



INSTYTUT BADAWCZY LEŚNICTWA

Zakład Geomatyki

Symbole: UKD 630.6, 630.2, 630.1
PKT 60.33.00, 60.19.00, 60.09.00
LKO 524.61

Rodzaj sprawozdania: etapowe za 2025 rok

Zlecniodawca: **Narodowy Fundusz ochrony Środowiska i gospodarki Wodnej**

Nr tematu: **2155/2023 (w Funduszu) / 661550 (w IBL)**

Nr umowy: **1853/2023/Wn50/NE-PR/D o dofinansowanie w formie dotacji
zawarta w dniu 07.12.2023 r**

Tytuł tematu: **Znaczenie lasów i gruntów z roślinnością leśną w pochłanianiu
i magazynowaniu CO₂ w ramach nowej strategii leśnej UE 2030 oraz pakietu ustaw
„Gotowi na 55”**



NARODOWY FUNDUSZ
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Kierownik projektu: dr hab. inż. Emilia Wysocka-Fijorek, prof. IBL

Wykonawcy (alfabetycznie): **mgr inż. Radosław Kanabus, mgr inż. Marcin Mionskowski,
mgr Anna Paczosa, dr hab. inż. Paweł Przybylski, prof. IBL, mgr inż. Julia Sochacka,
mgr inż. Radosław Sroga, mgr Mariusz Walęzak, mgr Sylwia Waśniewska, mgr inż.
Marcin Żaczek**

Kierownik Zakładu:

Dyrektor Instytutu:

Sękocin Stary, 2025 r.

SPIS TREŚCI

1 Wstęp	4
2 Znaczenie glebowego węgla organicznego (SOC) i martwej materii organicznej (DOM) w bilansie węgla w lasach Europy Środkowo-Wschodniej w kontekście raportowania LULUCF	9
3. Aktualizacja wstępnych założeń do planu działań naprawczych przygotowywanego w kontekście przepisów art. 13 d rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust.4 rozporządzenia (UE) 2023/839 w związku z roczną oceną na podstawie art. 29 rozporządzenia (UE) 2018/1999 w roku 2025	22
3.1. Martwe drewno	22
3.2. Węgiel organiczny w glebach leśnych	23
4. Podsumowanie i wnioski	25
5. Literatura	28

1 WSTĘP

W maju 2023 roku Rada UE oraz Parlament Europejski przyjęły rozporządzenie UE (2023/839) nowelizujące rozporządzenia: w sprawie włączenia emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem do ram polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030 (2018/841 – dalej jako LULUCFR) oraz Rozporządzenia w sprawie zarządzania unią energetyczną i działaniami w dziedzinie klimatu (2018/1999 – dalej jako GovR). W wyniku przyjętych zmian państwa członkowskie zobowiązały się do podejmowania działań na rzecz zwiększenia pochłaniania gazów cieplarnianych w sektorze LULUCF oraz do wdrażania szczegółowych metod szacowania bilansu emisji i pochłaniania Gazów cieplarnianych (GC) w tym sektorze.

Warto dodać, że aby zapewnić wystarczające działania redukcyjne do 2030 roku, Europejskie prawo o klimacie (ECL) wprowadza limit wkładu pochłaniania netto do unijnego celu klimatycznego na ten rok w wysokości 225 mln ton ekwiwalentu CO₂. Oznacza to, że w rozliczeniu całkowitej redukcji emisji netto GC o 55% do 2030 roku tylko część, maksymalnie 225 mln ton ekw. CO₂, może pochodzić z pochłaniania przez naturalne pochłaniacze, a pozostała część musi wynikać z rzeczywistej redukcji emisji lub zastosowania technologicznych metod pochłaniania. Niemniej rozporządzenie LULUCR, traktując działania związane ze zwiększeniem pochłaniania biogenicznego jako istotny element działań na rzecz neutralności klimatycznej, wprowadza wyższy unijny cel pochłaniania dla sektora LULUCF na poziomie 310 milionów ton ekw. CO₂.

W przypadku Polski wprowadzono indywidualny cel dot. zwiększenia pochłaniania w 2030 r. (dodatkowe pochłanianie w wysokości 3,278 mln t ekw. CO₂ w stosunku do średniej z lat 2016-2018) do którego dojście wymagane będzie przy uwzględnieniu specyficznie uwarunkowanej trajektorii liniowej. Cel w swoim zakresie należy traktować jako ambitny, a jego realizacja w krótkiej perspektywie możliwa jest jedynie przy istotnym wkładzie pochłaniania generowanego na gruntach leśnych (Korosuo et al. 2023).

Ograniczony katalog zachęt dla prywatnych właścicieli gruntów, szczególnie gruntów leśnych, w kontekście realizacji tego celu, powoduje, że w praktyce główny ciężar wyżej wymienionego

wzrostu wielkości pochłaniania CO₂ w Polsce zostanie zapewne przekierowany na Lasy Państwowe.

Warto podkreślić, iż w listopadzie 2025 r. państwa członkowskie uzgodniły na forum Rady ds. Środowiska podejście ogólne do prawnie wiążącego głównego celu redukcji emisji gazów cieplarnianych netto w UE na 2040 r. wynoszącego 90 % w stosunku do emisji w 1990 r. Cel klimatyczny na 2040 r. potwierdza determinację UE w walce ze zmianą klimatu i kształtuje drogę UE po 2030 r., aby zapewnić osiągnięcie przez UE neutralności klimatycznej do 2050 r. Cel neutralności klimatycznej jest zatem centralnym elementem Europejskiego Zielonego Ładu i prawnie wiążącym celem określonym w prawie o klimacie. Unia Europejska przyjmując na poziomie Radu Europejskiej porozumienie ws. celu klimatycznego UE na rok 2040, prawdopodobnie wymusi kolejne działania w sektorze LULUCF, które będą zobowiązywać państwa członkowskie do zwiększania potencjału pochłaniania GHG (m.in. w lasach). Biorąc pod uwagę rosnące znaczenie kompleksowego mechanizmu zarządzania powiązаныmi emisjami, prawdopodobna jest implementacja tzw. podejścia „AFOLU” integrującego rolnictwo, leśnictwo i użytkowanie gruntów. Silne uwzględnienie lasów i gruntów leśnych w polityce klimatycznej UE otwiera nowe możliwości, ale jednocześnie stawia poważne wyzwania związane z jakością danych, interoperacyjnością krajowych systemów oraz koniecznością stosowania transparentnych i naukowo solidnych metod szacunkowych..

W tym kontekście, szczególnej uwagi wymaga mechanizm przygotowania danych dla sektora LULUCF opracowany na potrzeby krajowych inwentaryzacji emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych (wykazów GC). Za ich wykonanie w Polsce odpowiada — zgodnie z ustawą z dnia 17 lipca 2009 r. o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji (Dz.U. 2022 poz. 673 ze zm.) — Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE), funkcjonujący w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym. Proces przygotowania raportu, zawierającego inwentaryzację gazów cieplarnianych, nadzorowany jest przez Ministra Klimatu i Środowiska (jako elementu nadzoru nad IOŚ PIB), zaś akceptacja raportu (umożliwiająca jego przedłożenie na forum UE i UNFCCC/PP) odbywa się na poziomie Komitetu ds. Europejskich przy Kancelarii Prezesa Rady Ministrów.

Po akceptacji raportów na poziomie krajowym, ale przed przesłaniem inwentaryzacji do Sekretariatu konwencji UNFCCC (termin 15 kwietnia), państwa członkowskie wysyłają swoje szacunki emisji do Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) do 15 marca, co pozwala na sporządzenie unijnej inwentaryzacji (przedkładanej później na forum Konwencji UNFCCC i Porozumienia Paryskiego). Warto wskazać, iż inwentaryzacje przedkładane do EEA w terminie marcowym zawierają (poza samymi informacjami odnoszącymi się do obliczeń emisji GC) szereg informacji dodatkowych, wykraczających poza zakres wymagany w ramach ram transparentności Porozumienia paryskiego. Informacje te odnoszą się m.in. do statusu realizacji celów ograniczenia emisji gazów cieplarnianych dla sektorów objętych rozporządzeniem ws. wiążących rocznych redukcji emisji gazów cieplarnianych przez państwa członkowskie od 2021 r. do 2030 r (ESR), a także innych zobowiązań i celów nakreślonych rozporządzeniem w sprawie włączenia emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem do ram polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030 (LULUCFR).

W ramach opisanego przygotowania danych dla sektora LULUCF wyróżnia się trzy stopnie dokładności stosowanych metod statystycznych — TIER 1, TIER 2 oraz TIER 3. Każdy kolejny stopień charakteryzuje się rosnącymi wymaganiami dotyczącymi precyzji, szczegółowości oraz jakości danych. TIER 1 opiera się na prostych, często standardowych współczynnikach emisji i pochłaniania, które są mniej dokładne, ale łatwe do zastosowania na poziomie krajowym. TIER 2 wprowadza bardziej szczegółowe wskaźniki, uwzględniające specyfikę krajowych i lokalnych warunków i praktyk zarządzania gruntami, co pozwala na poprawę jakości szacunków. Najwyższy poziom, TIER 3, zakłada stosowanie zaawansowanych modeli, lokalnych pomiarów i szerokiego zakresu danych, umożliwiając najbardziej precyzyjną i reprezentatywną ocenę sald emisji i pochłaniania GC w sektorze LULUCF. Wybór odpowiedniego stopnia TIER zależy od dostępności danych, zasobów oraz wymogów raportowych, przy czym dążenie do wyższych poziomów dokładności odgrywa kluczową rolę w poprawie wiarygodności i efektywności polityk klimatycznych.

Obecne zmiany w proporcjach alokacji węgla w ekosystemach leśnych wskazują na zmniejszanie się udziału węgla w biomasie nadziemnej, który obecnie wynosi około 35–55% całkowitego zasobu węgla, podczas gdy historycznie szacowano go na 40–60%. Udział węgla w biomasie podziemnej, obejmującej systemy korzeniowe, utrzymuje się relatywnie stabilnie na poziomie około 20–30%, zależnie od lokalnych warunków. Szczególnie istotne znaczenie

zyskuje martwa materia organiczna, rozumiana jako węgiel zgromadzony w martwym drewnie, ściółce oraz organicznej materii glebowej, której udział szacuje się na 30–50%. Zawartość węgla w ściółce wynosi około 5–10%, natomiast udział węgla w martwym drewnie wzrósł do 5–15%, zwłaszcza w lasach dotkniętych zaburzeniami, takimi jak susza, gradacje szkodników czy wichury. Dynamiczne zmiany w tych rezerwuarach mogą w znaczący sposób wpływać na całkowite zasoby węgla i ich zmiany - szczególnie w ekosystemach leśnych.

Zachodzące zmiany podkreślają konieczność dokładniejszej inwentaryzacji tych rezerwuarów. Sytuacja ta została również uwzględniona w legislacji Unii Europejskiej, gdzie poprzez nowelizację załącznika I do rozporządzenia LULUCF zmieniono zakres przedmiotowy enumeratywnie wymienionych rezerwuarów węgla, które muszą być uwzględniane w szacunkach dla sektora LULUCF. W ten sposób podkreślono znaczenie dynamicznych zmian zasobów węgla obserwowanych w glebach, martwym drewnie oraz martwej materii organicznej..

Znaczenie tych rezerwuarów podkreślono także poprzez zaostrzenie wymagań dotyczących stosowanych w raportach metod inwentaryzacyjnych. Od momentu przedłożenia inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych w 2028 r. państwa członkowskie zobowiązane są stosować metody co najmniej na poziomie TIER 2, zgodnie z wytycznymi IPCC z 2006 r.. Natomiast najpóźniej od przedłożenia wykazów GC w 2030 r. państwa mają obowiązek stosować metody poziomu 3, również według tych samych wytycznych, dla wszystkich szacowanych emisji i pochłaniania węgla w rezerwuarach węgla obejmujących jednostki użytkowania gruntów o wysokiej zawartości pierwiastka węgla.

Inną istotną zmianą wynikającą z nowelizacji rozporządzenia LULUCF jest obowiązek przygotowania planu działań naprawczych w przypadku niewystarczającego postępu w realizacji celów klimatycznych. W przypadku otrzymania przez kraj drugiej i kolejnej rocznej oceny dokonanej przez KE na podstawie art. 29 rozporządzenia (UE) 2018/1999, z której wynikać będzie, że działania prowadzone na rzecz spełnienia celu dla sektora LULUCF określonego dla danego kraju w kolumnie C załącznika IIa Rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust.4 rozporządzenia (UE) 2023/839 są niewystarczające, wówczas kraj ten jest zobowiązany do opracowania takiego planu. Polska i inne państwa czł. UE, jeśli zobowiązane będą do przygotowania planu działań naprawczych, w ich treści powinny uwzględnić m.in.:

- możliwe przyczyny niewystarczających postępów w realizacji celu określonego zgodnie z art. 4 ust. 3 rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust. 11 rozporządzenia (UE) 2023/839, biorąc pod uwagę trajektorię liniową i pulę ustaloną zgodnie z art. 4 ust. 4 rozporządzenia (UE) 2018/841, a także elastyczności przewidziane w niniejszym rozporządzeniu
- ocenę tego, w jaki sposób finansowanie unijne wspiera krajowe wysiłki na rzecz osiągnięcia celu i puli określonej zgodnie z art. 4 ust. 3 rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust. 4 rozporządzenia (UE) 2023/839 oraz w jaki sposób to państwo członkowskie zamierza wykorzystać unijne finansowanie, aby poczynić postępy w ich realizacji
- charakterystyki potencjalnych dodatkowych działań uzupełniających, zintegrowany krajowy plan w dziedzinie energii i klimatu dla Polski, zgodnie z rozporządzeniem (UE) 2018/1999 lub działania wspierające jego wdrażanie, które to państwo członkowskie będzie realizować, aby osiągnąć swój cel określony zgodnie z art. 4 ust. 3 lub swoją pulę określoną zgodnie z art. 4 ust. 4 rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust. 4 rozporządzenia (UE) 2023/839, poprzez politykę i środki krajowe oraz realizację działań Unii, wraz ze szczegółową oceną, popartą danymi ilościowymi, jeżeli są one dostępne, przewidywanego pochłaniania gazów cieplarnianych netto, które ma być wynikiem tych działań;
- potencjalny harmonogram realizacji takich działań, umożliwiający ocenę rocznych postępów w realizacji.

2 ZNACZENIE GLEBOWEGO WĘGLA ORGANICZNEGO (SOC) I MARTWEJ MATERII ORGANICZNEJ (DOM) W BILANSIE WĘGLA W LASACH EUROPY ŚRODKOWO-WSCHODNIEJ W KONTEKŚCIE RAPORTOWANIA LULUCF

Lasy odgrywają kluczową rolę w globalnym bilansie węgla, działając nie tylko jako ważne pochłaniacze dwutlenku węgla (CO_2), lecz także jako długoterminowe magazyny tego pierwiastka w biosferze. Ekosystemy lądowe, głównie leśne, pochłaniają rocznie szacunkowo około 11 Gt CO_2 , podczas gdy globalne emisje ze spalania paliw kopalnych i użytkowania gruntów sięgają 36 Gt CO_2 rocznie. Tym samym lasy równoważą blisko jedną trzecią antropogenicznych emisji CO_2 (Fernandez-Martinez et al. 2014; Luyssaert et al. 2008). W Polsce rola lasów w pochłanianiu CO_2 jest istotna: szacuje się, że corocznie pochłaniają około 40 mln ton CO_2 , a łączny zapas węgla zmagazynowanego w ekosystemach leśnych przekracza 1 miliard ton (siedlce.warszawa.lasy.gov.pl).

Zmagazynowany węgiel występuje w lasach w różnych formach i „zbiornikach” (pools): w biomasie żywych drzew (pnie, korony, korzenie), martwej materii organicznej (DOM: martwe drewno stojące, martwe drewno leżące pniaki, ściółka) oraz (w bardzo istotnej mierze) w glebach, jako glebowy węgiel organiczny (SOC, soil organic carbon). Gleby leśne często przechowują ponad połowę całkowitego zapasu węgla w ekosystemie leśnym. W semi-naturalnych lasach Puszczy Białowieskiej gleba zawiera w sobie około 58% całkowitego zapasu węgla ekosystemów leśnych, podczas gdy żywa biomasa zawiera 36%, a martwe drewno około 6% (Bono et al. 2024; Campioli et al. 2015). Dominacja glebowego zapasu węgla jest charakterystyczna także dla innych stref umiarkowanych i borealnych, gdzie warunki klimatyczne i stosunkowo powolna mineralizacja sprzyjają jego długoterminowej stabilizacji (Zhou et al. 2006; Luyssaert et al. 2008).

Informacje opisujące zapas węgla organicznego a glebach leśnych odnoszą się do węgla zmagazynowanego w próchnicy i zawartego w kwasach organicznych rozpuszczonych w roztworze glebowym, zarówno w warstwach powierzchniowych, jak i mineralnych. Jego wielkość i stabilność zależą od wielu czynników środowiskowych i antropogenicznych.

Wśród najistotniejszych wymienia się: typ gleby (skład granulometryczny, zawartość i jakość próchnicy, kwasowość), warunki klimatyczne (temperatura, opady, długość okresu wegetacyjnego), skład gatunkowy drzewostanu, historię użytkowania oraz zabiegi gospodarki leśnej (Gruba & Mulder 2015; Baritz et al. 2010; Zhou et al. 2006).

Typ gleby decyduje o zdolności sorpcyjnej, retencji wody i tempie mineralizacji materii organicznej. Na przykład gleby ilaste i gliniaste (w porównaniu do piaszczystych) wykazują większy potencjał stabilizacji SOC w formie trwałych kompleksów próchniczno-mineralnych (Kaczmarek et al. 2023). Klimat wpływa nie tylko na dopływ materii organicznej (poprzez produktywność drzewostanu), ale też na tempo rozkładu i mineralizacji. W chłodniejszych i wilgotniejszych warunkach (np. w lasach borealnych) SOC akumuluje się wolniej, ale ulega mniejszym stratom niż w cieplejszych, bardziej suchych regionach (Fernandez-Martinez et al. 2014; Tuomi et al. 2009). Skład gatunkowy drzewostanu wpływa na jakość i ilość dostarczanej ściółki, tempo jej rozkładu, oraz strukturę mikrosiedliskową. Lasy iglaste (np. sosnowe) dostarczają ściółki o większej zawartości trudno rozkładalnej ligniny. Natomiast lasy liściaste (np. bukowe) wspierają szybszy cykl humifikacji, korzystniejszy dla powstawania próchnicy glebowej. Mieszane drzewostany wykazują często najwyższy poziom akumulacji SOC w efekcie synergii struktury gleby, różnorodności mikroorganizmów i różnic w składzie opadu organicznego (Campioli et al. 2015).

Praktyki zarządzania i użytkowania lasów mają kluczowe znaczenie dla utrzymania lub degradacji SOC. Zmiana użytkowania gruntów (np. wylesienie, urbanizacja, przekształcenie w grunty orne) prowadzi do gwałtownego uwolnienia węgla z gleby zarówno przez usunięcie roślinności, jak i naruszenie struktury poziomów organicznych (Gruba et al. 2021; Wysocka-Fijorek et al. 2023). Nawet intensywne użytkowanie gospodarcze (np. orka, melioracje, zręby zupełne) może spowodować obniżenie SOC poprzez zaburzenia mikroklimatu, zmianę dopływu materii organicznej i zwiększenie tempa mineralizacji. Z kolei zachowanie ciągłości pokrywy leśnej, unikanie głębokiej penetracji gleby i pozostawianie DOM może sprzyjać stabilizacji lub nawet akumulacji SOC.

W warunkach Europy Środkowo-Wschodniej, zwłaszcza w siedliskach borowych i lasów mieszanych, zasoby SOC w glebie mineralnej do 1 metra głębokości¹ osiągają wartości rzędu 100–200 Mg C/ha, co odpowiada około 50–70% całkowitej puli węgla w ekosystemie leśnym (Campioli et al. 2015; Bono et al. 2024; Wysocka-Fijorek et al. 2023). Dane te potwierdzają również analizy wykonane w Polsce z wykorzystaniem modelu CBM-CFS3. Model ten, kalibrowany na podstawie drugiego cyklu Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu (WISL, 2010–2014), pozwolił na estymację zasobów SOC z podziałem na regiony przyrodniczo-leśne oraz typy siedlisk. Zasoby SOC w glebie mineralnej w modelu CBM wyniosły średnio 124,9 Mg C/ha, przy czym najniższe wartości notowano w krainach południowo-zachodnich, a najwyższe w północno-wschodnich i wschodnich regionach Polski m.in. w lasach grądowych i olsowych na glebach organicznych i mineralno-organicznych (Wysocka-Fijorek et al. 2023; Bono et al. 2024). Akumulacja SOC jest procesem długoterminowym, uwarunkowanym tempem mineralizacji węgla zakumulowanego i ciągłością dopływu (tj. efektem substytucji) szczątków organicznych (opad liści i igliwia, martwe korzenie), tempem ich humifikacji oraz równowagą pomiędzy procesami mineralizacji i stabilizacji.

W warunkach Polski i sąsiednich państw strefy umiarkowanej szczególne znaczenie mają gleby kwaśne, o silnym zakwaszeniu profilu, w których tempo rozkładu jest ograniczone, co sprzyja gromadzeniu trwałych frakcji próchnicy. SOC może być stabilizowany na drodze sorpcji chemicznej do cząstek mineralnych (frakcje ilaste), inkorporacji do mikroagregatów lub dzięki obecności biochemicznie opornych związków, jak lignina czy garbniki, charakterystycznych dla ściółki iglastej (Tuomi et al. 2009; Gruba et al. 2021). W lasach iglastych SOC często koncentruje się w poziomie organicznym (O), natomiast w lasach liściastych i mieszanych większy udział obserwuje się w poziomie próchnicznym gleby mineralnej (Campioli et al. 2015; Kaczmarek et al. 2023).

Tempo przyrostu SOC w dojrzałych lasach jest stosunkowo niskie. Badania Gruba & Mulder (2015) wskazują, że wynosi ono przeciętnie 0,4–0,6 Mg C/ha/rok, choć w młodszych uprawach lub na siedliskach przekształconych wartości te mogą być wyższe. Analizy długoterminowe

¹ Przy czym w krajowej inwentaryzacji emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych zasoby SOC w glebach obliczane są do głębokości 0,3 m.

wskazują jednak, że w ustabilizowanych drzewostanach SOC może osiągać stan równowagi, w którym dalszy przyrost jest zrównoważony przez straty wynikające z mineralizacji. Dane z WISL dla siedlisk borów i borów mieszanych w Polsce nie wykazały istotnych trendów wzrostowych zasobów SOC w ciągu ostatnich trzech dekad, mimo rosnącego wieku i miąższości drzewostanów, co potwierdza hipotezę stabilizacji zasobów w starszych ekosystemach leśnych (Gruba et al. 2021). Na zmiany trendów akumulacji SOC wpłynąć może użytkowanie lasów oraz efekt historycznych zmian praktyk gospodarczych. Na przykład gleby pochodzenia rolniczego, które zostały zalesione po II wojnie światowej, charakteryzują się nadal niższymi zasobami SOC w porównaniu do lasów naturalnych (Gruba et al. 2021). W modelu CBM-CFS3 uwzględniono takie historyczne schematy użytkowania gospodarczego, włączając przekształcenia siedliskowe w obliczenia bilansu węgla. Modele pokazały, że nawet przy zachowaniu ciągłości pokrywy leśnej tempo zmian SOC w Polsce jest niskie i wynosi poniżej 0,2 Mg C/ha/rok. W wyniku tego zjawiska drzewostany w Polsce charakteryzuje relatywnie stabilny bilans w dłuższym okresie, o ile nie dochodzi do nagłych zaburzeń (Wysocka-Fijorek et al. 2023; Bono et al. 2024).

Martwa materia organiczna (DOM) stanowi istotny, choć często niedoszacowany komponent obiegu węgla w lasach. Składa się głównie z martwego drewna (w tym powalonych pni, gałęzi, stojących ale suchych osobników i pniaków) oraz ze ściółki leśnej tj. warstwy organicznej zbudowanej z opadłych liści, igliwia, drobnych szczątków roślinnych i mikroorganizmów. DOM w ekosystemie leśnym pełni dwojaką funkcję w obiegu węgla: z jednej strony jest przejściowym magazynem węgla, a z drugiej źródłem emisji CO₂ w miarę postępującego rozkładu. Jego ilość w ekosystemie leśnym waha się istotnie w zależności od warunków siedliskowych, klimatycznych oraz sposobu gospodarowania. W lasach Europy Środkowo-Wschodniej zawartość węgla w DOM może wynosić od kilku do kilkudziesięciu Mg C/ha. Wartość ta odpowiada 3–7% całkowitej puli węgla ekosystemowego w lasach gospodarczych, jednak nawet 15–20% w starych lasach naturalnych (Luyssaert et al. 2008; Campioli et al. 2015; Bono et al. 2024). Dane pochodzące z WISL w Polsce wskazują na znaczne zróżnicowanie zapasów DOM między typami lasów. W lasach gospodarczych średnia zasobność w martwe drewno wynosi 6–12 m³/ha, co odpowiada ok. 2–5 Mg C/ha. Tymczasem w lasach nieobjętych użytkowaniem – takich jak Białowiecki Park Narodowy – wartości te sięgają 40–80 m³/ha, czyli nawet ponad 20 Mg C/ha. W modelu CBM-CFS3, zaimplementowanym dla lasów Polski, średnia całkowita zawartość węgla w DOM (łącznie martwe drewno i ściółka) została

oszacowana na około 10,5 Mg C/ha, z czego ok. 60% przypada na frakcje grubo- i średniowymiarowego drewna, a pozostała część na drobną materię organiczną i ściółkę (Wysocka-Fijorek et al. 2023; Bono et al. 2024). Największe zapasy DOM odnotowano w starych drzewostanach liściastych oraz na siedliskach wilgotnych i bagiennych, gdzie tempo mineralizacji jest spowolnione z powodu niskiej dostępności tlenu i wysokiej wilgotności gleby.

DOM odgrywa także ważną rolę ekologiczną i funkcjonalną w lesie. Martwe drewno stanowi mikrośrodowisko dla licznych gatunków grzybów, owadów saproksylicznych, mchów i porostów, a także uczestniczy w retencji wody i odbudowie struktury gleby po zakłóceniach. Pozostawienie martwego drewna jest dziś zalecanym elementem gospodarki pro-przyrodniczej, wpisującym się zarówno w strategię ochrony różnorodności biologicznej, jak i łagodzenia zmian klimatu. Badania wskazują, że zwiększenie ilości DOM w drzewostanach – nawet kosztem krótkoterminowych emisji CO₂ – przyczynia się do wzrostu zdolności adaptacyjnej lasów i poprawy bilansu węgla w dłuższej perspektywie (Luyssaert et al. 2008; Gadow et al. 2012).

Rozkład DOM to proces kontrolowany przez zespół czynników klimatycznych (temperatura, wilgotność), biotycznych (obecność saproksylicznych grzybów i bezkręgowców) oraz właściwości samego substratu, takich jak: rozdrobnienie, stosunek C/N czy zawartość ligniny. Drewno iglaste, ubogie w związki łatwo rozkładalne, wykazuje dłuższy czas połowicznego rozkładu niż drewno liściaste. W związku z tym w drzewostanach iglastych obserwujemy dłuższy okres retencji węgla w DOM (Tuomi et al. 2009; Kaczmarek et al. 2023). W modelu CBM-CFS3 rozróżnia się 21 podkategorii DOM, w tym frakcje zróżnicowane według średnicy, położenia (leżące, stojące), części drzewa (pnie, gałęzie, korzenie) oraz przypisane tempo rozkładu w zależności od strefy klimatycznej. Dzięki temu możliwe jest modelowanie nie tylko aktualnych zasobów DOM, ale również przepływów węgla pomiędzy pulami martwej biomasy, ściółki i gleby, a także emisji CO₂ w miarę rozkładu (Bono et al. 2024; Kurz et al. 2009). W kontekście zarządzania zasobami DOM w Polsce, CBM-CFS3 pozwala na analizę wpływu różnych scenariuszy użytkowania np. pozostawianie kłód po trzebieżach, zmniejszenie intensywności pozyskania lub tworzenie stref referencyjnych bez ingerencji. Wyniki pokazują, że scenariusze obejmujące wzrost ilości DOM prowadzą do wyższych średnich zapasów węgla w ekosystemie leśnym, zwłaszcza w kombinacji z umiarkowanym wzrostem biomasy żywej. Jednocześnie obserwuje się znaczne zróżnicowanie regionalne: w regionach o dużym udziale

starych lasów liściastych DOM odgrywa większą rolę w bilansie węgla niż w monokulturach sosnowych na ubogich siedliskach (Wysocka-Fijorek et al. 2023).

Martwa materia organiczna stanowi dynamiczny, ale istotny komponent bilansu węgla w lasach Europy Środkowo-Wschodniej. Jej ilość i stabilność zależą od wieku drzewostanów, składu gatunkowego, siedliska i sposobu gospodarowania. Włączenie DOM do modeli empirycznych, takich jak CBM-CFS3, znacząco poprawia reprezentatywność metod stosowanych dla sektora LULUC w różnorodnych mechanizmach sprawozdawczych (GovR, Rozporządzenie (UE) 2024/1991 ws. Rozporządzenie (UE) 2024/1991 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 czerwca 2024 r. w sprawie odbudowy zasobów przyrodniczych i zmiany rozporządzenia (UE) 2022/869) o oraz pozwala na projektowanie bardziej zrównoważonych strategii gospodarki leśnej.

Jednym z modeli empirycznych implementowanym w Polsce docelowo analizującym aspekt zmian DOM jest CBM-CFS3 (Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector). Został on opracowany pierwotnie w Kanadzie, następnie model dostosowano do warunków europejskich. Obecnie w wielu państwach członkowskich UE, w tym w Polsce jest on wykorzystany do szacowania emisji i pochłaniania CO₂ dla ekosystemów leśnych i agroleśnych w LULUCF (Kurz et al. 2009; Wysocka-Fijorek et al. 2023). W Polsce CBM-CFS3 został zaimplementowany przez Instytut Badawczy Leśnictwa we współpracy z BULiGL, przy wsparciu danych pochodzących z drugiego cyklu Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu (WISL, lata 2010–2014). Kalibracja modelu opierała się na przypisaniu parametrów wzrostu, miąższości, dynamiki DOM oraz zawartości SOC do 25 typów siedliskowych lasu i 15 klas gatunkowych. Model pozwala na przestrzenne odwzorowanie zasobów węgla oraz estymację strumieni emisji i pochłaniania w czasie, z rozdzielczością regionalną (na poziomie krain przyrodniczo-leśnych) oraz czasową (roczną) (Bono et al. 2024). CBM-CFS3 operuje na podziale ekosystemu leśnego na kilka pul (pools) węgla: żywa biomasa nadziemna i podziemna, DOM w postaci martwego drewna grubego, drobnego i ściółki, oraz SOC – zróżnicowany w zależności od głębokości i typu gleby. Procesy modelowane obejmują przyrost biomasy, śmiertelność, opad organiczny, rozkład, mineralizację oraz transformacje między pulami. Model uwzględnia także interwencje gospodarcze (cięcia, trzebieże) oraz zakłócenia naturalne (wiatry, pożary), co umożliwia empiryczne odwzorowanie zmian bilansu węgla (Kurz et al. 2009; Gruba et al. 2021).

W polskich warunkach CBM-CFS3 wykazał, że średnia roczna akumulacja CO₂ przez lasy wynosiła około 28,3 mln ton CO₂/rok w latach 2013–2018, przy czym największy udział miała żywa biomasa (~60%), natomiast SOC i DOM łącznie odpowiadały za około 35% netto pochłaniania (Wysocka-Fijorek et al. 2023). Zasoby SOC zostały oszacowane na 1,8–2,0 mld Mg C, z największymi wartościami w lasach wilgotnych i bagiennych, szczególnie w północno-wschodnich regionach Polski. DOM oszacowano na około 100–110 mln Mg C, z największymi zasobami w starych drzewostanach liściastych i rezerwatach. Aktywne zarządzanie profilem absorpcji CO₂ w gospodarce leśnej, wspierane przez model CBM-CFS3, pozwala na symulację różnych scenariuszy zarządzania, takich jak zmiany w gospodarce martwym drewnem, różnorodne schematy zalesiania gruntów porolnych czy kierunkowe modyfikacje składu gatunkowego. Uzyskane wyniki umożliwiają ocenę wpływu podejmowanych decyzji gospodarczych na bilans węgla do roku 2030 lub 2050. Badania przeprowadzone na potrzeby raportów krajowych dla UNFCCC i Komisji Europejskiej wykazały, że utrzymanie obecnej intensywności użytkowania lasów skutkuje stabilizacją pochłaniania CO₂. Scenariusze z większym udziałem domieszek liściastych lub wzrostem ilości DOM mogą istotnie wpływać na długoterminowy bilans węgla, głównie dzięki poprawie jakości ściółki i wzrostowi stabilności SOC (Bono et al. 2024). Dodatkowo w modelu CBM-CFS3 szczególną uwagę poświęca się klasyfikacji gruntów leśnych zgodnie z definicją LULUCF, co oznacza konieczność uwzględniania historii użytkowania analizowanego obszaru, oraz precyzyjnej alokacji danych do odpowiednich klas IPCC (zarówno w kontekście klas użytkowania gruntu, jak form pokrycia gruntu). Dzięki integracji z danymi z WISL i mapami referencyjnymi możliwa była retrospektywna analiza historii użytkowania dla około 90% powierzchni leśnej Polski (Wysocka-Fijorek et al. 2023). Zastosowanie CBM-CFS3 w Polsce podniosło jakość raportowania LULUCF, umożliwiło spójną walidację danych z WISL z danymi zintegrowanymi w modelach i stworzyło podstawy do projektowania działań łagodzących zmiany klimatu w sektorze leśnym. Uwzględnienie SOC i DOM jako integralnych komponentów systemu pozwala uniknąć niedoszacowania pochłaniania CO₂ oraz lepiej planować działania adaptacyjne w ramach polityk środowiskowych UE.

W gospodarce leśnej skoncentrowanej na pochłanianiu CO₂ skład gatunkowy drzewostanu, a zwłaszcza udział gatunków liściastych, odgrywa istotną rolę w regulowaniu procesów obiegu węgla. Glebowy węgiel organiczny stanowi kluczowy składnik bilansu węglowego ekosystemów lądowych, a jego zasoby w lasach często przewyższają zawartość węgla

w biomacie drzew. Szacuje się, że w lasach pierwotnych i zbliżonych do naturalnych ponad połowa całkowitego zapasu węgla zmagazynowana jest właśnie w glebach oraz martwej materii organicznej. Przykładowo, kompleks leśny Puszczy Białowieskiej kumuluje średnio około 300 Mg C/ha w sumie we wszystkich rezerwuarach, z czego tylko 41% przypada na biomasę żywych drzew, a reszta (niemal 60%) znajduje się w glebach i martwej materii organicznej (Matuszkiewicz et al. 2021; FAO AGRIS). Zdolność lasu do długotrwałej sekwestracji CO₂ zależy w dużej mierze od stabilności węgla glebowego. Węgiel organiczny w glebie występuje w różnych formach: od łatwo rozkładalnej materii organicznej o krótkim czasie rezydencji, po formy stabilniejsze związane z minerałami lub zamknięte w agregatach glebowych. Trwałość glebowej materii organicznej jest determinowana przez czynniki fizykochemiczne (np. związanie z frakcją ilastą), aktywność mikroorganizmów i fauny glebowej, a także poprzez skład gatunkowy drzewostanu. Lasy liściaste sprzyjają większej akumulacji węgla w mineralnej części gleby, podczas gdy pod drzewostanami iglastymi więcej węgla gromadzi się w powierzchniowej warstwie organicznej (ściółce). Domieszki gatunków liściastych w drzewostanach iglastych prowadzą do większej heterogeniczności składu opadu organicznego oraz szybszego obiegu materii i lepszego wymieszania próchnicy z mineralną glebą, co może zwiększać długoterminową stabilność sekwestrowanego węgla w głębszych warstwach gleby (Nickels et al. 2021). Dane z Polski (Gruba et al. 2021) pokazują, że lasy mieszane, wykazują wyższy potencjał akumulacji SOC niż monokultury sosnowe. Na przykład w lasach grądowych i łęgowych z dominacją drzew liściastych zasoby glebowego węgla organicznego przekraczają 150–200 Mg C/ha, natomiast w ubogich borach sosnowych wartość ta często nie przekracza 90–120 Mg C/ha; (Wysocka-Fijorek et al. 2023). Podobne obserwacje odnotowano w Niemczech i Czechach (Jandl et al. 2021), gdzie lasy liściaste i mieszane miały wyraźnie większe zasoby SOC w głębszych warstwach gleby mineralnej, podczas gdy gleby borów sosnowych wykazywały wysoką zawartość próchnicy w warstwach powierzchniowych, ale niską trwałość przy zakłóceniach. Martwa materia organiczna, obejmująca ściółkę i martwe drewno, także wykazuje zależność od składu gatunkowego. Drzewa iglaste dostarczają ściółki o dużej zawartości ligniny i niskim stosunku C:N, co skutkuje powolnym rozkładem i tworzeniem grubych warstw surowej próchnicy. Lasy liściaste dostarczają opad organiczny szybciej mineralizowany i szybciej wbudowywany w profil glebowy. Obecność martwego drewna liściastego o większym udziale łatwo rozkładalnych frakcji przyspiesza tworzenie próchna drzewnego i ułatwia kolonizację przez mikroorganizmy saproksyliczne. W Puszczy Białowieskiej, gdzie udział DOM jest wyjątkowo wysoki, stwierdzono 60–120 m³ martwego

drewna na hektar, a całkowity udział tej puli w bilansie węgla sięga 20% (Matuszkiewicz et al. 2021; Gadow et al. 2012). Należy zauważyć także fakt wpływu gatunków liściastych na strukturę mikroklimatu leśnego (większe uwilgotnienie, bardziej zróżnicowane światło) oraz rozwój fauny glebowej (dżdżownice, skoczogonki i inne saprofagi), co zwiększa obieg materii organicznej i wspomaga humifikację. Długoterminowe obserwacje wskazują, że w ekosystemach o wyższej różnorodności gatunkowej wolumen DOM i SOC jest bardziej stabilny w czasie, co przekłada się na większą odporność ekosystemu na zakłócenia (np. susze, pożary, presję antropogeniczną).

Gospodarowanie lasami, które zwiększa udział domieszek liściastych w drzewostanach iglastych wykazuje potencjał nie tylko wzbogacania bioróżnorodności, lecz także poprawy trwałości sekwestracji węgla. Badania symulacyjne wskazują, że w scenariuszach z większym udziałem liściastych DOM i SOC wykazują wyższe wskaźniki akumulacji i stabilizacji, zwłaszcza na siedliskach świeżych i wilgotnych (Kurz et al. 2009; Bono et al. 2024). Z kolei drzewostany jednowiekowe i jednogatunkowe, szczególnie sosnowe, charakteryzują się niską odpornością węglową, ubogą ściółką i podatnością na zakłócenia.

W Polsce większość lasów państwowych to drzewostany iglaste, szczególnie sosnowe, często w monokulturach. Obecnie w PGL LP trwają intensywne procesy związane z przebudową niestabilnych monokultur na biologicznie zróżnicowane ekosystemy. W tym kontekście należy podkreślić że synergia pomiędzy składem gatunkowym, trybem użytkowania i wiekiem drzewostanu decyduje o jakości i trwałości sekwestracji. Lasy mieszane i liściaste, użytkowane w sposób przyrodniczo zorientowany, wykazują lepsze parametry w zakresie pochłaniania i stabilizacji CO₂ niż monokultury intensywnie eksploatowane.

Ważnym czynnikiem w kontekście zrozumienia wartości wykazywanego przez poszczególne państwa związanego węgla w ekosystemach leśnych, jest zagadnienie implementacji metod szacunków IPCC, pod które podlegają zmiany glebowego węgla organicznego (SOC) oraz martwej materii organicznej (DOM) w ekosystemach leśnych i agroleśnych. Wytyczne te zobowiązują kraje do ujmowania pięciu podstawowych pul węgla: żywej biomasy nad oraz podziemnej, martwego drewna, ściółki, gleb mineralnych i organicznych (IPCC 2006; IPCC 2019). Różnice między państwami nie dotyczą zatem samego zakresu szacunków, lecz poziomu szczegółowości metod (Tier 1–3), jakości i gęstości sieci pomiarowych, sposobu wykorzystania modeli ekosystemowych oraz stopnia transparentności dokumentacji. W efekcie

możliwości porównywania danych o SOC i DOM między krajami sąsiadującymi: Polska, Niemcy, Czechy, Słowacja, Litwa czy państwa spoza UE (Białoruś, Ukraina), wymagają uwzględnienia zarówno uwarunkowań przyrodniczych, jak i metodycznych.

Podstawowy podział metod dla DOM wg wytycznych IPCC opiera się na trzech poziomach szczegółowości metod inwentaryzacyjnych. Tier 1 w swoim uproszczonym podejściu zakłada brak zmian w glebowym węglu organicznym (SOC) oraz martwej materii organicznej (DOM), o ile nie następuje zmiana użytkowania gruntów lub systemu gospodarowania (IPCC 2006). Tier 2 opiera się na krajowych danych i współczynnikach emisji/pochłaniania (EF) dostosowanych do lokalnych warunków, natomiast Tier 3 obejmuje zaawansowane modele procesowe lub powtarzane inwentaryzacje na stałych powierzchniach, umożliwiające bezpośrednią ocenę zmian w czasie (Grassi et al. 2022). W praktyce wiele państw Europy Środkowo-Wschodniej, w tym Polska, Słowacja i Litwa, przez długi czas stosowało Tier 1 dla SOC i DOM, co prowadziło do raportowania zerowych zmian tych wartości przy braku danych empirycznych (Holmgren 2021).

Na tle regionu wyróżniają się kraje takie jak Niemcy, które wczesne zainwestowały w rozbudowane programy monitoringu i modelowania. Niemcy dysponują rozbudowaną Krajową Inwentaryzacją Lasów (Bundeswaldinventur), włączającą pomiary martwego drewna, oraz niezależną National Forest Soil Inventory (NFSI), prowadzoną na stałej siatce punktów (ok. 8×8 km) i powtarzaną w odstępach kilkunastoletnich (Wellbrock et al. 2024). Pozwala to na zastosowanie podejścia Tier 2 dla gleb leśnych i stopniowe przechodzenie w kierunku Tier 3. W tym systemie zmiany SOC są szacowane na podstawie powtórnych pomiarów, a nie wyłącznie przy użyciu domyślnych współczynników. Martwa materia organiczna jest włączana do bilansu w oparciu o dane NFI oraz modele rozkładu DOM (Köhl et al. 2020). Równolegle prowadzona jest ogólnokrajowa inwentaryzacja gleb rolnych i trawiastych, która dostarcza danych do ulepszania raportowania SOC także poza lasami (Global Research Alliance 2021). Podobną ścieżką poszły Finlandia, Szwecja, Austria czy Włochy, wdrażając modele procesowe (np. Yasso07, EFISCEN, CBM-CFS3) oparte na danych NFI, ICP Forests i ogólnokrajowych projektach glebowych (Liski et al. 2005).

W krajach takich jak Czechy obserwuje się dynamiczne przejście z podejścia Tier 1 do Tier 3 w odniesieniu do lasów. Historycznie czeski system inwentaryzacji zakładał brak zmian SOC przy niezmienionej kategorii użytkowania. Podejście to było zgodne z konserwatywną

interpretacją wytycznych IPCC. Obecnie Czechy wdrażają model CBM-CFS3, który odwzorowuje przepływy węgla między żywą biomasą, DOM i glebą, kalibrowany danymi krajowymi (Mäkipää 2023). Jest to szczególnie istotne w kontekście silnych zaburzeń (masowa gradacja kornika w drzewostanach świerkowych) i gwałtownego przyrostu martwego drewna, które mogą przejściowo zamieniać lasy z pochłaniacza w źródło emisji (Cienciala et al. 2022). Wdrożenie Tier 3 wymaga jednak uzupełnienia i weryfikacji danych wejściowych (zwłaszcza glebowych), co czeskie instytucje wprost komunikują w raportach NIR (UNFCCC 2023).

Słowacja i Litwa pozostają w dużej mierze na poziomie Tier 1, choć dysponują pewnym zasobem danych z sieci ICP Forests, projektów typu BioSoil oraz własnych NFI (EU JRC 2022). Ze względu na ograniczoną liczbę punktów pomiarowych i brak statystycznie istotnych trendów SOC, w inwentaryzacjach rocznych często przyjmuje się brak oszacowania („NE”) lub zerową zmianę zasobów węgla glebowego i DOM. Formalnie spełnia to minimalne wymagania IPCC, ale prowadzi do niedoszacowania realnych zmian i utrudnia porównywalność z krajami stosującymi Tier 2/3. W dokumentach strategicznych Litwy i Słowacji sygnalizuje się jednak zamiar wykorzystania kolejnych cykli NFI i nowych pomiarów glebowych do opracowania krajowych współczynników emisji, co ma umożliwić w przyszłości przejście na Tier 2 (FERN 2022).

Największe luki w raportowaniu glebowego węgla organicznego (SOC) i martwej materii organicznej (DOM) występują w państwach spoza UE, takich jak Białoruś i Ukraina. Mimo znacznych zasobów leśnych i rozległych torfowisk, ich udział w europejskich programach monitoringowych pozostaje ograniczony. Dostępne publikacje wskazują, że te państwa, o ile w ogóle przeprowadzają szacunki, w dużym stopniu opierają się na metodzie z poziomu Tier 1, tj. na domyślnych współczynnikach IPCC (Lykhtovhor i in. 2022; UNFCCC 2023). Ukraina, jako kraj z Załącznika I do Konwencji UNFCCC o gospodarce w okresie przejściowym, jest zobowiązana do przygotowania i przedkładania Krajowych Raportów Inwentaryzacyjnych na forum UNFCCC oraz w ramach Porozumienia Paryskiego. Dane dotyczące zmian SOC w ukraińskich raportach są jednak pomijane z powodu braku wiarygodnych informacji, co uzasadnia się stosowaniem uproszczonego podejścia IPCC zakładającego brak zmian w SOC i DOM.

Warto jednak podkreślić, iż szacunki naukowe wskazują przy tym na bardzo wysokie emisje z odwodnionych torfowisk na Białorusi i Litwie (Tanneberger et al. 2020). Wskazane badania

udowadniają, że obecny poziom metodyczny może znacząco niedoszacowywać rzeczywistego strumienia CO₂.

Różnice metodologiczne nakładają się na zróżnicowanie przyrodnicze. Kraje z dużym udziałem gleb organicznych (Polska, Litwa, Białoruś, Ukraina, częściowo Niemcy i Finlandia) mierzą się z wysokimi potencjalnymi emisjami z odwodnionych torfowisk i gleb bagiennych, podczas gdy państwa o dominacji gleb mineralnych (Czechy, Słowacja) mają relatywnie mniejszy udział tej kategorii w bilansie LULUCF. Klimat chłodny i wilgotny sprzyja akumulacji SOC i DOM (wolniejsza mineralizacja), natomiast cieplejsze warunki i okresowe susze przyspieszają rozkład materii organicznej (Köchy et al. 2015). Dodatkowo, historia gospodarowania (intensywne użytkowanie leśne i rolnicze, melioracje, zalesienia gruntów porolnych) wpływa na aktualny poziom SOC (Smith et al. 2021). Zarówno IPCC, jak i Unia Europejska dostrzegają te problemy i dążą do harmonizacji podejść. Zasada TACCC (dokładność, przejrzystość, spójność, kompletność, porównywalność) wymaga nie tylko poprawy jakości danych, lecz także szczegółowego udokumentowania przyjętych założeń i modeli (IPCC 2019). Nowelizacja rozporządzenia LULUCF w UE zakłada, że od roku sprawozdawczego 2026 wszystkie kategorie gruntów oraz pule węgla mają być raportowane co najmniej metodami Tier 2, a dla obszarów krytycznych (m.in. lasy, torfowiska) wdrażane będą metody Tier 3 (EU LULUCF Regulation 2023). W praktyce oznacza to konieczność inwestycji w krajowe programy monitoringu gleb (powtarzane iteracyjnie inwentaryzacje gleb leśnych i rolnych, rozszerzenie pomiarów w NFI, udział w kampaniach LUCAS soil), rozwój i kalibrację modeli ekosystemowych (CBM-CFS3, Yasso, EFDM, EU-CBM) oraz lepsze wykorzystanie danych teledetekcyjnych (np. program Copernicus).

Na tym tle Polska zajmuje pozycję pośrednią. Z jednej strony długo opierała się na Tier 1 dla SOC i DOM, przyjmując brak zmian zasobów w glebach leśnych i minimalizując rolę martwej materii w bilansie. Z drugiej wdrożenie krajowej wielkoobszarowej inwentaryzacji lasów (WISL) oraz modelu CBM-CFS3 plasuje ją w grupie państw, które rozwijają metody Tier 3 dla lasów (Wysocka-Fijorek et al. 2023; Bono et al. 2024). Nadal jednak brakuje systematycznego, ogólnokrajowego monitoringu zmian SOC, a ocena puli glebowej opiera się w znacznej mierze na modelach i założeniach historycznych (np. efekt powojennych zalesień).

Podsumowując, różnice regionalne w raportowaniu SOC i DOM w systemach LULUCF odzwierciedlają kombinację trzech czynników: (1) poziomu rozwoju krajowych systemów

monitoringu i modelowania, (2) uwarunkowań przyrodniczych (klimat, typy gleb, historia użytkowania, zasięg torfowisk) oraz (3) przyjętej strategii radzenia sobie z niepewnością. Kraje takie jak Niemcy czy Finlandia dysponują zaawansowaną infrastrukturą danych i metod Tier 2/3, umożliwiającą stosunkowo precyzyjne i transparentne raportowanie. Państwa Europy Środkowo-Wschodniej i wschodniej nadal w dużej mierze opierają się na Tier 1, choć część z nich stopniowo wdraża modele i przygotowuje się do wprowadzenia własnych współczynników emisji. Próby bezpośredniego porównywania wielkości pochłaniania i emisji z SOC i DOM między tymi krajami muszą więc uwzględniać nie tylko różnice ekologiczne, ale przede wszystkim metodyczne. Oczekiwana harmonizacja podejść, wymuszona przez reformę LULUCF oraz wspierana przez projekty badawcze i inicjatywy IPCC, powinna w kolejnych latach zmniejszać te rozbieżności, zwiększając zarówno jakość danych, jak i porównywalność raportów w całej Europie.

3. AKTUALIZACJA WSTĘPNYCH ZAŁOŻEŃ DO PLANU DZIAŁAŃ NAPRAWCZYCH PRZYGOTOWYWANEGO W KONTEKŚCIE PRZEPISÓW ART. 13 D ROZPORZĄDZENIA (UE) 2018/841 ZE ZMIANAMI WYNIKAJĄCYMI Z ART. 1 UST. 4 ROZPORZĄDZENIA (UE) 2023/839 W ZWIĄZKU Z ROCZNĄ OCENĄ NA PODSTAWIE ART. 29 ROZPORZĄDZENIA (UE) 2018/1999 W ROKU 2025

3.1. Martwe drewno

Dane dotyczące martwego drewna stanowią przedmiot prac w ramach działań związanych z Wielkoobszarową Inwentaryzacją Stanu Lasu (WISL). Inwentaryzacji w tym zakresie podlegają strzały, kłody, wierzchołki i gałęzie znajdujące się w granicach powierzchni (również pochodzące z drzew rosnących poza powierzchnią próbną), których średnica w grubszym końcu jest większa niż 100 mm w korze (lub 80 mm bez kory), a ich długość wynosi co najmniej 0,5 m. W przypadku gdy leżące martwe drewno przecina granicę powierzchni próbnej pomiarowi podlega wyłącznie część znajdująca się w obrębie powierzchni, o minimalnej długości wynoszącej 0,5 m. Przedmiot badań w obszarze drewna martwego obejmuje rozłączną analizę morfologiczną drewna martwego leżącego (ścięte/wywrócone/odłamane) i stojącego (posusz). Dodatkowej inwentaryzacji podlegają również złomy oraz dodatkowo opisuje się pniaki. Poza standardowym pomiarem cech martwego drewna leżącego takimi jak średnica, wysokość czy wyróżnik kory, opisuje się także jego stopień rozkładu wg 3 stopniowej skali (Jabłoński et al. 2015). Ponadto, poza standardowym pomiarem pniaków takim jak średnica, wysokość czy wyróżnik kory, opisuje się także jego stopień rozkładu wg 5 stopniowej skali (Jabłoński et al. 2015; Caza 1993; Lofroth 1998; Stevens 1997).

Zmiany zachodzące na powierzchni pomiędzy pomiarami w poszczególnych cyklach, tj. osiąganie przez drzewa 70 mm progu pierśnicy, ubytki drzew pomierzonych w poprzednich cyklach (wycięcie, zamieranie), powodują konieczność odpowiedniego rejestrowania drzew (żywych i martwych) oraz pniaków w trakcie ponownych pomiarów na powierzchni.

Materiałem wejściowym przed ponownymi pomiarami jest lista (numery, azymuty i odległość) drzew i pniaków pomierzonych w poprzednich cyklach WISL. Dzięki tak przygotowanym pomiarom możliwe jest rejestrowanie zmian zachodzących w zasobach martwego drewna.

3.2. Węgiel organiczny w glebach leśnych

W celu zbadania zasobów węgla organicznego (SOC) w glebach leśnych w wybranych punktach WISL pobierane się próbki gleby, które po wykonaniu badań laboratoryjnych posłużą do określenia wielkości zasobów węgla organicznego w glebach leśnych na potrzeby raportowania zmian zasobów węgla z sektora LULUCF w ramach sprawozdawczości do Komisji Europejskiej. Próbki gleby pobiera się z ok. 1 200 powierzchni WISL, wyznaczonych w losowaniu warstwowym z podziałem na 16 warstw siedliskowych (typów siedliskowych lasu). Ze względu na dużą dysproporcję powierzchni warstw siedliskowych, w celu rozłożenia rozmieszczenia poboru próbek, zastosowano transformację pierwiastkową powierzchni warstw i alokację próby proporcjonalną do pierwiastka z ich wielkości. Określone w taki sposób liczebności prób dla poszczególnych warstw siedliskowych (typów siedliskowych lasu) rozdziela się będzie następnie do warstw gatunkowych (wg gatunku panującego), proporcjonalnie do powierzchni tych warstw.

Próbki gleby pobiera się w zasięgu powierzchni próbnej C WISL, w sposób nawiązujący do metodyki stosowanej w projekcie „BioSoil” realizowanym przez Instytut Badawczy Leśnictwa w latach 2006-2007 roku oraz metodyki ICP Forests². Na kierunkach północ – południe oraz wschód - zachód³ od środka powierzchni próbnej wyznacza się cztery punkty oddalone o 4 metry od granicy powierzchni próbnej A WISL, w których wykonuje się odwierty. Ponadto na kierunku południowym w odległości 2 metry od granicy powierzchni próbnej A wykonuje się odkrywkę glebową.

² UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part X: Sampling and Analysis of Soil. Version 2020-1.

³ Pobór próbek dokładnie na kierunkach NS oraz EW ma na celu precyzyjne wyznaczenie miejsc poboru próbek. W następnym cyklu monitoringu ponowne pomiary będą się odbywać w miejscach przesuniętych np. o 10° w prawo w stosunku do wcześniejszych pomiarów).

W ramach prac terenowych, z powierzchni WISL zlokalizowanych na glebach mineralnych, pobiera się:

- próbkę z warstwy poziomego organicznego (warstwy Ol i Ofh łącznie) do określenia suchej masy próchnicy,
- próbki o strukturze nienaruszonej z warstw mineralnych 0-10, 10-20 i 20-40 cm do określenia gęstości objętościowej gleby,
- próbki z pięciu lokalizacji (cztery odwierty i z odkrywki glebowej) o strukturze naruszonej z warstwy organicznej (O), 0-10, 10-20 i 20-40 cm, przeznaczone do oznaczeń fizykochemicznych.

Opisany wyciąg ze schematu poboru próbek stanowi przedmiot aktualizacji znowelizowanej Instrukcji wykonywania Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu. Próbki zebrane w kolejnych cyklach WISL, będą podlegać analizie laboratoryjnej w celu zbadania zawartości węgla organicznego w poszczególnych próbkach, a następnie określona zostanie zawartość SOC dla skali Polski.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Aktualne klimatyczne ramy prawne Unii Europejskiej, znowelizowane w ramach pakietu „Gotowi na 55” poprzez rozporządzenie LULUCF, nakładają na Polskę znacząco zwiększone cele w zakresie pochłaniania dwutlenku węgla. Dla Polski ustalono indywidualny cel wzrostu pochłaniania o dodatkowe 3,278 mln ton ekw. CO₂ w 2030 r. w stosunku do średniej z lat 2016–2018, z wymaganą trajektorią liniową uwzględniającą specyficzne uwarunkowania krajowe. Cel ten uznaje się za ambitny, a jego realizacja w krótkiej perspektywie możliwa jest głównie dzięki istotnemu wkładowi gruntów leśnych. W praktyce, z uwagi na ograniczony system zachęt dla właścicieli prywatnych, główny ciężar osiągnięcia tego celu spocznie na Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe.

Znowelizowane rozporządzenie LULUCF podkreśla znaczenie dotychczas pomijanych rezerwuarów węgla, takich jak martwe drewno i glebowa materia organiczna. Znaczenie tych pul podkreślono poprzez zaostrenie wymagań dotyczących metod inwentaryzacyjnych stosowanych w raportach. Od przedłożenia wykazu gazów cieplarnianych w 2028 r. państwa członkowskie zobowiązane są stosować metody co najmniej na poziomie Tier 2 zgodnie z wytycznymi IPCC z 2006 r. dotyczącymi krajowych wykazów gazów cieplarnianych. Najpóźniej od wykazu w 2030 r. wymagane jest stosowanie metod Tier 3 według tych samych wytycznych dla wszystkich szacunków emisji i pochłaniania węgla w rezerwuarach związanych z jednostkami użytkowania gruntów o wysokiej zawartości węgla.

Inną istotną zmianą wynikającą z nowelizacji rozporządzenia LULUCF jest obowiązek przygotowania planu działań naprawczych w przypadku niewystarczającego postępu w realizacji celów klimatycznych. W przypadku otrzymania przez kraj drugiej i kolejnej rocznej oceny dokonanej przez KE na podstawie art. 29 rozporządzenia (UE) 2018/1999, z której wynikać będzie, że działania prowadzone na rzecz spełnienia celu dla sektora LULUCF określonego dla danego kraju w kolumnie C załącznika IIa Rozporządzenia (UE) 2018/841 ze zmianami wynikającymi z art. 1 ust.4 rozporządzenia (UE) 2023/839 są niewystarczające.

W ramach projektu „Znaczenie lasów i gruntów z roślinnością leśną w pochłanianiu i magazynowaniu CO₂ w ramach nowej strategii leśnej UE 2030 oraz pakietu ustaw „Gotowi na 55” realizowane są skoordynowane działania obejmujące współpracę instytucji krajowych

odpowiedzialnych za przygotowanie danych źródłowych, wskaźników emisji oraz szacunków inwentaryzacyjnych. Inicjatywa ta ma na celu aktywne przygotowanie Polski do nadchodzących wymogów raportowania LULUCF. W ramach tych działań Polska wdraża zaawansowany model CBM-CFS3 (poziom Tier 3), co stanowi strategiczną odpowiedź na wyzwania związane z koniecznością stosowania metod inwentaryzacyjnych rzędu trzeciego w raportach krajowych. Model CBM-CFS3 umożliwia uzyskanie reprezentatywnych szacunków emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych zarówno w skali lokalnej, jak i międzynarodowej, podkreślając kluczową rolę biomasy oraz istotny wkład glebowego węgla organicznego (SOC) i martwej materii organicznej (DOM). Mimo tych postępów brakuje jeszcze systematycznego, ogólnokrajowego monitoringu zmian zasobów węgla w glebach, który obecnie jest w trakcie budowania.

Wnioski:

1. Zauważyć należy konieczność strategicznego dostosowania gospodarki leśnej do zmian klimatu. Aby osiągnąć ambitny, nowo wyznaczony cel pochłaniania CO₂ na rok 2030, polska gospodarka leśna musi przejść transformację, która uwzględnia nie tylko wzrost biomasy żywej, ale przede wszystkim trwałą stabilizację i akumulację węgla w pulach glebowych (SOC) i martwej materii organicznej (DOM).
2. Węgiel rozpatrywany w kontekście jego zapasu w martwej materii organicznej (DOM) nabiera istotnego znaczenia jako przedmiot sprawozdawczości zarówno na poziomie UE, jak i konwencji klimatycznej UNFCCC. Węgiel zawarty w tym rezerwuarze stanowi przedmiot zarówno sprawozdawczości LULUCF (gdzie sprawozdawana jest informacja nt. jego zmian), jak i Rozporządzenia (UE) 2024/1991 z dnia 24 czerwca 2024 r. w sprawie odbudowy zasobów przyrodniczych i zmiany rozporządzenia (UE) 2022/869), gdzie sprawozdawczości podlega informacja nt. jego stanu. Synergia w tym zakresie pozwala na projektowanie bardziej zrównoważonych strategii gospodarki leśnej.
3. Rosnące znaczenie ma zróżnicowanie gatunkowe drzewostanów. Wzrost udziału gatunków liściastych i tworzenie lasów mieszanych jest kluczowy dla poprawy jakości ściółki, przyspieszenia obiegu materii oraz zwiększenia długoterminowej stabilności SOC w głębszych warstwach gleby mineralnej, co ma pozytywny wpływ na bilans węgla.

4. Należy kontynuować prace nad wdrażaniem monitoringu i modelowania Tier 3. Wdrożenie modelu CBM-CFS3 oraz systematyczne pozyskiwanie szczegółowych danych o SOC i DOM w ramach WISL stanowi niezbędne działanie, mające na celu spełnienie unijnych wymogów Tier 3. Jest to warunek konieczny do transparentnego i naukowo ugruntowanego szacowania i raportowania zmian zasobów (zapasów) węgla i uniknięcia niedoszacowania pochłaniania CO₂ w sektorze LULUCF.

5. LITERATURA

- Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L., & Van Ranst, E. (2010). Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management*, 260(3), 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025>
- Bono, A., Alberti, G., Berretti, R., Čurović, M., Kucbel, S., Mikac, S., Motta, R., Nagel, T. A., Roženberger, D., Waldner, P., & Ferlan, M. (2024). The largest European forest carbon stocks are in the Dinaric Alps old-growth forests: Comparison of direct measurements and standardised approaches. *Carbon Balance and Management*, 19, 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00262-4>
- Campioli, M., Vicca, S., Luyssaert, S., Bilcke, J., Ceschia, E., Ibrom, A., Papale, D., Peñuelas, J., Wohlfahrt, G., & Granier, A. (2015). Biomass production efficiency controlled by management in temperate and boreal ecosystems. *Nature Geoscience*, 8(11), 843–846. <https://doi.org/10.1038/ngeo2553>
- Cienciala, E. (2022). Climate-smart forestry case study: Czech Republic. In L. Hetemäki, J. Kangas, & H. Peltola (Eds.), *Forest bioeconomy and climate change* (Managing Forest Ecosystems, Vol. 42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99206-4_10
- Caza C.L., 1993, Woody Debris in the Forests of British Columbia: A Review of the Literature and Current Research. LMR 78. Published by the Research Branch Ministry of Forests, 115
- European Commission, Joint Research Centre. (2011). *Evaluation of BioSoil demonstration project—Soil data analysis* (EUR 24729 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/56105>
- Fern. (2022, June 10). LULUCF: Inching toward genuine progress. *Forest Watch Newsletter*. Retrieved November 30, 2025, from <https://www.fern.org/publications-insight/lulucf-inching-toward-genuine-progress-2517/>
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Luyssaert, S., Campioli, M., Sardans, J., Ciais, P., Malhi, Y., Obersteiner, M., Papale, D., Piao, S. L., Reichstein, M., Rodà, F., & Peñuelas, J. (2014). Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. *Nature Climate Change*, 4(6), 471–476. <https://doi.org/10.1038/nclimate2177>

- Grassi, G., Conchedda, G., Federici, S., Abad Viñas, R., Korosuo, A., Melo, J., Rossi, S., Sandker, M., Somogyi, Z., Vizzarri, M., & Tubiello, F. N. (2022). Carbon fluxes from land 2000–2020: Bringing clarity to countries' reporting. *Earth System Science Data*, 14, 4643–4666. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4643-2022>
- Gruba, P., Kania, M., Kupka, D., & Pietrzykowski, M. (2021). Sequestration of mercury in soils under Scots pine and silver fir stands located in the proximity to a roadway. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4569. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094569>
- Mäkipää, R., Abramoff, R., Adamczyk, B., Baldy, V., Biryol, C., Bosela, M., Casals, P., Curiel Yuste, J., Dondini, M., Filipek, S., Garcia-Pausas, J., Gros, R., Gömöryová, E., Hashimoto, S., Hassegawa, M., Immonen, P., Laiho, R., Li, H., Li, Q., ... Lehtonen, A. (2023). *Forest soils can increase climate change mitigation with targeted management* (Policy Brief 7). European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/pb7>
- Holmgren, P. (2021). *The forest carbon debt illusion: Contrary to common views, harvesting from managed forests does not delay climate benefits* (Version 2021-05-26) [Study commissioned by Swedish Forest Industries]. FutureVistas AB. <https://www.forestindustries.se/siteassets/bilder-och-dokument/rapporter/klimat/report-the-forest-carbon-debt-illusion.pdf>
- Jandl, R., Rodeghiero, M., Martinez, C., Eisenbies, M., Forrester, J. A., Kimble, J., King, A., Olchev, A., Rusca, E., Smith, J. E., & others. (2021). Current status, uncertainties and future challenges of soil organic carbon monitoring in forest soils. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 688851. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.688851>
- Kaczmarek, Z., Gajewski, P., & Zawieja, B. (2023). Impact of NPK fertilization in agricultural reclamation on the transformation of Technosols in post-mining area: A case study from the Konin open-pit brown coal mine, central Poland. *Soil Science Annual*, 74(3), 176683. <https://doi.org/10.37501/soilsa/176683>
- Köchy, M., Hiederer, R., & Freibauer, A. (2015). Global distribution of soil organic carbon: Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL*, 1, 351–365. <https://doi.org/10.5194/soil-1-351-2015>

- Köhl, M., Ehrhart, H.-P., Knauf, M., & Neupane, P. R. (2020). A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals. *Ecological Indicators*, 111, 106057. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106057>
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., White, T. M., Stinson, G., Shaw, C. H., Rampley, G. J., Smyth, C., Simpson, B. N., Neilson, E. T., Trofymow, J. A., & others. (2009). CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 220(4), 480–504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018>
- Korosuo, A., Pilli, R., Abad Viñas, R. et al. The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track?. *Carbon Balance Manage* 18, 15 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0>.
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., & Sievänen, R. (2005). Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling*, 189(1–2), 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005>
- Lofroth E., 1998, The dead wood cycle (w): Voller J., Harrison S. (red.): Conservation biology principles for forested landscapes. UBC Press, Vancouver, B.C., s. 185-214
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Lykhochvor, V., Hnativ, P., Petrichenko, V., Ivaniuk, V., Szulc, W., Rutkowska, B., Veha, N., & Olifir, Y. (2022). Threat of degradation of agricultural land in Ukraine through a negative balance of nutritional elements in growing of field cultures. *Journal of Elementology*, 27(3), 695–707. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.2.2290>
- Matuszkiewicz, J. M., Affek, A. N., & Kowalska, A. (2021). Current and potential carbon stock in the forest communities of the Białowieża Biosphere Reserve. *Forest Ecology and Management*, 502, 119702. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119702>
- Nickels, M. C. L., & Prescott, C. E. (2021). Soil carbon stabilization under coniferous, deciduous and grass vegetation in post-mining reclaimed ecosystems. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 689594. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.689594>

- Smith, P., Keesstra, S. D., Silver, W. L., & Adhya, T. K. (2021). The role of soils in delivering nature's contributions to people. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834), 20200169. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0169>
- Stevens V., 1997, The ecological role of coarse woody debris: an overview of the ecological importance of CWD in B.C. forests. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work. Pap. 30
- Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J. A., Sevanto, S., & Liski, J. (2009). Leaf litter decomposition: Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, 220(23), 3362–3371. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016>
- Wellbrock, N., Cools, N., de Vos, B., Jandl, R., Lehtonen, A., Leitgeb, E., Mäkipää, R., Pavlenda, P., Schwärzel, K., & Šrámek, V. (2024). There is a need to better take into account forest soils in the planned soil monitoring law of the European Union. *Annals of Forest Science*, 81, 22. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01238-7>
- Wysocka-Fijorek, E., Dobrowolska, E., Budniak, P., Korzeniewski, K., & Czubak, D. (2023). Forest resources projection tools: Comparison of available tools and their adaptation to Polish conditions. *Forests*, 14, 548. <https://doi.org/10.3390/f14030548>
- Zhou, G., Guan, L., Wei, X., Zhang, D., Zhang, Q., Yan, J., Wen, D., Liu, J., Liu, S., Huang, Z., & Kong, G. (2008). Factors influencing leaf litter decomposition: An intersite decomposition experiment across China. *Plant and Soil*, 311(1–2), 61–72. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9658-5>

Główny Autor