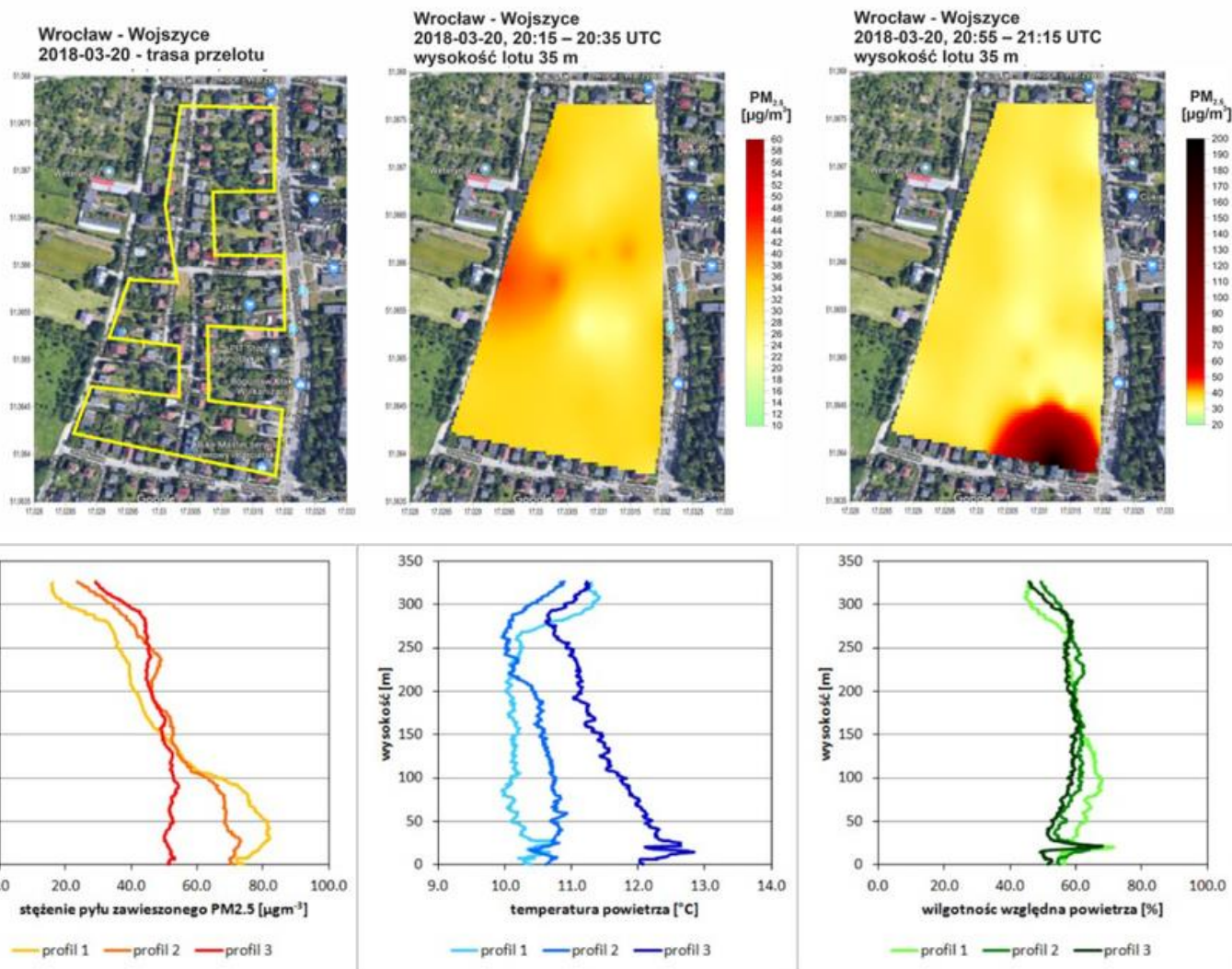
Podczas tego etapu dron wykonuje zaplanowaną misję pomiarową zgodnie z wcześniej ustalonym harmonogramem. Operator monitoruje przebieg lotu na ekranie, śledząc trasę oraz parametry pracy dronu i czujników. Dron powinien poruszać się na ustalonej wysokości i prędkości, co zapewnia spójność danych. W czasie lotu czujniki zbierają dane o stężeniu zanieczyszczeń, temperaturze, wilgotności i innych parametrach powietrza. Informacje mogą być zapisywane na karcie pamięci lub przesyłane w czasie rzeczywistym do komputera naziemnego. Należy również monitorować poziom baterii i w razie potrzeby bezpiecznie sprowadzić dron na lądowisko. Poniżej przedstawiono przykład drona podczas lotu mającego na celu ocenę jakości powietrza oraz matrycę odczytu jakości powietrza z wartościami w poszczególnych kategoriach zanieczyszczeń informującą o przekroczeniach norm (AIRDron firmy SOFTBlue)



Krok 7. Opracowanie wyników i ich wizualizacja

Zebrane dane należy przekształcić w czytelną formę, np. wykresy, mapy cieplne czy raporty tekstowe. W tym celu używa się narzędzi analitycznych i GIS, które pozwalają odwzorować przestrzenny rozkład zanieczyszczeń. Wizualizacja wyników ułatwia interpretację danych, identyfikację źródeł emisji i stref szczególnego zagrożenia. Opracowanie wyników powinno również uwzględniać warunki meteorologiczne i kontekst środowiskowy. Na tym etapie warto przygotować wnioski i rekomendacje, np. dla lokalnych władz lub mieszkańców. Dobre opracowanie wyników decyduje o tym, czy dane będą przydatne dla dalszych działań.

Poniżej przedstawiono przestrzenny rozkład zanieczyszczenia powietrza wyznaczonego na podstawie badań z wykorzystaniem dronu (rycina górna). Wyniki pomiarów zanieczyszczenia powietrza przeprowadzonego z użyciem dronu (rycina dolna).



Krok 8. Sporządzenie raportu końcowego

Ostatnim krokiem jest przygotowanie pełnej dokumentacji z pomiarów. Powinna ona zawierać szczegółowy opis metodyki, sprzętu, warunków pomiarowych oraz kompletne dane i analizy. Ważne jest również uwzględnienie wszelkich problemów napotkanych podczas pomiarów i sposobów ich rozwiązania. Raport końcowy może zostać udostępniony zainteresowanym stronom – np. jednostkom samorządowym, organizacjom ekologicznym czy instytucjom naukowym. Warto też zarchiwizować wszystkie dane na bezpiecznych nośnikach, by można było do nich wrócić w przyszłości. Taka dokumentacja zwiększa transparentność pomiarów i umożliwia ich powtórzenie lub porównanie z przyszłymi danymi.

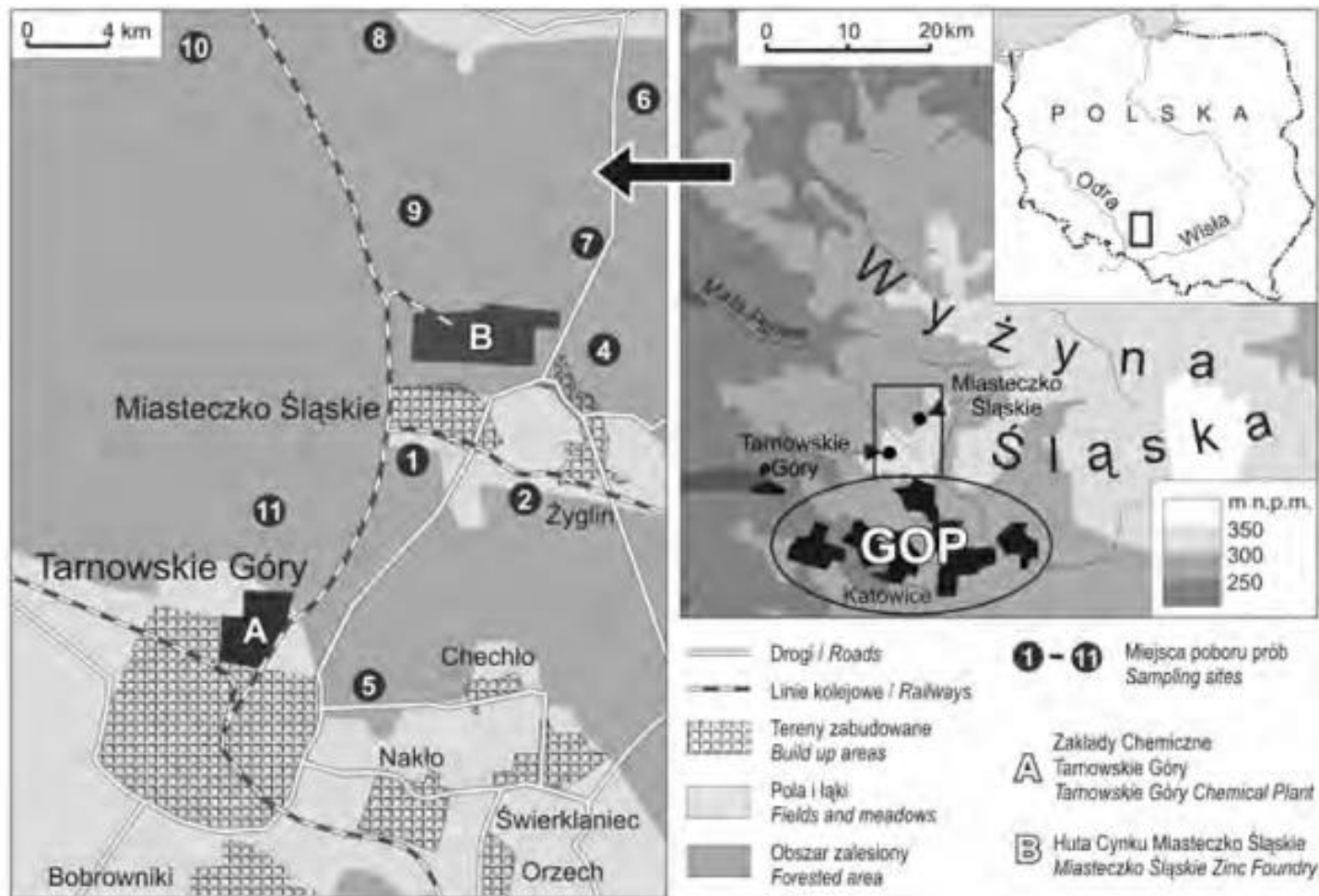
Opis techniczny analizy zagrożenia związanego z zanieczyszczeniem powietrza z zastosowaniem metody pomiarów poprzez bioindykację (analizę redukcji przyrostów rocznych drzew i analizy koncentracji poszczególnych zanieczyszczeń w słojach)

II. Instrukcja pozwalająca ocenić zagrożenie związane z zanieczyszczeniem powietrza z zastosowaniem metody pomiarów poprzez bioindykację (analizę redukcji przyrostów rocznych drzew i analizy koncentracji poszczególnych zanieczyszczeń w słojach)

Krok 1. Określenie celu i zakresu badań

Pierwszym etapem jest określenie celu rekonstrukcji, na przykład analiza zmian w poziomie metali ciężkich lub emisji przemysłowych w poprzednich latach. Ważne jest także określenie, jaki okres czasu ma być analizowany oraz w jakim regionie. Zwykle bada się obszary znajdujące się blisko miejsc emitujących zanieczyszczenia, takich jak obszary miejskie czy zakłady przemysłowe (Rycina 9). Istotne jest, aby ustalony zakres czasowy był realistyczny w kontekście dostępności wystarczająco starych drzew. Wiek drzew można sprawdzić na mapach leśnych, które zawierają informacje o wieku drzewostanu w poszczególnych oddziałach leśnych. Należy również wybrać właściwe wskaźniki zanieczyszczenia, jakie można zbadać w słojach drzew, takie jak ołów (Pb), kadm (Cd), siarka (S).

Poniżej przedstawiono lokalizację przykładowych stanowisk (1-11) położonych w sąsiedztwie dwóch dużych zakładów zanieczyszczających atmosferę: Zakładów Chemicznych Tarnowskie Góry (A) i Huty Cynku Miasteczko Śląskie (B).



Krok 2. Wybór odpowiednich lokalizacji i gatunków drzew do opróbowania

W następnym etapie dokonuje się wyboru miejsc, z których będą pobierane próbki. Najlepsze do tego są tereny różniące się poziomem zanieczyszczenia – na przykład obszary przemysłowe oraz miejsca kontrolne, oddalone od źródeł emisji. Kluczowe jest, aby dany teren był ekologicznie stabilny i nie podlegał wpływowi innych czynników, takich jak pożary czy powodzie. Wybór gatunków drzew ma również istotne znaczenie – najlepsze efekty daje opróbowanie drzew o długiej żywotności, jednocześnie wrażliwych na stres zewnętrzny, takich jak sosna czy świerk. Drzewa muszą być zdrowe, bez uszkodzeń i z wyraźnie widocznymi słojami rocznymi. Zarówno miejsce, jak i gatunek drzewa mają wpływ na jakość danych dendrochronologicznych. Na kolejnym slajdzie przedstawiono brzozy zniszczone pod wpływem zanieczyszczenia powietrza (rycina górna) oraz karłowate sosny zniszczone pod wpływem zanieczyszczenia powietrza, w tle widoczne kominy z huty w Miasteczku Śląskim (rycina dolna).



Interreg



Współfinansowany przez
UNIE EUROPEJSKĄ

Polska – Słowacja

Krok 3. Pobór prób z drzew (pobór rdzeni przyrostowych)

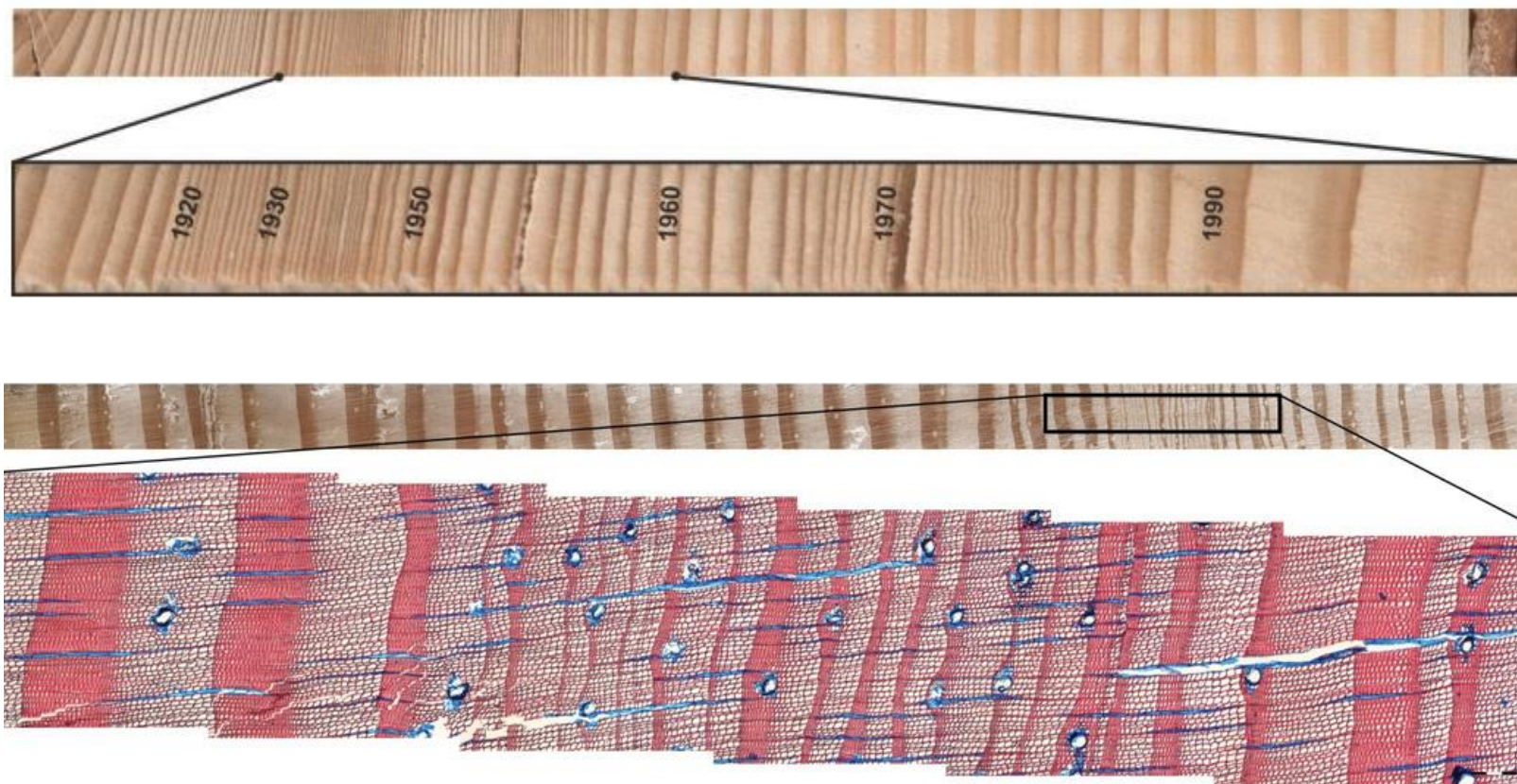
Do pobierania materiału badawczego stosuje się przyrząd zwany świdrem Presslera, który umożliwia odwiercenie cienkiego rdzenia z pnia drzewa. Próbki są zbierane na wysokości 1,3 metra, czyli na wysokości tzw. pierśnicy, zazwyczaj z dwóch stron drzewa, co zwiększa ich reprezentatywność. Ważne jest, aby zachować ostrożność, by nie uszkodzić rdzenia ani nie wprowadzić zanieczyszczeń do próbki. Każda próbka musi być dokładnie opisana. Pudełko do którego chowa się rdzenie powinno mieć zapisane datę, miejsce, gatunek oraz numer drzewa. Po pobraniu rdzenie są suszone w odpowiednich warunkach, aby uniknąć ich deformacji. Na kolejnym slajdzie przedstawiono przykłady świdra Presslera.



Krok 4. Przygotowanie próbek do analizy

Po wysuszeniu rdzenie są starannie oszlifowywane papierem ściernym o różnych gradacjach. Stosowane są papiery ścierne o następujących gradacjach: 100, 250, 500 i 1000. Celem szlifowania jest uzyskanie wyraźnych słoików rocznych, które umożliwią dokładne datowanie każdego przyrostu rocznego. Następnie przeprowadza się wstępne oględziny mikroskopowe w celu identyfikacji anomalii lub uszkodzeń drewna. Często stosuje się także techniki skanowania lub obrazowania cyfrowego w wysokiej rozdzielczości lub nawet sporządza się preparaty mikroskopowe. Część rdzenia może zostać przeznaczona do dalszych analiz chemicznych, więc istotne jest zabezpieczenie próbek przed zanieczyszczeniem zewnętrznym.

Poniżej przedstawiono przeszlifowane rdzenie z widocznymi granicami przyrostów rocznych (rycina górna) oraz preparat mikroskopowy wykonany z rdzenia pobranego z drzewa (rycina dolna).

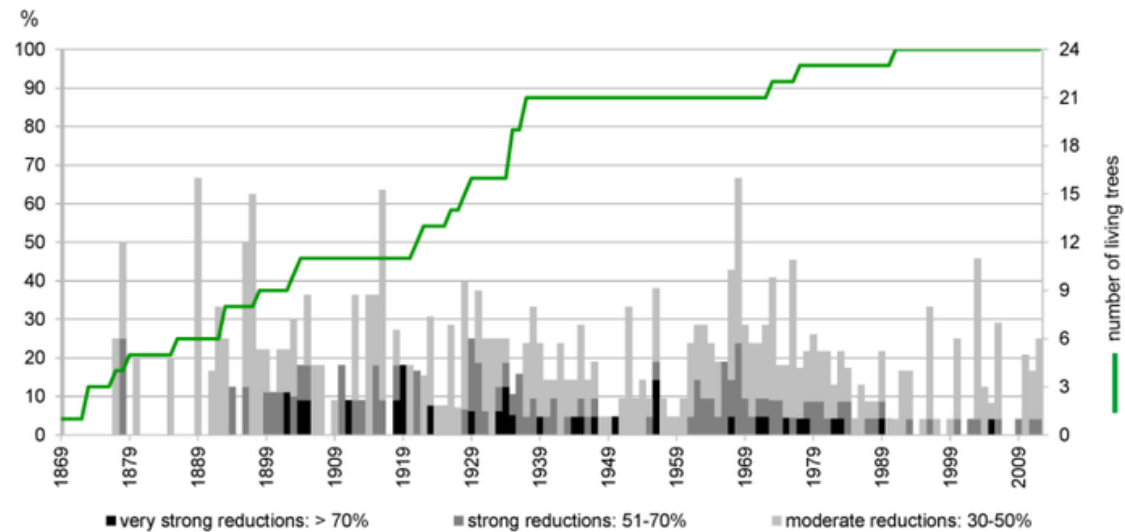
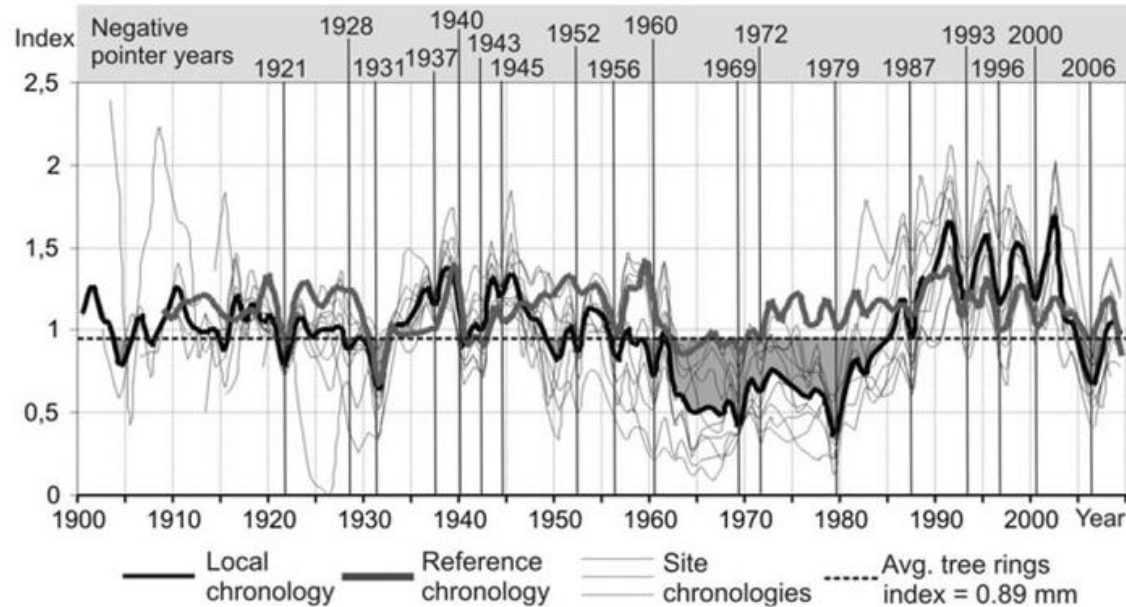


Krok 5. Datowanie słojów przyrostowych i opracowanie chronologii

W tym etapie analizuje się szerokość poszczególnych słojów rocznych, aby określić ich wiek. Za pomocą tzw. przyrostomierza wykonuje się pomiarów szerokości poszczególnych słojów (Rycina 16). Umożliwia to precyzyjne przypisanie każdego przyrostu do konkretnego roku kalendarzowego. Dla każdego pobranego rdzenia powstają wykresy przyrostów rocznych. Gdy poszczególne wykresy z różnych drzew zostaną dopasowane, tworzy się lokalną chronologię (Rycina 17). Chronologia jest tworzona poprzez uśrednienie szerokości przyrostów rocznych lat dla poszczególnych lat z każdego rdzenia. Chronologia jest poddana najczęściej procesowi standaryzacji tak, aby wyeliminować trend wiekowy. Standaryzacja wykonywana jest poprzez wykorzystanie darmowego programu Cofecha. Budowa chronologii pozwala na identyfikację lat o zredukowanym przyroście, które mogą świadczyć o wpływie zanieczyszczeń powietrza na drzewo (Rycina 18). Zwykle przyrosty roczne powstające w okresie silnego zanieczyszczenia środowiska są znacznie węższe niż te kształtowane bez wpływu zanieczyszczenia powietrza.



Poniżej przedstawiono przykład lokalnej chronologii dendrochronologicznej (rycina górna) oraz przykład wykresu redukcji przyrostów rocznych (rycina dolna).



Krok 6. Analiza chemiczna prób drewna

Z wcześniej wydatowanych fragmentów słoików pobiera się próbki do analizy chemicznej, dzieląc za pomocą skalpela każdy ze słoików na poszczególne lata. Najczęściej używane są metody spektrometryczne, np. ICP-MS (spektrometria mas z plazmą sprzężoną indukcyjnie), które pozwalają na dokładne oznaczenie stężenia pierwiastków. Każdy słoik reprezentuje jeden rok, więc możliwa jest rekonstrukcja zmian stężeń zanieczyszczeń w czasie. W analizie uwzględnia się także zawartość izotopów stabilnych (np. izotopy węgla czy tlenu), które dostarczają dodatkowych informacji o warunkach środowiskowych. Próbki muszą być przygotowane w warunkach laboratoryjnych minimalizujących ryzyko zanieczyszczenia. Ten etap dostarcza kluczowych danych do oceny poziomu zanieczyszczenia w konkretnych latach.

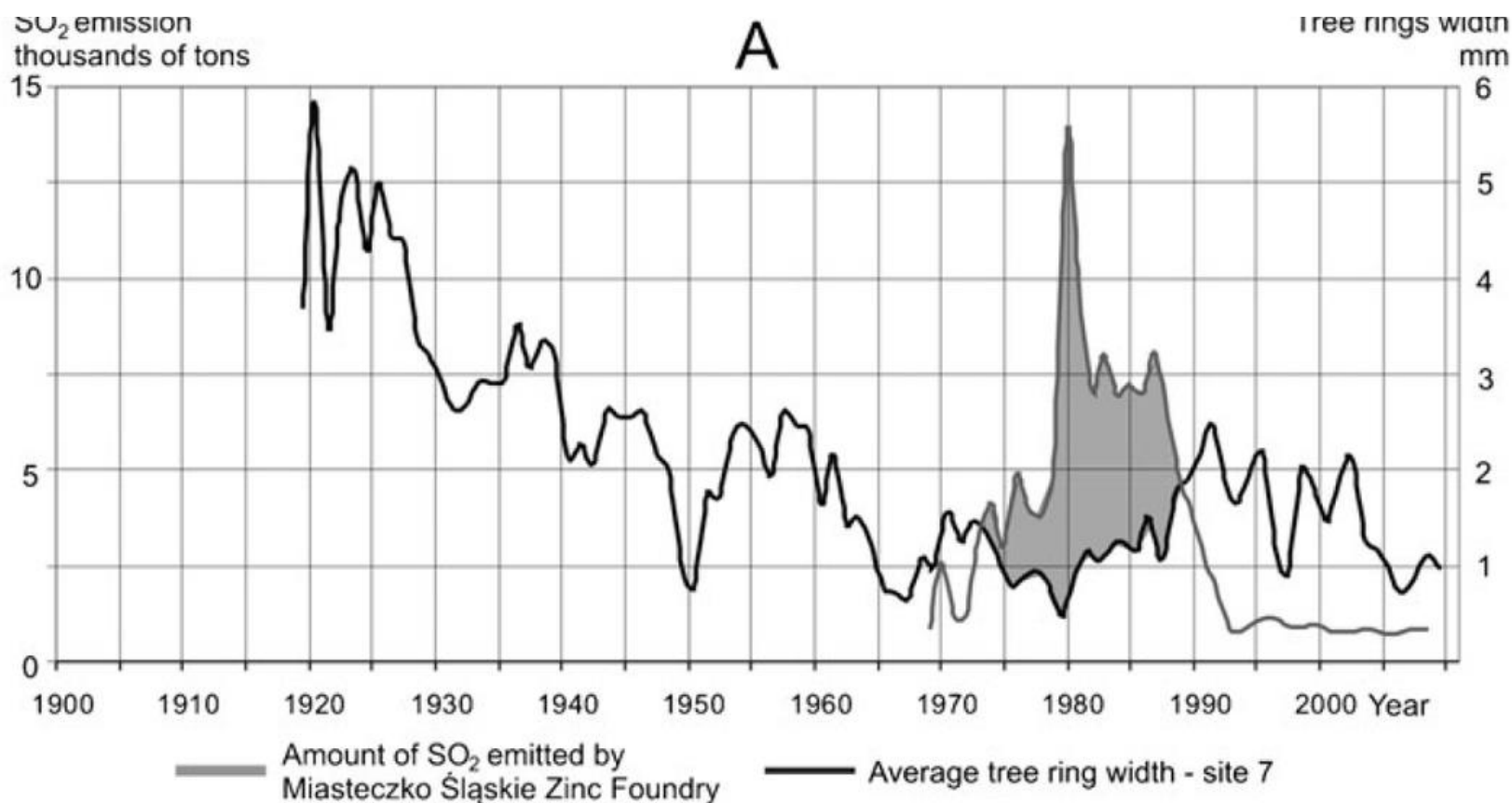
Krok 7. Korelacja danych przyrostowych i chemicznych

Po uzyskaniu danych o szerokości słoików i zawartości pierwiastków, przeprowadza się analizę statystyczną. Celem analizy jest znalezienie zależności między zmianami przyrostów a stężeniami zanieczyszczeń. Na przykład zmniejszona szerokość słoików może korelować z podwyższonym stężeniem ołowiu lub SO_2 . Dane są porównywane także z zewnętrznymi źródłami – np. historycznymi zapisami o działalności przemysłowej lub danymi meteorologicznymi. W analizie wykorzystuje się metody regresji, analizy głównych składowych (PCA) czy też testy korelacyjne. To kluczowy etap dla interpretacji wpływu zanieczyszczeń na rozwój drzew.

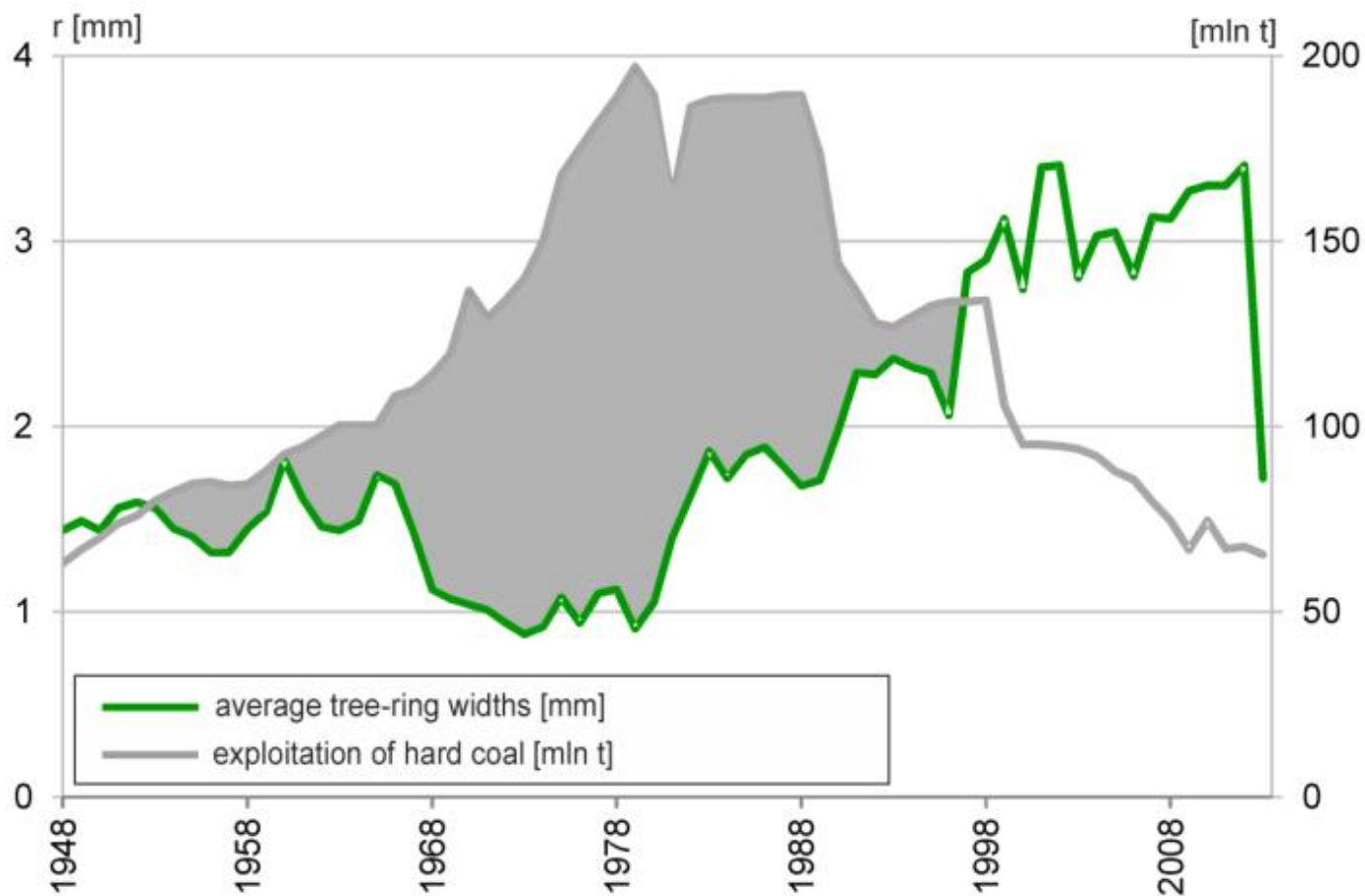
Krok 8. Rekonstrukcja poziomu zanieczyszczenia w przeszłości

Na podstawie uzyskanych wyników tworzy się model zmian zanieczyszczeń w czasie. Wykresy pokazują, w których latach stężenie danego pierwiastka było najwyższe, co można powiązać z aktywnością przemysłową, np. hutnictwem czy spalaniem paliw kopalnych. Czasem obserwuje się także spadki poziomu zanieczyszczeń – np. po wprowadzeniu regulacji środowiskowych. Takie rekonstrukcje mogą obejmować nawet kilkaset lat, w zależności od wieku drzew. Dendrochemiczne dane są wtedy zestawiane z innymi źródłami historycznymi, co zwiększa ich wartość interpretacyjną.

Poniżej przedstawiono porównanie wykresów redukcji przyrostów rocznych (czarny kolor) i wykresu emisji dwutlenku siarki z zakładu przemysłowego (Huta Cynku Miasteczko Śląskie).



Poniżej przedstawiono odwrotną proporcjonalność pomiędzy szerokościami przyrostów rocznych, a wydobywaniem węgla kamiennego.



Krok 9. Opracowanie wyników i upowszechnienie wniosków

Na koniec przygotowuje się kompleksowy raport z wynikami badań. Zawiera on opis metod, analiz, wykresy zmian zanieczyszczeń oraz ich interpretację w kontekście historycznym. Dane są często publikowane w czasopismach naukowych lub raportach dla instytucji zajmujących się ochroną środowiska. Część informacji może być także przedstawiona w formie interaktywnych map i grafik dla szerszego odbiorcy. Opracowanie wyników powinno również wskazywać na ograniczenia metody i możliwości dalszych badań. Publikacja wyników umożliwia wykorzystanie tych danych przez inne zespoły badawcze oraz instytucje odpowiedzialne za monitoring środowiska.

Opis ograniczeń i preferencji zastosowania metody pomiarów poprzez mobilne laboratorium

Ograniczenia zastosowania mobilnego laboratorium:

1. Ograniczony czas lotu

Większość dostępnych dronów, szczególnie tych klasy przemysłowej z zamontowanymi czujnikami pomiarowymi, ma ograniczony czas pracy – zwykle od 20 do 40 minut. Wynika to głównie z ograniczonej pojemności baterii oraz dodatkowego obciążenia związanego z sensorami. Krótki czas lotu może utrudniać długotrwałe lub wielkopowierzchniowe badania, szczególnie gdy trzeba wykonać wiele przelotów. W przypadku większych obszarów konieczne są częste powroty do bazy i wymiana akumulatorów, co ogranicza efektywność pracy.

2. Warunki pogodowe

Drony są bardzo wrażliwe na niekorzystne warunki atmosferyczne, takie jak silny wiatr, opady deszczu lub śniegu, a także niskie temperatury. W takich warunkach może dojść do utraty stabilności lotu, zakłóceń w działaniu sensorów lub nawet awarii urządzenia. Część dronów nie ma odpowiedniego stopnia ochrony IP, co oznacza, że nie mogą być używane w wilgotnym środowisku. W praktyce oznacza to ograniczenia w możliwości prowadzenia pomiarów w każdej porze roku i o każdej godzinie.

3. Ograniczenia prawne i regulacyjne

W wielu krajach obowiązują surowe przepisy dotyczące korzystania z dronów – szczególnie w przestrzeni miejskiej, w pobliżu lotnisk, elektrowni czy zakładów przemysłowych. Wymagane są licencje, zgody lotnicze, a także często obowiązuje konieczność zgłoszenia lotów do odpowiednich organów. Często trzeba też unikać lotów nocnych lub przekraczania ustalonej wysokości lotu (np. 120 m nad ziemią). Przepisy te znacząco ograniczają elastyczność i swobodę korzystania z dronów w badaniach środowiskowych.

4. Ograniczona ładowność

Drony mają ograniczoną nośność, co wpływa na liczbę i wagę urządzeń, które można na nich zainstalować. Zaawansowane czujniki chemiczne (np. do pomiaru NO_x, SO₂ czy lotnych związków organicznych) mogą być ciężkie i wymagać dodatkowego zasilania. Oznacza to konieczność wyboru między zasięgiem lotu a zakresem pomiarów. W praktyce może to ograniczać dokładność i kompleksowość zbieranych danych.

5. Zakłócenia sygnału i problemy z transmisją danych

W obszarach zurbanizowanych lub górskich często dochodzi do zakłóceń sygnału GPS oraz transmisji danych między dronem a operatorem. Zakłócenia te mogą prowadzić do utraty kontroli nad dronem, błędnych pomiarów lokalizacji lub przerwania rejestracji danych. W niektórych przypadkach dane zebrane w czasie lotu są przechowywane lokalnie i dopiero później przesyłane do analizy, co utrudnia monitoring w czasie rzeczywistym. Jest to szczególnie problematyczne podczas sytuacji interwencyjnych, gdzie liczy się szybki dostęp do informacji.

Preferencje zastosowania mobilnego laboratorium:

1. Trudnodostępne lub niebezpieczne miejsca

Drony umożliwiają bezpieczne przeprowadzenie pomiarów w rejonach, do których człowiek nie ma łatwego dostępu – np. na dużych wysokościach, nad kominami, w pobliżu wulkanów, pożarów czy zakładów przemysłowych. Dzięki temu możliwe jest zbieranie danych bez narażania ludzi na ryzyko. W takich warunkach drony mogą również omijać fizyczne przeszkody, poruszając się precyzyjnie w trójwymiarowej przestrzeni. Jest to ogromna zaleta zwłaszcza w przypadku inspekcji infrastruktury krytycznej lub reagowania kryzysowego.

2. Szybka i elastyczna mobilność

Drony można bardzo szybko uruchomić i przemieścić w miejsce pomiarów, co czyni je idealnym narzędziem do działań interwencyjnych i monitorowania nagłych zdarzeń (np. wycieku substancji toksycznych). Można je wykorzystać do szybkiego określenia źródła emisji zanieczyszczeń lub śledzenia ich rozprzestrzeniania się. Ich mobilność pozwala również na wykonywanie wielu punktowych pomiarów w krótkim czasie, co zwiększa dokładność przestrzenną danych. Tego typu elastyczność jest trudna do osiągnięcia przy użyciu stacjonarnych stacji pomiarowych.

3. Pomiar przestrzenne 3D (wysokościowe)

Drony umożliwiają zbieranie danych z różnych wysokości, co pozwala analizować, jak rozkładają się zanieczyszczenia w pionie – od poziomu gruntu po wyższe warstwy atmosfery. Tego typu dane są bardzo cenne dla modelowania dyspersji zanieczyszczeń i oceny ich wpływu na zdrowie ludzi oraz środowisko. Drony mogą wykonywać loty warstwowe lub spiralne, dostarczając kompleksowy obraz pionowego profilu powietrza. Tradycyjne stacje naziemne nie są w stanie uzyskać takiej informacji bez specjalistycznych balonów lub samolotów.

4. Zastosowanie w badaniach krótkoterminowych i interwencyjnych

Drony są idealnym narzędziem do pomiarów w przypadku incydentów środowiskowych, takich jak pożary, awarie przemysłowe, nielegalne spalanie odpadów czy smog epizodyczny. Pozwalają na szybkie zebranie danych w miejscu zdarzenia i ocenę zagrożenia dla ludzi i środowiska. W porównaniu do klasycznych metod pomiarowych, które wymagają wcześniejszej instalacji i kalibracji, drony mogą działać natychmiastowo. Dzięki temu zwiększają skuteczność reagowania służb środowiskowych i ratunkowych.

5. Brak potrzeby instalacji stałej infrastruktury

Drony nie wymagają budowy kosztownych stacji monitorujących ani prowadzenia długoterminowych inwestycji infrastrukturalnych. Są mobilne, co pozwala na prowadzenie pomiarów tam, gdzie nie ma możliwości instalacji stałych czujników – np. w parkach narodowych, nad rzekami, w górach czy terenach wiejskich. To czyni je doskonałym narzędziem do czasowych kampanii badawczych lub pilotażowych projektów monitoringu jakości powietrza. Mobilność i brak konieczności ingerencji w teren pozwalają na łatwe dostosowanie się do różnych scenariuszy badawczych.

Opis ograniczeń i preferencji zastosowania metody pomiarów poprzez bioindykację (analizę redukcji przyrostów rocznych drzew i analizy koncentracji poszczególnych zanieczyszczeń w słojach)

Ograniczenia dendrochronologii w analizie zanieczyszczenia powietrza:

1. Niska rozdzielczość czasowa w porównaniu z nowoczesnymi metodami

Dendrochronologia umożliwia analizę zmian środowiskowych w ujęciu rocznym, ponieważ każdy słoje przyrostowy reprezentuje jeden rok życia drzewa. Nie pozwala jednak na uchwycenie krótkotrwałych wahań stężeń zanieczyszczeń, takich jak smogowe epizody trwające dni lub tygodnie. Tym samym metoda ta nie nadaje się do oceny dynamicznych zmian jakości powietrza, które wymagają większej rozdzielczości czasowej. Dla miejskiego monitoringu bieżącego ta ograniczona temporalność stanowi istotne utrudnienie.

2. Wrażliwość na czynniki inne niż zanieczyszczenie

Wzrost drzewa zależy od wielu zmiennych – nie tylko od poziomu zanieczyszczeń w powietrzu, ale także od warunków pogodowych (opady, temperatura), konkurencji z innymi roślinami, chorób czy obecności owadów. Oznacza to, że zmniejszenie przyrostów nie zawsze musi być efektem zanieczyszczenia środowiska. Taka wieloczynnikowość wpływów utrudnia jednoznaczną interpretację danych dendrochronologicznych. Konieczna jest dokładna analiza kontekstu ekologicznego, co zwiększa złożoność badań.

3. Brak możliwości pomiaru konkretnych zanieczyszczeń gazowych

Dendrochronologia sama w sobie nie pozwala na identyfikację i ilościowe określenie obecności konkretnych gazowych zanieczyszczeń, takich jak tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO) czy ozon (O_3). Może wskazywać jedynie skutki ich obecności – na przykład zahamowanie wzrostu lub zmiany w składzie chemicznym drewna. Aby zbadać konkretne związki chemiczne, potrzebne są dodatkowe metody analityczne (np. spektrometria mas). Dlatego jej użycie często wymaga łączenia z innymi narzędziami badawczymi.

4. Ograniczenia geograficzne i gatunkowe

Nie wszystkie obszary są porośnięte drzewami odpowiednimi do badań dendrochronologicznych – np. w silnie zurbanizowanych częściach miast lub na terenach rolniczych może brakować długo żyjących okazów. Dodatkowo, nie każdy gatunek drzewa tworzy dobrze widoczne i regularne słoje roczne, co jest warunkiem koniecznym do dokładnej analizy. Niektóre gatunki reagują słabiej na zmiany środowiska, co utrudnia identyfikację wpływu zanieczyszczeń. Ogranicza to dostępność danych w wielu potencjalnie interesujących lokalizacjach.

5. Potrzeba specjalistycznej analizy i długiego czasu przetwarzania

Proces pozyskiwania i opracowywania danych dendrochronologicznych wymaga dużej precyzji i specjalistycznej wiedzy. Obejmuje pobieranie rdzeni przyrostowych, ich suszenie, szlifowanie, skanowanie, datowanie słoików i czasem analizę chemiczną (np. metodą ICP-MS). Każdy z tych etapów jest czasochłonny i wymaga odpowiedniego sprzętu laboratoryjnego. W porównaniu do czujników jakości powietrza, które dostarczają dane niemal natychmiast, dendrochronologia ma dłuższy czas realizacji.

Preferencje dendrochronologii w analizie zanieczyszczenia powietrza:

1. Możliwość rekonstrukcji historycznego zanieczyszczenia powietrza

Jedną z największych zalet dendrochronologii jest zdolność do odtworzenia zmian środowiskowych w przeszłości, nawet sprzed kilkuset lat. Drzewa przechowują w swojej tkance zapis środowiskowy z każdego roku życia, co pozwala analizować dawne epizody zanieczyszczenia. Jest to szczególnie przydatne na terenach przemysłowych, gdzie działalność człowieka trwała od dziesięcioleci, a brakuje danych instrumentalnych. Dzięki temu możliwa jest rekonstrukcja trendów zmian jakości powietrza w długiej perspektywie czasowej.

2. Brak potrzeby wcześniejszych pomiarów terenowych

Analiza słoików umożliwia pozyskanie informacji o stanie środowiska w okresach, gdy nie istniały stacje monitoringu czy inne narzędzia pomiarowe. Nie ma potrzeby prowadzenia wcześniejszych pomiarów – drzewa same zarejestrowały wpływ warunków środowiskowych. To czyni dendrochronologię niezastąpioną metodą w badaniach retrospektywnych. Można przeprowadzić analizę nawet po dziesięcioleciach od wystąpienia danego zjawiska.

3. Naturalna archiwizacja danych w organizmach żywych

Drzewa działają jak biologiczne rejestratory – nie tylko zapisują tempo wzrostu, ale również mogą gromadzić ślady zanieczyszczeń chemicznych w swoich tkankach. Słoje roczne tworzą systematyczny i uporządkowany zapis chronologiczny. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne powiązanie zmian w strukturze drewna z konkretnymi latami. Taka „archiwizacja” jest trwała, odporna na utratę danych i nie wymaga zasilania ani konserwacji, w przeciwieństwie do urządzeń elektronicznych.

4. Zastosowanie w ocenie kumulacji metali ciężkich

Drewno może akumulować metale ciężkie pobierane z gleby i atmosfery, takie jak ołów (Pb), kadm (Cd), cynk (Zn), miedź (Cu). Analizując stężenie tych pierwiastków w poszczególnych słojach, można określić okresy zwiększonego skażenia środowiska. To szczególnie przydatne w rejonach przemysłowych lub w pobliżu dróg o dużym natężeniu ruchu, gdzie metale ciężkie występują w zwiększonych ilościach. Dzięki temu dendrochronologia wspiera ocenę wpływu działalności człowieka na środowisko w ujęciu czasowym.

5. Niskoinwazyjna metoda badawcza

W przeciwieństwie do wielu innych metod pobierania próbek środowiskowych, dendrochronologia pozwala na badanie drzew bez ich wycinania. Rdzenie przyrostowe pobierane są za pomocą specjalnych świdrów, które nie powodują trwałego uszkodzenia drzewa. Oznacza to, że jedno drzewo może być wykorzystywane wielokrotnie w badaniach bez szkody dla jego zdrowia. To szczególnie istotne w obszarach chronionych, parkach narodowych i miejskich terenach zielonych.

Przykład zastosowania pomiarów poprzez mobilne laboratorium

Zastosowanie mobilnego laboratorium do pomiarów zanieczyszczenia powietrza w obszarach miejskich – studium przypadku Krakowa

W ostatnich latach zanieczyszczenie powietrza stało się jednym z kluczowych wyzwań dla dużych miast, w tym także dla Krakowa – miasta, które przez wiele sezonów grzewczych znajdowało się w czołówce rankingów najbardziej zanieczyszczonych miast Europy. W odpowiedzi na rosnące potrzeby monitorowania jakości powietrza, władze lokalne we współpracy z jednostkami badawczymi i firmami technologicznymi zaczęły testować innowacyjne rozwiązania. Jednym z nich było wykorzystanie dronów do prowadzenia mobilnych pomiarów stężenia szkodliwych substancji w atmosferze.

1. Kontekst problemu

Kraków od lat zмага się z problemem smogu, zwłaszcza w okresie jesienno-zimowym, kiedy nasila się emisja ze źródeł niskiej emisji – czyli z domowych pieców i lokalnych kotłowni, często zasilanych węglem lub nawet odpadami. Klasyczny system pomiarowy oparty na stacjonarnych stacjach monitorujących, choć dostarczał rzetelnych danych, miał ograniczony zasięg – zarówno geograficzny, jak i przestrzenny. Nie obejmował dokładnie wszystkich dzielnic miasta, a zwłaszcza obszarów peryferyjnych i podmiejskich, gdzie często spalano najgorszej jakości paliwa. W związku z tym podjęto decyzję o wdrożeniu testowego projektu wykorzystania dronów do prowadzenia dynamicznych, przestrzennie zróżnicowanych pomiarów jakości powietrza.

2. Założenia projektu

Projekt realizowany przez urząd miasta Krakowa we współpracy z Politechniką Krakowską oraz prywatnym operatorem dronów miał na celu ocenę skuteczności i użyteczności bezzałogowych statków powietrznych w detekcji zanieczyszczeń powietrza, szczególnie w kontekście identyfikacji tzw. "kopciuchów" – domowych pieców emitujących nadmierne ilości zanieczyszczeń. Drony zostały wyposażone w specjalistyczne czujniki zdolne do pomiaru stężeń pyłów zawieszonych PM2.5 i PM10, a także tlenków azotu (NO_x), tlenku węgla (CO), dwutlenku siarki (SO₂) i lotnych związków organicznych (VOC). Dodatkowo zastosowano moduły GPS oraz transmisji danych w czasie rzeczywistym.

3. Metodyka działania

Drony operowały głównie w godzinach wieczornych i nocnych, gdy emisja ze spalania paliw w gospodarstwach domowych była największa. Wybierano dni z niską prędkością wiatru i inwersją temperatury – warunkami sprzyjającymi kumulacji zanieczyszczeń.

Trasy lotów były planowane z wyprzedzeniem na podstawie danych historycznych dotyczących emisji i zgłoszeń mieszkańców. Bezzałogowce przelatywały nad wybranymi dzielnicami na wysokości od 10 do 150 metrów, rejestrując stężenia poszczególnych substancji co kilka sekund. Dzięki temu uzyskiwano trójwymiarowy obraz rozkładu zanieczyszczeń w danym obszarze.

Dane były przesyłane do mobilnego centrum analitycznego, gdzie na bieżąco analizowano wyniki i nanoszono je na mapy. W przypadku wykrycia podejrzenia wysokiego poziomu emisji w konkretnej lokalizacji, informacja była przekazywana do straży miejskiej, która przeprowadzała kontrolę pieca.

4. Rezultaty i korzyści

Zastosowanie dronów przyniosło kilka wymiernych korzyści:

- precyzyjna identyfikacja źródeł emisji – drony były w stanie wykryć nielegalne spalanie odpadów, plastików lub mokrego drewna w konkretnych gospodarstwach domowych,
- mapowanie zanieczyszczeń w czasie rzeczywistym – dane wizualizowano na dynamicznych mapach 3D, co pozwalało zidentyfikować strefy szczególnie narażone na smog,
- skuteczniejsze działania kontrolne – informacje z dronów umożliwiały szybsze i bardziej celowane interwencje straży miejskiej i inspekcji ochrony środowiska,
- edukacja i prewencja – mieszkańcy, wiedząc o możliwości monitoringu z powietrza, częściej rezygnowali z nielegalnych praktyk grzewczych,
- zbieranie danych do analiz i modeli – dane z dronów posłużyły do walidacji matematycznych modeli dyspersji zanieczyszczeń oraz do opracowania lepszych strategii antysmogowych.

5. Ograniczenia i wyzwania

Choć projekt odniósł sukces, nie był wolny od ograniczeń. Drony mogły operować tylko przy sprzyjających warunkach pogodowych, co wykluczało pomiary w dni deszczowe, wietrzne czy przy opadach śniegu. Pojawiały się też kwestie formalne związane z koniecznością uzyskania pozwoleń na loty w przestrzeni miejskiej oraz ograniczenia związane z ochroną prywatności mieszkańców.

Ponadto, choć czujniki były stosunkowo dokładne, nadal istniało ryzyko błędów pomiarowych wynikających z turbulencji powietrza wokół wirników drona, dlatego konieczne było każdorazowe kalibrowanie urządzeń.

6. Wnioski i perspektywy

Zastosowanie dronów w Krakowie pokazało, że technologie bezzałogowe mogą być cennym narzędziem uzupełniającym klasyczny system monitoringu jakości powietrza. Ich mobilność, elastyczność i zdolność do zbierania danych w trudno dostępnych miejscach czynią je szczególnie przydatnymi w warunkach miejskich, gdzie występuje znaczna zmienność przestrzenna emisji.

W przyszłości planowane jest rozszerzenie programu o automatyczne rozpoznawanie źródeł emisji na podstawie charakterystyki chemicznej dymu, a także integrację z systemami predykcji jakości powietrza i ostrzegania mieszkańców. Drony mogą również posłużyć do monitorowania skutków wprowadzania uchwał antysmogowych, oceny efektywności wymiany pieców i termomodernizacji budynków.

Interreg



Współfinansowany przez
UNIĘ EUROPEJSKĄ

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

POKYNY NA VYKONANIE TESTU RIZIKA ZNEČISTENIA OVZDUŠIA POMOCOU MODERNÝCH METÓD

Technický opis analýzy rizika znečistenia ovzdušia metódou merania prostredníctvom mobilného laboratória

I. Pokyny na hodnotenie rizík znečistenia ovzdušia metódou merania prostredníctvom mobilného laboratória

Krok 1. Plánovanie meraní

Prvým krokom je dôkladné naplánovanie úlohy merania. Je potrebné určiť, aký je účel merania, t. j. ktoré znečisťujúce látky sa majú merať, na ktorom mieste a v akom časovom období. Dôležité je tiež rozhodnúť, či sa má meranie vykonať jednorazovo alebo v pravidelných intervaloch. Potom je vhodné starostlivo analyzovať mapu oblasti a vybrať vhodné miesta na meranie - najlepšie také, ktoré sú pre danú oblasť reprezentatívne. Mali by sa zohľadniť možné prekážky v teréne, ako sú budovy, stromy alebo elektrické vedenie.

Krok 2. Výber správneho dronu a senzorov na testovanie znečistenia ovzdušia

V tejto fáze je dôležité vybrať dron, ktorý je vhodný na vykonávanie prieskumu životného prostredia. Mal by mať dostatočnú nosnosť na vyzdvihnutie meracích modulov (senzorov) a dostatočný čas letu na dokončenie celej misie bez potreby častého pristávania. Dôležité je tiež zabezpečiť kompatibilitu systémov: snímače by mali byť pripojené k dronu tak, aby umožňovali zber údajov. Typické snímače používané na hodnotenie kvality ovzdušia poskytujú okrem iného možnosť merať PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO, O3. Drony sú vybavené aj snímačmi teploty a vlhkosti. Je dôležité, aby boli snímače kalibrované a v dobrom technickom stave. Výber zariadenia má významný vplyv na presnosť a spoľahlivosť meraní. Nižšie je uvedený príklad dronu s nainštalovanými senzormi na analýzu znečistenia ovzdušia a príklad dronu používaného na prepravu meracieho zariadenia na hodnotenie kvality ovzdušia.

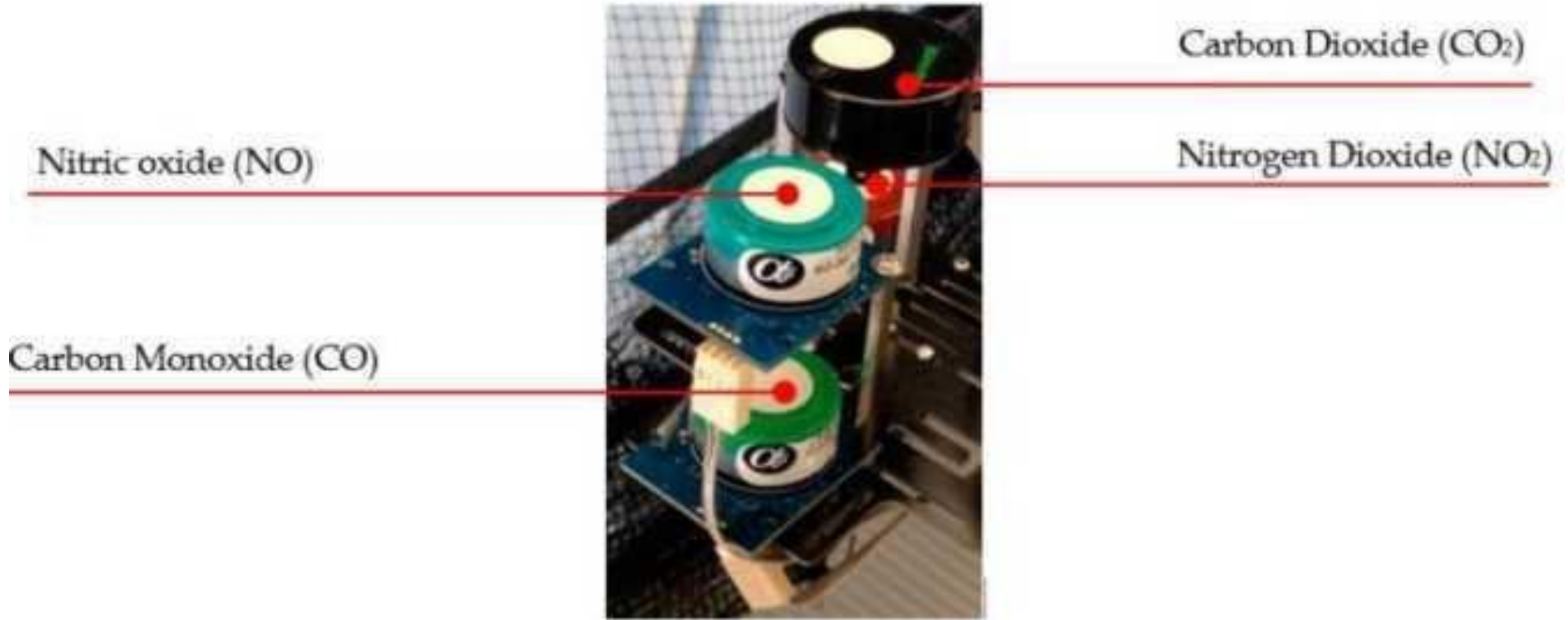


Krok 3. Příprava vopred zmontovaného zariadenia na let

Po výbere dronu a senzorov si musíte pripraviť všetko vybavenie. Na tento účel musíte overiť úroveň nabitia batérií dronu aj meracích zariadení. Takisto sa oplatí uistiť, že softvér zodpovedný za riadenie letu a zaznamenávanie údajov je aktualizovaný a funguje správne. Pred letom je nevyhnutné otestovať snímače - napríklad v bezpečných podmienkach v blízkosti zeme. Všetky komponenty musia byť pevne pripevnené, aby sa zabránilo rušeniu meraní v dôsledku vibrácií. Tesne pred štartom je tiež dobré skontrolovať predpoveď počasia, aby ste neriskovali zlyhanie misie v dôsledku silného vetra alebo zrážok. Nižšie je uvedený príklad dronu, ktorý sa používa na prepravu meracieho zariadenia na hodnotenie kvality ovzdušia.



Príklad dronu s nainštalovanými senzormi na analýzu znečistenia ovzdušia je uvedený nižšie.



Krok 4. Vykonanie skúšobného kalibračného letu

Pred začatím hlavných meraní by sa mal vykonať krátky skúšobný let. To vám umožní posúdiť, či všetky systémy pracujú správne v reálnych podmienkach a či snímače zbierajú údaje tak, ako majú. Počas testu je vhodné venovať pozornosť stabilite počas letu, fungovaniu GPS a interakcii s pozemným systémom. Je tiež užitočné porovnať výsledky zo snímačov dronu s referenčnými údajmi, napríklad z monitorovacej stanice, aby sa vykonalo prvotné posúdenie presnosti meraní. Skúšobný let môže odhaliť chyby nastavenia, ktoré sa dajú ľahšie odstrániť počas skúšobnej fázy ako počas skutočnej meracej misie. Vykonanie kalibračného skúšobného letu je kľúčovým krokom, ktorý zvyšuje spoľahlivosť celého procesu merania.

Krok 5. Vykonanie meracieho letu

V tomto kroku dron vykoná plánovanú meraciu misiu podľa vopred stanoveného harmonogramu. Operátor monitoruje let na obrazovke, sleduje trasu a výkon dronu a snímačov. Dron by sa mal pohybovať v pevnej nadmorskej výške a rýchlosti, čím sa zabezpečí konzistentnosť údajov. Počas letu snímače zbierajú údaje o koncentrácii znečistenia, teplote, vlhkosti a ďalších parametroch ovzdušia. Informácie sa môžu ukladať na pamäťovú kartu alebo prenášať v reálnom čase do pozemného počítača. Mala by sa monitorovať aj úroveň nabitia batérie a v prípade potreby by sa mal dron bezpečne vrátiť na pristávaciu plochu. Príklad dronu počas letu na hodnotenie kvality ovzdušia je uvedený nižšie.



Krok 6. Wykonanie meracieho letu

V tomto kroku dron vykoná plánovanú meraciu misiu podľa vopred stanoveného harmonogramu. Operátor monitoruje let na obrazovke, sleduje trasu a výkon dronu a snímačov. Dron by sa mal pohybovať v pevnej nadmorskej výške a rýchlosti, čím sa zabezpečí konzistentnosť údajov. Počas letu snímače zbierajú údaje o koncentrácii znečistenia, teplote, vlhkosti a ďalších parametroch ovzdušia. Informácie sa môžu ukladať na pamäťovú kartu alebo prenášať v reálnom čase do pozemného počítača. Mala by sa monitorovať aj úroveň nabitia batérie a v prípade potreby by sa mal dron bezpečne vrátiť na pristávaciu plochu. Nižšie je uvedená matica nameraných hodnôt kvality ovzdušia s hodnotami v jednotlivých kategóriách znečisťujúcich látok, ktorá informuje o prekročení noriem (AIRDron by SOFTBlue)



Krok 7: Spracovanie výsledkov a ich vizualizácia

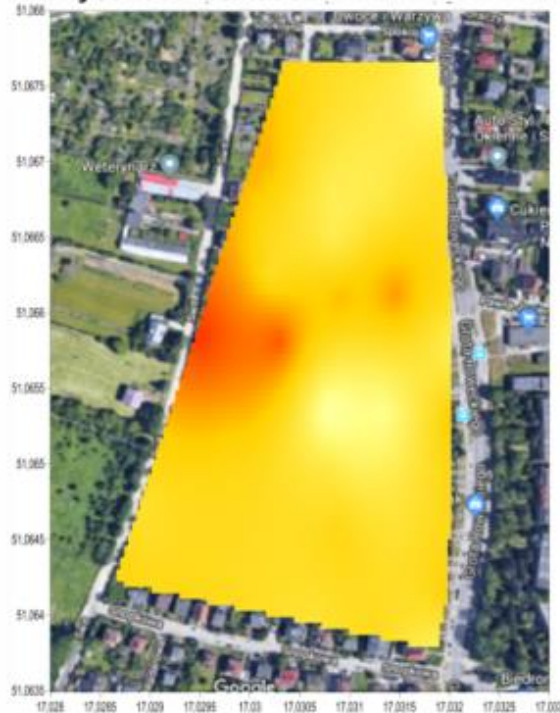
Zobierané údaje sa musia transformovať do čitateľnej podoby, ako sú grafy, tepelné mapy alebo textové správy. Na tento účel sa používajú analytické a GIS nástroje na mapovanie priestorového rozloženia znečisťujúcich látok. Vizualizácia výsledkov uľahčuje interpretáciu údajov, identifikáciu zdrojov emisií a zón osobitného záujmu. Pri vypracovaní výsledkov by sa mali zohľadniť aj meteorologické podmienky a environmentálny kontext. V tejto fáze je vhodné pripraviť závery a odporúčania, napr. pre miestne orgány alebo obyvateľov. Dobré vypracovanie výsledkov určuje, či údaje budú užitočné pre ďalšie opatrenia.

Priestorové rozloženie znečistenia ovzdušia zistené na základe prieskumu dronom je uvedené nižšie.

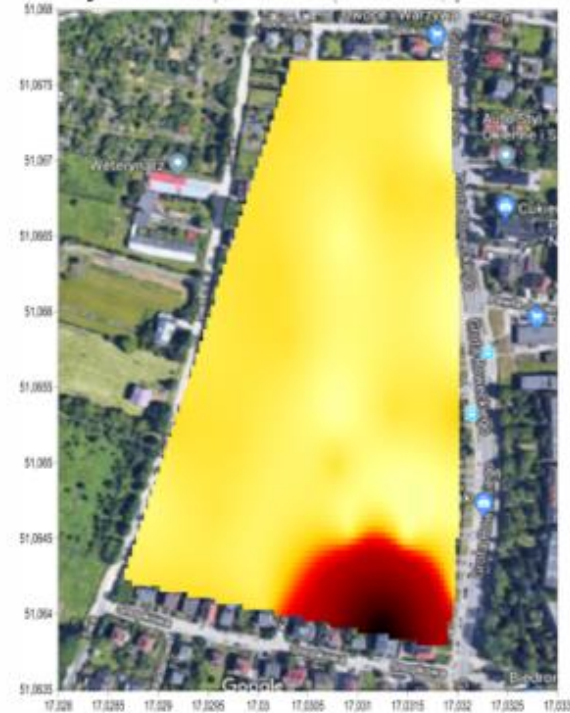
Wrocław - Wojszyce
2018-03-20 - trasa przelotu



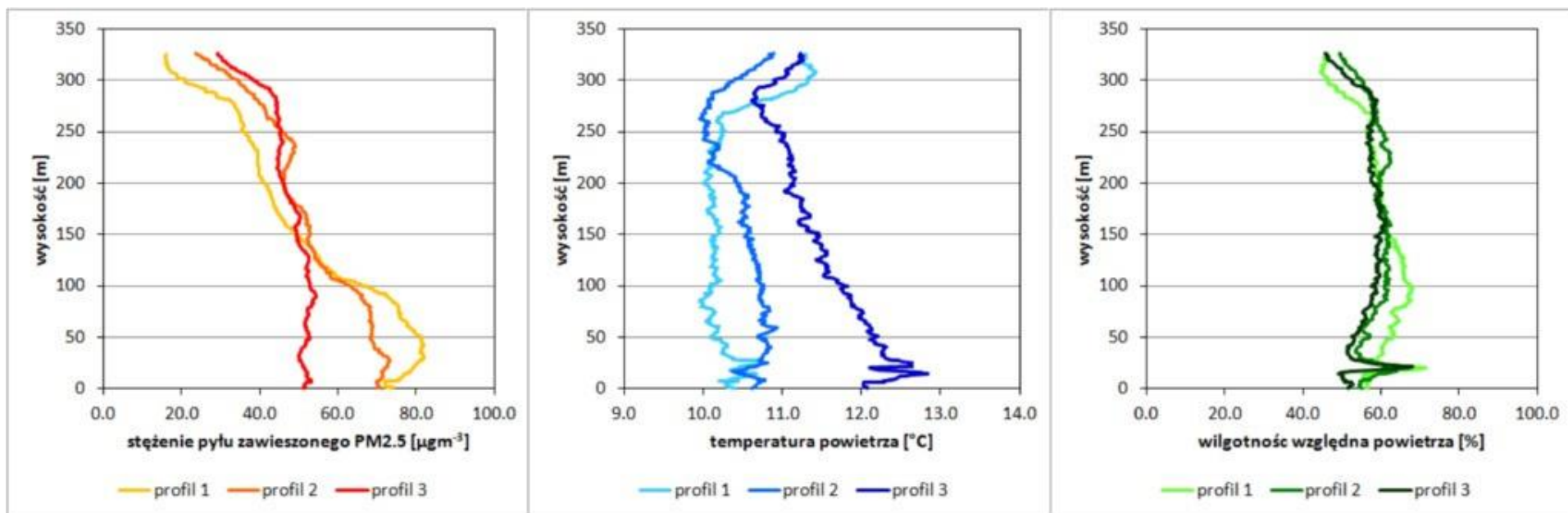
Wrocław - Wojszyce
2018-03-20, 20:15 – 20:35 UTC
wysokość lotu 35 m



Wrocław - Wojszyce
2018-03-20, 20:55 – 21:15 UTC
wysokość lotu 35 m



Výsledky meraní znečistenia ovzdušia vykonaných pomocou dronu sú uvedené nižšie.



Krok 8. Příprava závěrečné správy

Posledním krokem je příprava kompletní dokumentace měření. Tá by měla obsahovat podrobný opis metodiky, zariadenia, podmienok merania a kompletné údaje a analýzy. Dôležité je tiež uviesť všetky problémy, ktoré sa vyskytli počas meraní, a spôsob ich riešenia. Závěrečnú správu možno poskytnúť zainteresovaným stranám - napr. miestnym orgánom, environmentálnym organizáciám alebo vedeckým inštitúciám. Je tiež dobré archivovať všetky údaje na bezpečných médiách pre budúce použitie. Takáto dokumentácia zvyšuje transparentnosť meraní a umožňuje ich opakovanie alebo porovnanie s budúcimi údajmi.

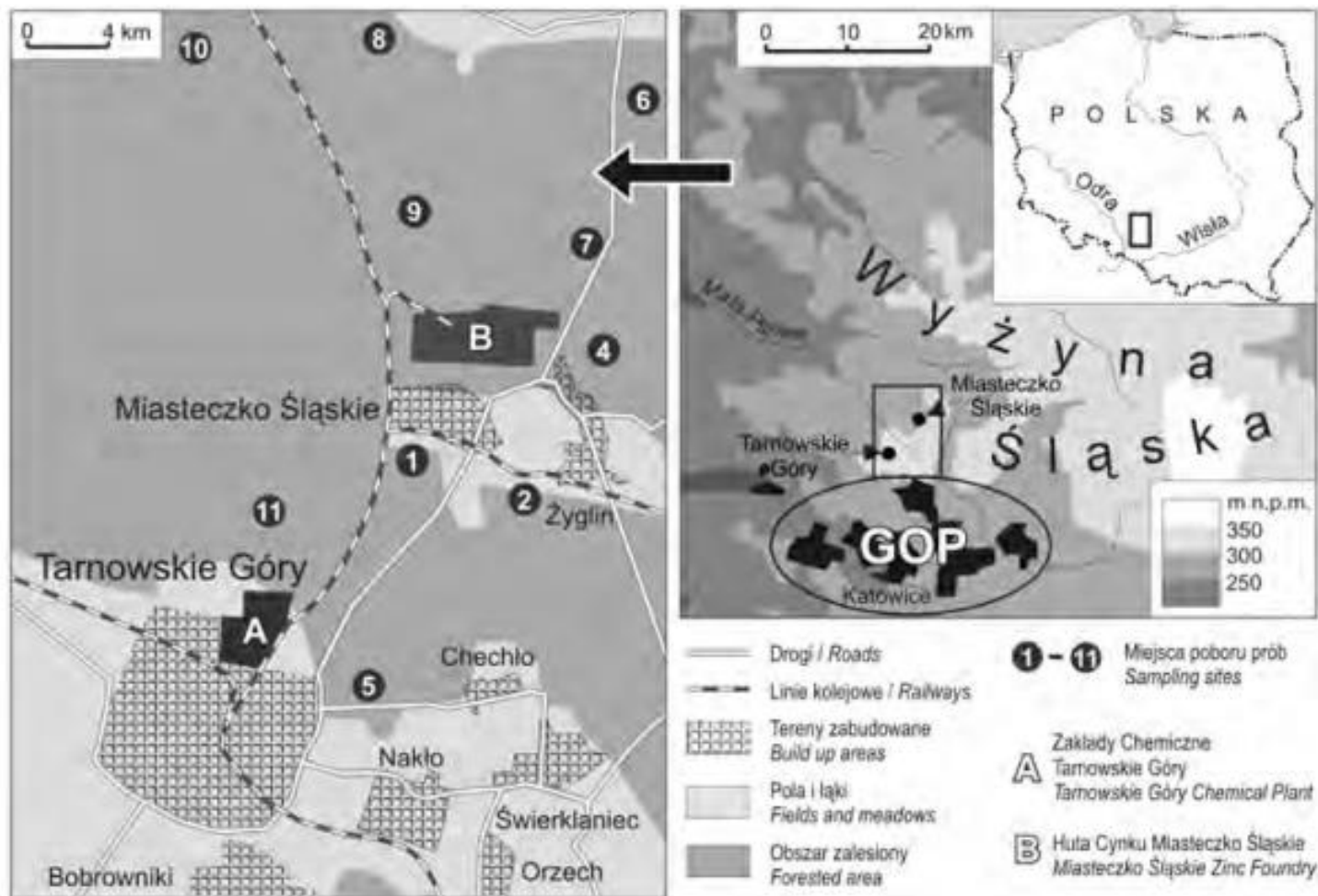
Technický opis analýzy rizika znečistenia ovzdušia metódou merania prostredníctvom bioindikácie (analýza zníženia ročných prírastkov stromov a analýza koncentrácie jednotlivých znečisťujúcich látok v letokruhoch)

II. Návod na hodnotenie rizika znečistenia ovzdušia metódou merania bioindikáciou (analýza redukcie ročných prírastkov stromov a analýza koncentrácie jednotlivých znečisťujúcich látok v letokruhoch)

Krok 1. Určenie účelu a rozsahu štúdie

Prvým krokom je určenie účelu rekonštrukcie, napríklad analýza zmien v obsahu ťažkých kovov alebo priemyselných emisií v predchádzajúcich rokoch. Dôležité je tiež určiť, aké časové obdobie sa má analyzovať a v ktorom regióne. Zvyčajne sa skúmajú oblasti v blízkosti emitentov znečisťujúcich látok, ako sú mestské oblasti alebo priemyselné podniky (obrázok 9). Je dôležité, aby bol stanovený časový rozsah realistický z hľadiska dostupnosti dostatočne starých stromov. Vek stromov možno overiť na lesníckych mapách, ktoré poskytujú informácie o veku porastov v jednotlivých lesných celkoch. Dôležitý je aj výber vhodných indikátorov znečistenia, ktoré sa dajú testovať v letokruhoch stromov, napríklad olovo (Pb), kadmium (Cd), síra (S).

Nižšie sú uvedené miesta odberu vzoriek (1-11), ktoré sa nachádzajú v blízkosti dvoch veľkých znečisťovateľov ovzdušia: Zakłady Chemiczne Tarnowskie Góry (A) a Huta Cynku Miasteczko Śląskie (B).



Krok 2. Výber vhodných lokalít a drevín na odber vzoriek

V ďalšom kroku sa vyberú lokality, z ktorých sa budú odoberať vzorky. Najlepšie sú na to lokality, ktoré sa líšia úrovňou znečistenia - napríklad priemyselné oblasti a kontrolné lokality vzdialené od zdrojov emisií. Rozhodujúce je, aby lokalita bola ekologicky stabilná a nebola ovplyvnená inými faktormi, napríklad požiarimi alebo povodňami. Dôležitý je aj výber drevín - najlepšie výsledky sa dosiahnu, ak sa vyskúšajú dlhoveké dreviny, ktoré sú citlivé aj na vonkajší stres, napríklad borovica alebo smrek. Stromy musia byť zdravé, bez poškodenia a s jasne viditeľnými letokruhmi. Kvalitu dendrochronologických údajov ovplyvňuje stanovište aj druh stromu. Na ďalšom diapozitíve sú znázornené brezy poškodené znečistením ovzdušia (horný obrázok) a kosodrevina poškodená znečistením ovzdušia, pričom v pozadí sú viditeľné komíny z huty v Miasteczku Śląskom (dolný obrázok).



Interreg



Współfinansowany przez
UNIE EUROPEJSKĄ

Polska – Słowacja

Krok 3. Odber vzoriek stromov (postupný zber jadier)

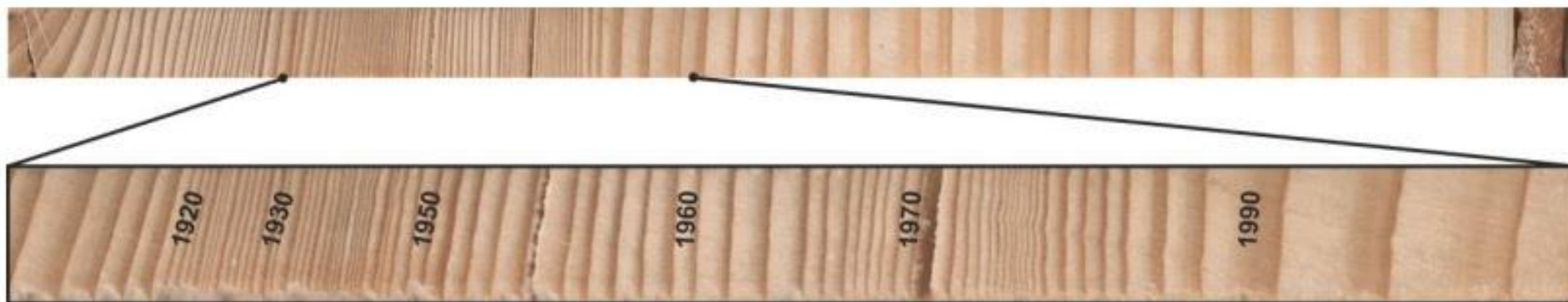
Na odber skúšobného materiálu sa používa nástroj nazývaný Presslerov vrták, ktorý umožňuje vyvrtáť tenké jadro z kmeňa stromu. Vzorky sa odoberajú vo výške 1,3 m, t. j. v tzv. prsnej výške, zvyčajne z dvoch strán stromu, čo zvyšuje ich reprezentatívnosť. Je dôležité dbať na to, aby sa jadro nepoškodilo alebo aby sa do vzorky nedostali kontaminanty. Každá vzorka musí byť starostlivo označená. V škatuli, do ktorej sa jadrá zakopávajú, by sa mal zaznamenať dátum, miesto, druh a číslo stromu. Po odbere sa jadrá vysušia za vhodných podmienok, aby sa zabránilo ich deformácii. Na ďalšom diapozitíve sú zobrazené príklady Presslerovho vrtáka.



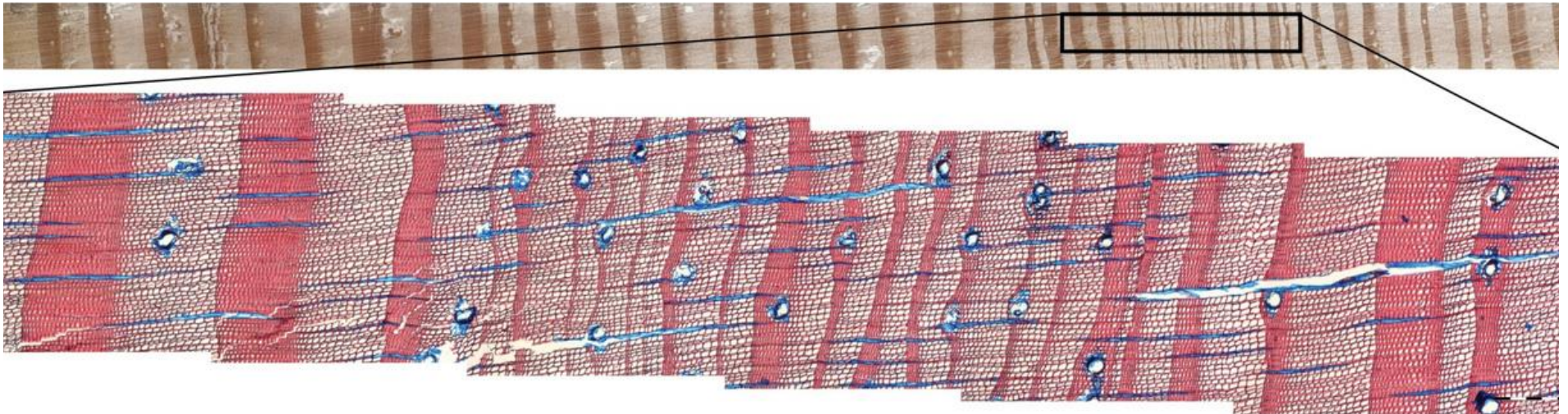
Krok 4. Príprava vzoriek na analýzu

Po vysušení sa jadrá opatrne prebrúsia brúsnym papierom s rôznou stupňovitosťou. Používajú sa brúsne papiere týchto stupňov: Cieľom brúsenia je získať jasné ročné kruhy, ktoré umožnia presné datovanie každého ročného prírastku. Následne sa vykoná prvotná mikroskopická kontrola, aby sa zistili anomálie alebo poškodenia dreva. Často sa používajú aj skenovacie techniky s vysokým rozlíšením alebo digitálne zobrazovacie techniky, prípadne sa vyhotovujú aj mikroskopické preparáty. Časť jadra môže byť určená na ďalšie chemické analýzy, preto je dôležité chrániť vzorky pred vonkajšou kontamináciou.

Vybrúsené jadrá s viditeľnými ročnými hranicami rastu sú uvedené nižšie.



Mikroskopický preparát z jadra odobratého zo stromu je zobrazený nižšie.

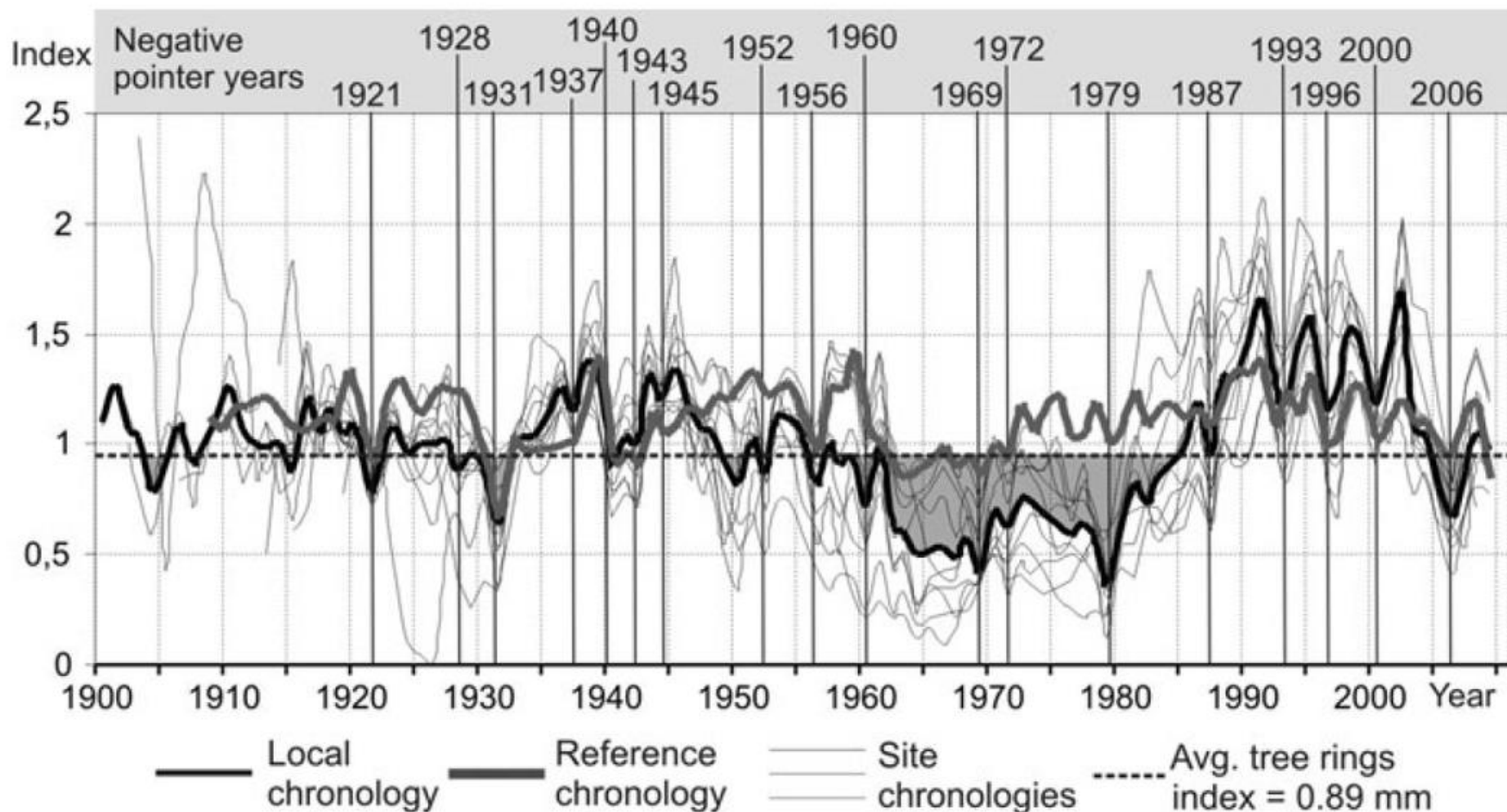


Krok 5. Datovanie prírastkových krúžkov a vytvorenie chronológie

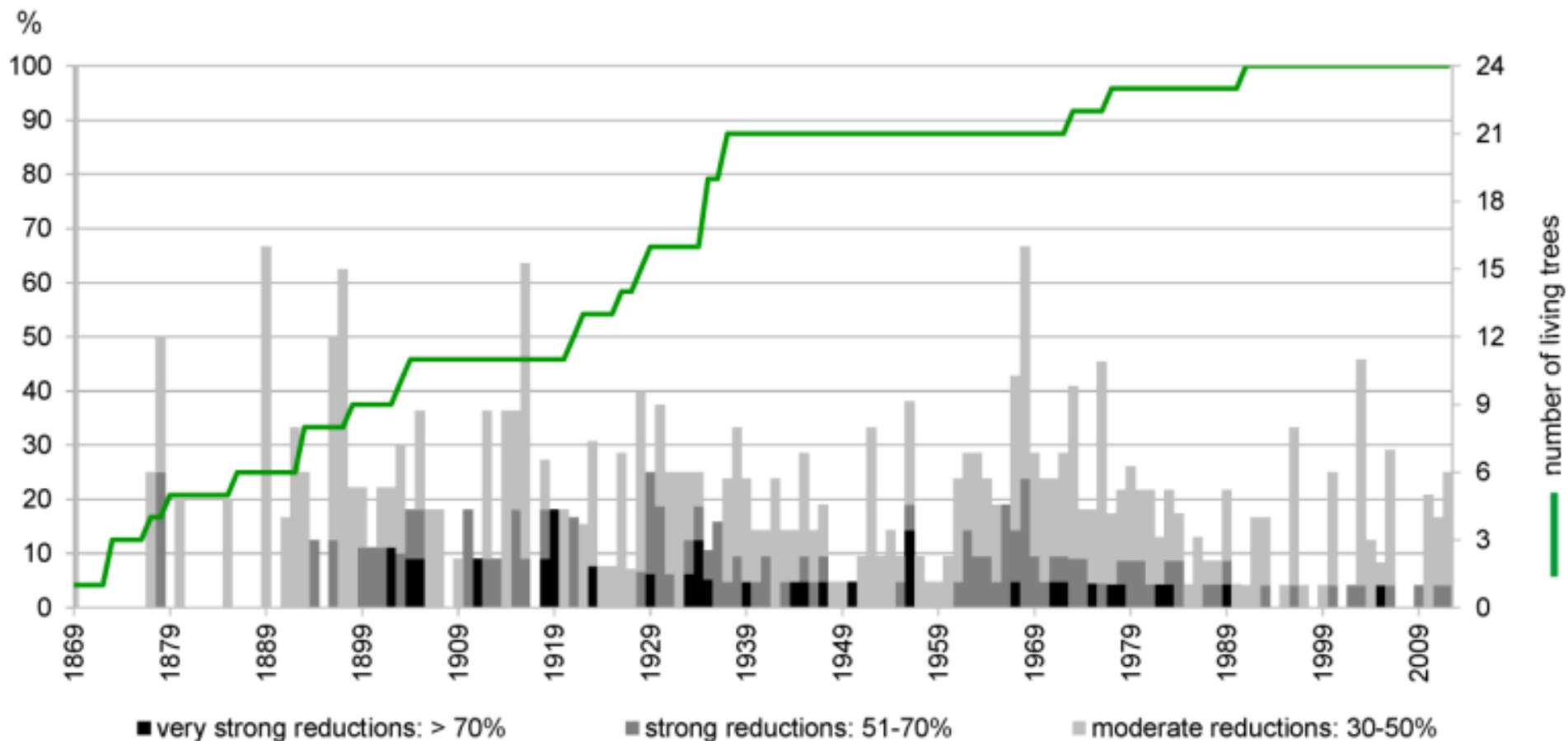
V tomto kroku sa analyzuje šírka jednotlivých letokruhov s cieľom určiť ich vek. Pomocou tzv. prírastkomera sa meria šírka jednotlivých letokruhov (obrázok 16). To umožňuje presne priradiť každý prírastok ku konkrétnemu kalendárnemu roku. Pre každé odobraté jadro sa vytvoria grafy ročných prírastkov. Po porovnaní jednotlivých grafov z rôznych stromov sa vytvorí miestna chronológia (obrázok 17). Chronológia sa vytvorí spriemerovaním šírky ročných prírastkových rokov pre jednotlivé roky z každého jadra. Chronológia sa zvyčajne podrobuje procesu štandardizácie, aby sa eliminoval vekový trend. Štandardizácia sa vykonáva pomocou bezplatného programu Cofecha. Konštrukcia chronológie umožňuje identifikovať roky so zníženým rastom, ktoré môžu poukazovať na vplyv znečistenia ovzdušia na strom (obrázok 18). Zvyčajne sú ročné prírastky vytvorené počas období silného znečistenia životného prostredia oveľa užšie ako prírastky vytvorené bez vplyvu znečistenia ovzdušia.



Príklad miestnej dendrochronologickej chronológie je uvedený nižšie.



Príklad grafu ročného zníženia prírastku je uvedený nižšie.



Krok 6. Chemická analýza vzoriek dreva

Vzorky na chemickú analýzu sa odoberajú z vopred rozrezaných častí dreva tak, že sa každé zrno rozdelí skalpelom na jednotlivé roky. Na presné stanovenie koncentrácie prvkov sa najčastejšie používajú spektrometrické metódy, ako napríklad ICP-MS (hmotnostná spektrometria s indukčne viazanou plazmou). Každá nádoba predstavuje jeden rok, takže je možné rekonštruovať zmeny v koncentráciách kontaminantov v čase. Pri analýze sa zohľadňuje aj obsah stabilných izotopov (napr. izotopov uhlíka alebo kyslíka), ktoré poskytujú ďalšie informácie o podmienkach prostredia. Vzorky sa musia pripravovať v laboratórnych podmienkach, ktoré minimalizujú riziko kontaminácie. Tento krok poskytuje kľúčové údaje na posúdenie úrovne znečistenia v konkrétnych rokoch.

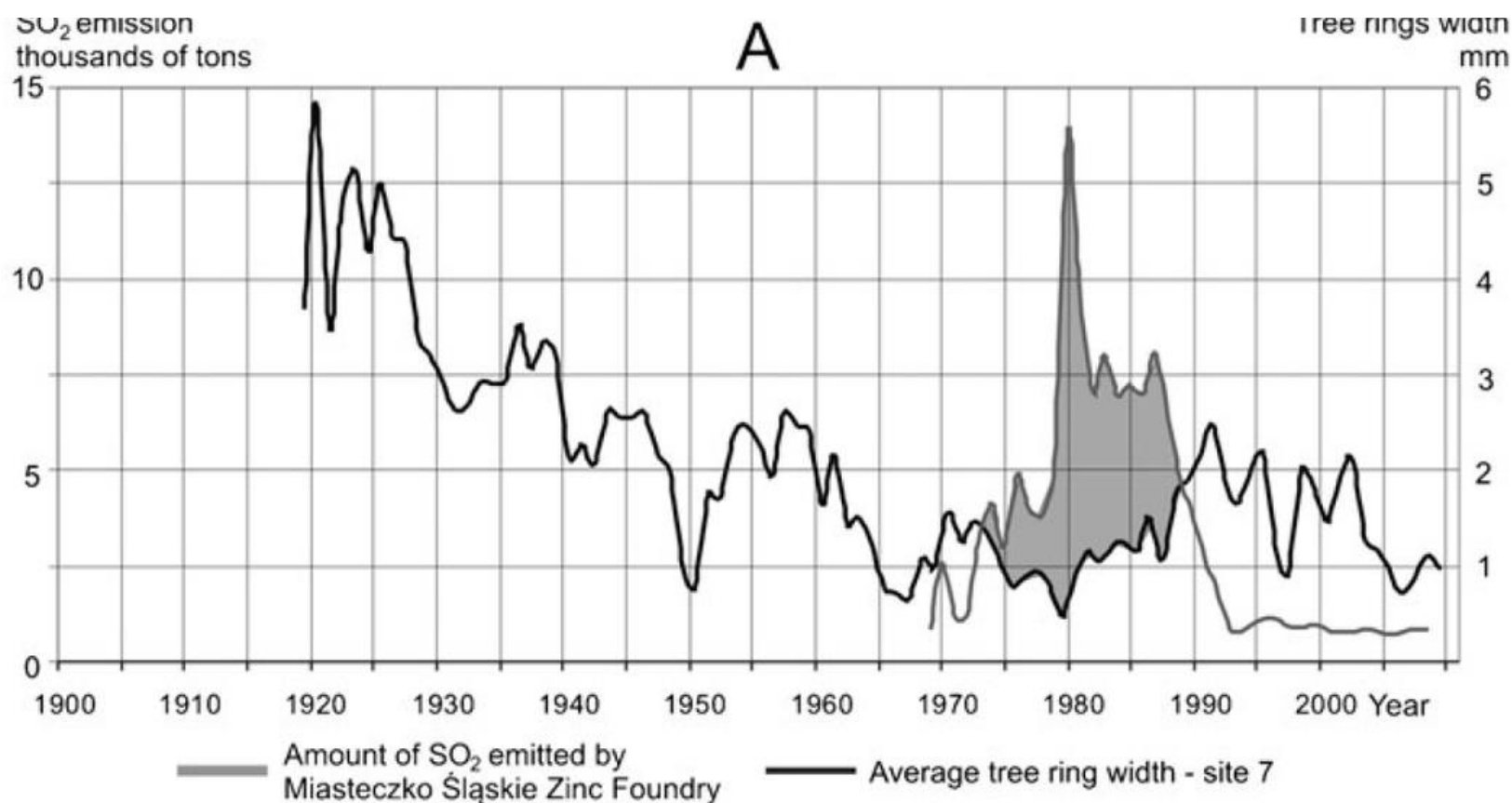
Krok 7. Korelácia prírastkových a chemických údajov

Po získaní údajov o prírastkovej šírke a obsahu prvkov sa vykoná štatistická analýza. Cieľom analýzy je nájsť korelácie medzi zmenami prírastku a koncentraciami kontaminantov. Napríklad zmenšená šírka zrna môže korelovať so zvýšenými koncentraciami olova alebo SO_2 . Údaje sa porovnávajú aj s externými zdrojmi - napríklad s historickými záznamami priemyselnej činnosti alebo meteorologickými údajmi. Pri analýze sa používajú regresné metódy, analýza hlavných komponentov (PCA) alebo korelačné testy. Ide o kľúčový krok pri interpretácii vplyvu znečistenia na rast stromov.

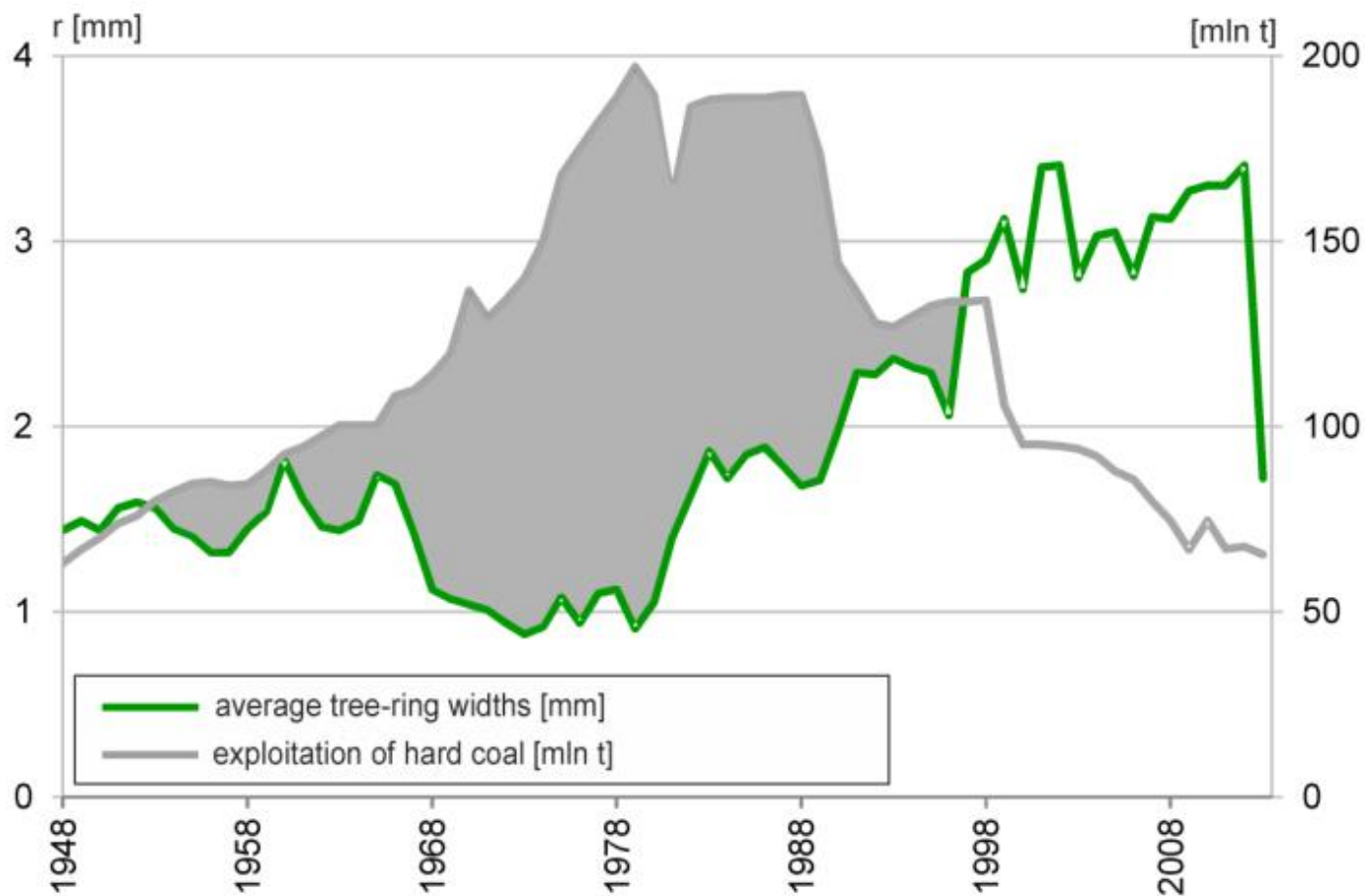
Krok 8. Rekonštrukcia úrovne znečistenia v minulosti

Na základe získaných výsledkov sa vytvorí model zmien znečistenia v čase. Grafy ukazujú, v ktorých rokoch bola koncentrácia určitého prvku najvyššia, čo môže súvisieť s priemyselnou činnosťou, napr. s hutníctvom alebo spaľovaním fosílnych palív. Niekedy sa pozoruje aj pokles úrovne znečistenia - napr. po zavedení environmentálnych predpisov. Takéto rekonštrukcie môžu trvať až niekoľko stoviek rokov v závislosti od veku stromov. Dendrochemické údaje sa potom porovnávajú s inými historickými zdrojmi, čo zvyšuje ich interpretačnú hodnotu.

Nižšie je uvedené porovnanie grafov zníženia v ročných prírastkoch (čierna farba) a grafu emisií oxidu siričitého z priemyselného závodu (Huta Cynku Miasteczko Śląskie).



Inverzná úmernosť medzi šírkou ročných prírastkov a ťažbou uhlia je znázornená nižšie.



Krok 9. Zhrnutie výsledkov a šírenie záverov

Na záver sa vypracuje komplexná správa s výsledkami štúdie. Tá obsahuje opis metód, analýzy, grafy zmien znečistenia a ich interpretáciu v historickom kontexte. Údaje sa často uverejňujú vo vedeckých časopisoch alebo v správach pre environmentálne inštitúcie. Niektoré informácie sa môžu prezentovať aj vo forme interaktívnych máp a grafov pre širšie publikum. Pri spracovaní výsledkov by sa mali uviesť aj obmedzenia metódy a možnosti ďalšieho výskumu. Zverejnenie výsledkov umožňuje, aby údaje mohli využívať aj iné výskumné tímy a inštitúcie zaoberajúce sa monitorovaním životného prostredia.

Opis obmedzení a preferencií pre použitie metódy merania prostredníctvom mobilného laboratória

Obmedzenia použitia mobilného laboratória:

1. Obmedzený letový čas

Väčšina dostupných dronov, najmä tých priemyselných s namontovanými senzormi, má obmedzený čas prevádzky – zvyčajne 20 až 40 minút. Je to spôsobené najmä obmedzenou kapacitou batérií a dodatočnou záťažou spôsobenou snímačmi. Krátky čas letu sťažuje dlhodobý alebo rozsiahly zber údajov, najmä ak je potrebné vykonať viacero preletov. Pri väčších územiach je nutné časté návraty na základňu a výmena batérií, čo znižuje efektivitu práce.

2. Poveternostné podmienky

Drony sú veľmi citlivé na nepriaznivé poveternostné podmienky, ako je silný vietor, dážď, sneh alebo nízke teploty. V takýchto podmienkach môže dôjsť k strate stability počas letu, poruchám senzorov alebo dokonca k havárii zariadenia. Mnohé drony nemajú dostatočnú ochranu (napr. IP krytie), čo znemožňuje ich používanie vo vlhkom prostredí. V praxi to znamená, že nie je možné realizovať merania za každého počasia a počas celého roka.

3. Právne a regulačné obmedzenia

Vo viacerých krajinách platia prísne pravidlá pre prevádzku dronov – najmä v mestách, v blízkosti letísk, elektrární alebo priemyselných závodov. Je potrebné získať licencie, povolenia na lety a často aj vopred nahlásiť plánované trasy. Existujú aj obmedzenia týkajúce sa nočných letov alebo maximálnej výšky (napr. 120 metrov nad zemou). Tieto predpisy výrazne obmedzujú flexibilitu a rýchlosť nasadenia dronov pri environmentálnom monitorovaní.

4. Obmedzená nosnosť

Drony majú limitovanú nosnosť, čo ovplyvňuje počet a hmotnosť zariadení, ktoré je možné na nich namontovať. Pokročilé chemické senzory (napr. na meranie NO_x, SO₂ alebo VOC) môžu byť ťažké a vyžadovať ďalšie napájanie. To znamená nutnosť vyvažovať medzi letovým časom a rozsahom meraní. V praxi to obmedzuje presnosť a komplexnosť zbieraných údajov.

5. Rušenie signálu a problémy s prenosom údajov

V mestských alebo hornatých oblastiach často dochádza k rušeniu GPS signálu alebo k prerušeniu spojenia medzi dronom a operátorom. To môže viesť k strate kontroly, nesprávnym lokalizačným údajom alebo k prerušeniu zaznamenávania dát. V niektorých prípadoch sa údaje ukladajú len lokálne a odosielajú sa až po pristátí, čo znemožňuje online monitoring. Takéto výpadky sú problémom najmä pri krízových situáciách, kde je potrebná okamžitá reakcia.

Preferencie použitia mobilného laboratória:

1. Ťažko prístupné alebo nebezpečné miesta

Drony umožňujú bezpečné vykonávanie meraní v oblastiach, kam sa človek nedostane ľahko – napr. na vysokých budovách, nad komínmi, v blízkosti požiarov, sopiek alebo v priemyselných zónach. Vďaka tomu je možné získať údaje bez ohrozenia ľudí. Drony sa dokážu pohybovať v zložitom priestore a obchádzať fyzické prekážky. To je veľká výhoda najmä pri kontrole kritickej infraštruktúry alebo počas havarijných zásahov.

2. Rýchla a flexibilná mobilita

Drony sa dajú veľmi rýchlo nasadiť a premiestniť na miesto merania, čo je ideálne pri núdzových situáciách alebo rýchlych kontrolách (napr. únik toxických látok). Môžu rýchlo určiť zdroj emisií alebo sledovať šírenie znečistenia v reálnom čase. Ich mobilita umožňuje získať množstvo bodových meraní v krátkom čase, čo zvyšuje presnosť a pokrytie údajov. Takúto flexibilitu je ťažké dosiahnuť pomocou stacionárnych meracích staníc.

3. Priestorové 3D merania (výškový profil)

Drony umožňujú získavať údaje z rôznych výšok, čo umožňuje analyzovať rozloženie znečistenia v zvislom profile atmosféry. Tieto údaje sú cenné pri modelovaní šírenia znečisťujúcich látok a pri hodnotení ich vplyvu na zdravie ľudí. Drony môžu vykonávať vrstvené alebo špirálové lety, ktoré prinášajú komplexný obraz rozloženia látok vo výške. Bežné pozemné stanice takýto typ údajov neposkytujú bez nasadenia balónov alebo lietadiel.

4. Vhodné pre krátkodobé a zásahové merania

Drony sú ideálne pre použitie pri ekologických haváriách, ako sú požiare, úniky chemikálií, nelegálne spaľovanie odpadu alebo náhle výskyty smogu. Umožňujú rýchlo získať informácie priamo na mieste udalosti a vyhodnotiť úroveň ohrozenia. Na rozdiel od stacionárnych systémov, ktoré si vyžadujú inštaláciu a kalibráciu, drony môžu byť nasadené okamžite. To výrazne zvyšuje efektivitu práce záchranných a environmentálnych služieb.

5. Nie je potrebná trvalá infraštruktúra

Drony nevyžadujú budovanie nákladných monitorovacích staníc ani dlhodobú inštaláciu. Sú mobilné, takže sa dajú použiť aj v oblastiach, kde nie je možné nainštalovať pevné senzory – napríklad v národných parkoch, pri riekach, v horách alebo na vidieku. Vďaka tomu sú ideálnym nástrojom pre dočasné merania alebo pilotné výskumné projekty. Ich flexibilita umožňuje rýchlo prispôbiť merania konkrétnym podmienkam v teréne.

Popis obmedzení a preferencií pre použitie metódy bioindikácie (analýza zníženia ročného rastu stromov a analýza koncentrácie jednotlivých znečisťujúcich látok v letokruhoch)

Obmedzenia dendrochronológie pri analýze znečistenia ovzdušia:

1. Nízke časové rozlíšenie v porovnaní s modernými metódami

Dendrochronológia umožňuje analyzovať zmeny v životnom prostredí na ročnej báze, pretože každý letokruh predstavuje jeden rok rastu stromu. Nedokáže však zachytiť krátkodobé výkyvy koncentrácie znečisťujúcich látok, ako sú smogové epizódy trvajúce niekoľko dní alebo týždňov. Táto metóda sa teda nehodí na sledovanie dynamických zmien kvality ovzdušia, ktoré si vyžadujú vyššiu časovú presnosť. Pre mestské monitorovanie v reálnom čase ide o významné obmedzenie.

2. Citlivosť na iné faktory než len znečistenie

Rýchlosť rastu stromov ovplyvňuje mnoho rôznych faktorov – nielen znečistenie ovzdušia, ale aj počasie (zrážky, teplota), súťaž o zdroje, choroby alebo škodcovia. To znamená, že znížený prírastok dreva nemusí vždy znamenať vyššiu úroveň znečistenia. Takáto multifaktoriálna povaha ovplyvňuje interpretáciu výsledkov. Je potrebné komplexné hodnotenie kontextu, čo zvyšuje zložitosť výskumu.

3. Nemožnosť priameho merania konkrétnych plynných znečisťujúcich látok

Dendrochronológia sama osebe neumožňuje presne identifikovať ani kvantifikovať prítomnosť konkrétnych plynov, ako sú oxidy dusíka (NO_x), oxid uhoľnatý (CO) alebo ozón (O₃). Ukazuje iba nepriamy vplyv týchto látok, napríklad spomalenie rastu alebo zmenu chemického zloženia dreva. Na zistenie konkrétnych chemických zlúčenín sú potrebné doplnkové analytické metódy (napr. hmotnostná spektrometria). Preto sa často kombinuje s inými metódami výskumu.

4. Geografické a druhové obmedzenia

Nie všetky oblasti majú stromy vhodné na dendrochronologický výskum – napríklad v hustej mestskej zástavbe alebo poľnohospodárskej krajine môže byť nedostatok starších stromov. Navyše nie všetky druhy stromov vytvárajú dobre viditeľné a pravidelné letokruhy, čo je základná podmienka analýzy. Niektoré druhy nereagujú výrazne na zmeny v prostredí, čo sťažuje vyhodnocovanie vplyvu znečistenia. Tieto faktory obmedzujú dostupnosť dát v mnohých potenciálne zaujímavých lokalitách.

5. Potrebné odborné vybavenie a dlhý čas spracovania

Proces získavania a spracovania dendrochronologických dát je zložitý a vyžaduje odborné znalosti. Zahŕňa odber jadier, ich sušenie, brúsenie, skenovanie, datovanie a často aj chemickú analýzu (napr. ICP-MS). Každý krok je časovo náročný a vyžaduje špecializované laboratórne zariadenie. V porovnaní s modernými senzormi kvality ovzdušia, ktoré poskytujú údaje takmer okamžite, má dendrochronológia dlhší realizačný cyklus.

Preferencie dendrochronológie pri analýze znečistenia ovzdušia:

1. Možnosť rekonštrukcie historického znečistenia ovzdušia

Jednou z hlavných výhod dendrochronológie je schopnosť rekonštruovať environmentálne zmeny z minulosti, dokonca aj niekoľko storočí dozadu. Stromy si vo svojich letokruhoch uchovávajú environmentálny záznam každého roku života. To umožňuje sledovať historické epizódy znečistenia, napríklad priemyselnú činnosť z 19. storočia. Je to mimoriadne cenné tam, kde chýbajú inštrumentálne dáta.

2. Nepotrebnosť predchádzajúcich terénnych meraní

Analýza letokruhov poskytuje informácie o stave prostredia aj v období, keď ešte neexistovali meteorologické stanice alebo meracie prístroje. Nie je potrebné, aby sa v minulosti uskutočňovali akékoľvek priame merania – stromy si tieto podmienky zaznamenali samy. To robí z dendrochronológie nenahraditeľný nástroj v spätných (retrospektívnych) štúdiách. Umožňuje analyzovať aj staré environmentálne problémy.

3. Prírodné archivovanie dát v živých organizmoch

Stromy fungujú ako biologické záznamové zariadenia – nielenže zaznamenávajú tempo rastu, ale často aj chemické látky z prostredia. Letokruhy predstavujú systematický a chronologicky usporiadaný záznam. To umožňuje presne spojiť konkrétne roky s environmentálnymi zmenami. Tento prirodzený archív je trvácny, odolný a nevyžaduje žiadnu údržbu ako elektronické zariadenia.

4. Využitie pri hodnotení akumulácie ťažkých kovov

Drevo môže absorbovať a ukladať ťažké kovy, ako sú olovo (Pb), kadmium (Cd), zinok (Zn) či meď (Cu), ktoré pochádzajú z pôdy alebo ovzdušia. Analýzou ich koncentrácie v jednotlivých letokruhoch možno identifikovať obdobia zvýšeného znečistenia. To je obzvlášť dôležité v priemyselných oblastiach alebo v blízkosti dopravných tepien, kde býva kontaminácia výraznejšia. Dendrochronológia tak poskytuje užitočný nástroj na sledovanie dlhodobého pôsobenia ľudskej činnosti.

5. Nízko invazívna výskumná metóda

Na rozdiel od mnohých iných metód odberu vzoriek je dendrochronológia šetrná k životnému prostrediu. Jadrá sa odoberajú pomocou špeciálnych vrtákov, ktoré nepoškodzujú strom trvalo. Znamená to, že jeden strom môže byť opakovane použitý na výskum bez toho, aby mu to ublížilo. Je to výhodné najmä v chránených oblastiach alebo v mestských zelených zónach.

Príklad použitia meraní prostredníctvom mobilného laboratoria

Využitie mobilného laboratoria na meranie znečistenia ovzdušia v mestskom prostredí – prípadová štúdia Krakova

V posledných rokoch sa znečistenie ovzdušia stalo jednou z hlavných výziev veľkých miest, vrátane Krakova – mesta, ktoré počas mnohých vykurovacích sezón patrilo medzi najviac znečistené mestá v Európe. V reakcii na rastúcu potrebu monitorovania kvality ovzdušia začali miestne samosprávy v spolupráci s výskumnými inštitúciami a technologickými firmami testovať inovatívne riešenia. Jedným z nich bolo použitie dronov na mobilné merania koncentrácií škodlivých látok v atmosfére.

1. Kontext problému

Krakov sa dlhodobo potýka s problémom smogu, najmä počas jesenných a zimných mesiacov, keď sa zvyšujú emisie z tzv. nízkych zdrojov – teda z domácich kotlov a lokálnych vykurovacích systémov, často spaľujúcich uhlie alebo dokonca odpad. Klasický systém monitorovania založený na stacionárnych meracích staniciach, hoci poskytoval spoľahlivé údaje, mal obmedzený geografický dosah. Nezahrňal všetky mestské časti, najmä nie okrajové a prímestské oblasti, kde sa často používali najnekvalitnejšie palivá. Z tohto dôvodu sa samospráva rozhodla spustiť pilotný projekt využitia dronov na dynamické a priestorovo rôznorodé merania kvality ovzdušia.

2. Základné ciele projektu

Projekt realizovaný mestom Krakov v spolupráci s Technickou univerzitou v Krakove a súkromným operátorom dronov mal za cieľ posúdiť efektívnosť a praktickú využiteľnosť bezpilotných lietadiel pri detekcii znečistenia ovzdušia – predovšetkým pri identifikácii tzv. „smogových ohnísk“, teda domácich kotlov s nadmernými emisiami. Drony boli vybavené špecializovanými senzormi schopnými merať koncentrácie tuhých častíc PM2.5 a PM10, ako aj oxidov dusíka (NO_x), oxidu uhoľnatého (CO), oxidu siričitého (SO₂) a prchavých organických zlúčenín (VOC). Okrem toho mali zabudovaný GPS modul a systém prenosu údajov v reálnom čase.

3. Metodika merania

Drony operovali najmä vo večerných a nočných hodinách, keď boli emisie z domácností najintenzívnejšie. Merania sa vykonávali počas dní s nízkou rýchlosťou vetra a pri výskyte teplotnej inverzie – podmienok, ktoré prispievajú k hromadeniu znečistenia pri zemi.

Trasy letov boli plánované vopred na základe historických údajov o znečistení a hlásení obyvateľov. Drony prelietavali nad vybranými štvrtkami vo výške od 10 do 150 metrov, pričom každých pár sekúnd zaznamenávali koncentrácie sledovaných látok. Týmto spôsobom vznikol trojrozmerný obraz rozloženia znečistenia v priestore.

Údaje boli prenášané do mobilného analytického centra, kde sa okamžite vyhodnocovali a zobrazovali na mapách. V prípade zistenia podozrivo vysokých koncentrácií v konkrétnom mieste bola informácia odovzdaná mestskej polícii, ktorá vykonala kontrolu príslušného vykurovacieho zariadenia.

4. Výsledky a prínosy

Použitie dronov prinieslo niekoľko výrazných výhod:

- presná lokalizácia zdrojov emisií – drony dokázali odhaliť prípady nelegálneho spaľovania odpadu, plastov či mokrého dreva v konkrétnych domácnostiach,
- mapovanie znečistenia v reálnom čase – údaje boli vizualizované na dynamických 3D mapách, čo umožnilo presne určiť oblasti najviac postihnuté smogom,
- efektívnejšie zásahy kontrolných služieb – vďaka presným súradniciam z dronov mohli hliadky konať rýchlejšie a cielenejšie,
- prevencia a edukácia – vedomie, že oblasť môže byť monitorovaná z dronu, pôsobilo preventívne a odrádzalo od nelegálnych praktík pri kureni,
- zber dát pre výskum a modelovanie – namerané hodnoty slúžili na overovanie matematických modelov rozptylu znečistenia a na tvorbu efektívnejších stratégií boja proti smogu.

5. Obmedzenia a výzvy

Napriek úspechu projektu existovali aj isté obmedzenia. Drony mohli lietať len za vhodných poveternostných podmienok – merania sa nevykonávali počas dažďa, sneženia ani silného vetra. Objavili sa tiež právne a regulačné otázky súvisiace s potrebou získania povolení na lety nad obývaným územím a dodržiavania pravidiel ochrany súkromia.

Okrem toho, aj keď senzory boli relatívne presné, mohlo dôjsť k malým odchýlkam v meraniach spôsobeným prúdením vzduchu okolo rotorov dronu. Preto bolo nutné ich pravidelne kalibrovať a testovať v kontrolovaných podmienkach.

6. Závěry a perspektivy

Použitie dronov v Krakove ukázalo, že bezpilotné technológie môžu byť cenným doplnkom klasických systémov monitorovania kvality ovzdušia. Ich mobilita, flexibilita a schopnosť merať koncentrácie škodlivín vo výškach, kde sa klasické senzory nenachádzajú, z nich robí mimoriadne užitočný nástroj pre mestské prostredie s vysokou variabilitou emisií.

Do budúcnosti sa plánuje rozšírenie programu o funkcie automatickej identifikácie typov emisií na základe chemického zloženia dymu a prepojenie so systémami včasného varovania a predpovedí kvality ovzdušia. Drony môžu tiež slúžiť na hodnotenie účinnosti protismogových opatrení, ako je výmena starých kotlov alebo zatepl'ovanie budov.