

**Monika Aniszewska, Arkadiusz Gendek,  
Wojciech Kędziora, Tadeusz Moskalik,  
Tomasz Nurek, Marta Trzcianowska,  
Roman Wójcik, Witold Zychowicz**



## **Łańcuch dostaw w leśnictwie. Stan obecny i wyzwania**

**Kraków 2025**

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

## **Łańcuch dostaw w leśnictwie.**

### **Stan obecny i wyzwania**

**Monika Aniszewska, Arkadiusz Gendek, Wojciech Kędziora,  
Tadeusz Moskalik, Tomasz Nurek, Marta Trzcianowska,  
Roman Wójcik, Witold Zychowicz**

*Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II” nr projektu NdS-II/SP/0063/2024/01 kwota dofinansowania 1 000 000 PLN, całkowita wartość projektu 1 000 000 PLN*



**Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego**

---



**NAUKA DLA  
SPOŁECZEŃSTWA**

Kraków 2025

**Rada Naukowa Wydawnictwa**

Radomir Adamovsky, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic

Aylin Altan, Mersin University, Turkey

Vlodymyr Bulgakov, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Karl-Heinz Dammer, Leibniz-Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Germany

Dariusz Dziki, University of Life Sciences in Lublin, Poland

Pavol Findura, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Dorota Haman, University of Florida, USA

Zuzana Hlaváčová, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia

Lisa A. Holden, College of Agricultural Sciences, USA

Ryszard Hołownicki, Research Institute of Horticulture in Skierniewice, Poland

Bruno Huyghebaert, Walloon Agricultural Research Centre, Belgium

Jacek Przybył, Poznań University of Life Sciences, Poland

Alaa Subr, University of Baghdad, Iraq

Bernardo Strasbourg, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Brazil

Muhammad Sultan, Bahauddin Zakariya University, Pakistan

**Monografia pod redakcją:**

Monika Aniszewska, Arkadiusz Gendek, Tomasz Nurek, Marta Trzcianowska

**Recenzenci:**

dr hab. inż. Florian Adamczyk, prof. UPP – Sieć Badawcza Łukasiewicz - PIT

prof. dr hab. inż. Grzegorz Szewczyk – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Wydawca:**

Wydawnictwo „Inżynieria Rolnicza”

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

ISBN 978-83-64377-69-3

**Druk i oprawa:**

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: [biuro@novasandec.pl](mailto:biuro@novasandec.pl); <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 7,84; ark. druk. 7,00

Nakład: 100 egz.

## Spis treści:

WSTĘP .....	5
1. PLANOWANIE W LEŚNICTWIE.....	7
1.1. Wielkość pozyskania drewna oraz prognozy jego zmian.....	7
1.1.1. Pozyskanie drewna w Polsce .....	8
1.1.2. Prognoza użytkowania lasu w PGL Lasy Państwowe.....	10
1.2. Rębnie zupełne a częściowe .....	11
1.2.1. Cięcia zupełne.....	11
1.2.2. Cięcia częściowe.....	11
1.2.3. Wpływ na ekosystem i logistykę .....	12
1.3. Horyzont planowania w leśnictwie.....	12
1.3.1. Planowanie strategiczne.....	13
1.3.2. Planowanie taktyczne.....	13
1.3.3. Planowanie operacyjne .....	13
1.4. Planowanie a realizacja pozyskania.....	14
1.5. Wpływ zmian klimatycznych na pozyskanie drewna .....	15
1.6. Ograniczenia w możliwości koncentracji prac leśnych.....	18
1.7. Sprzedaż drewna.....	19
Podsumowanie rozdziału 1 .....	19
2. ORGANIZACJA PROCESU POZYSKIWANIA I ZRYWKI DREWNA.....	21
2.1. Metody i systemy pozyskiwania i zrywki surowca drzewnego .....	21
2.2. Udział i rozmiar maszynowego pozyskania drewna w Polsce.....	25
2.3. Efektywność pracy maszyn.....	27
2.4. Zużycie paliwa .....	28
2.5. Przedsiębiorstwa leśne.....	29
2.6. Koncentracja zadań pozyskaniowych, alokacja sprzętu.....	33
2.7. Zasady wyboru wykonawców prac leśnych .....	35
2.8. Pomiar surowca drzewnego .....	36
Podsumowanie rozdziału 2 .....	38
3. TRANSPORT SUROWCA DRZEWNEGO .....	41
3.1. Wywóz drewna.....	41
3.1.1. Transport samochodowy.....	41
3.1.2. Transport kolejowy .....	44

3.2.	Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna pojazdów stosowanych do drogowego transportu drewna .....	45
3.3.	Odległość transportu drewna .....	48
3.4.	Koszty transportu surowca drzewnego .....	50
3.5.	Przewóz drewna – planowanie, składnice drewna .....	51
	Podsumowanie rozdziału 3 .....	55
4.	ZAKŁADY PRZETWÓRSTWA DREWNA .....	57
4.1.	Tartaki.....	58
4.2.	Zakłady celulozowo-papiernicze .....	60
4.3.	Elektrownie, elektrociepłownie oraz zakłady produkujące pellet.....	62
4.4.	Przykładowe składnice drewna .....	65
4.5.	Wyzwania dla zakładów przetwarzających surowiec drzewny w kontekście łańcucha dostaw .....	66
4.6.	Dobre praktyki w zakładach przetwórstwa drewna .....	68
	Podsumowanie rozdziału 4 .....	70
5.	WPŁYW ŁAŃCUCHA DOSTAW W LEŚNICTWIE NA ŚRODOWISKO NATURALNE .....	73
5.1.	Wpływ na bilans węgla w ekosystemie.....	73
	5.1.1. <i>Zmniejszenie pokrywy leśnej</i> .....	73
	5.1.2. <i>Emisja gazów cieplarnianych związanych z pracami leśnymi</i> .....	74
	5.1.3. <i>Źródła emisji i ich wielkość</i> .....	75
	5.1.4. <i>Cele dotyczące poziomu emisji gazów cieplarnianych</i> .....	77
	5.1.5. <i>Degradacja pokrywy glebowej i uszkodzanie drzewostanów</i> .....	78
5.2.	Dobre praktyki w celu przeciwdziałania negatywnemu wpływowi na środowisko .....	79
	5.2.1. <i>Racjonalne pozyskiwanie i wykorzystywanie surowca</i> .....	79
	5.2.2. <i>Alternatywne źródła zasilania maszyn</i> .....	80
	5.2.3. <i>Dobre praktyki organizacyjne</i> .....	82
	5.2.4. <i>Ekologiczne pozyskiwanie surowca drzewnego</i> .....	83
	5.2.5. <i>Ekologiczny transport surowca drzewnego</i> .....	84
	Podsumowanie rozdziału 5 .....	85
	PODSUMOWANIE .....	87
	BIBLIOGRAFIA .....	93

## WSTĘP

O znaczeniu lasów dla człowieka nie trzeba nikogo przekonywać. Oprócz funkcji rekreacyjnych, środowiskotwórczych, ochronnych (woda, powietrze, klimat) las pełni rolę ekologicznego, odnawialnego źródła surowców dla wielu gałęzi gospodarki narodowej. Pozyskując surowce, które wytwarza las, trzeba pamiętać, aby intensywność oraz sposób pozyskiwania nie miał znaczącego, długookresowego negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Szczególnie istotne jest, aby poprzez działania człowieka nie spowodować takich zmian, które mogłyby pogłębić negatywne skutki w postaci zmian klimatycznych.

Jedną z ważniejszych sfer działalności gospodarczej prowadzonej przez jednostki administracyjne Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe (PGL LP) jest pozyskanie drewna. W ramach tej działalności wytwarza się produkty (sortymenty drzewne) sprzedawane do różnych działów i gałęzi gospodarki narodowej: budownictwa, meblarstwa, przemysłu celulozowo-papierniczego, energetyki itp. Umożliwia się w ten sposób funkcjonowanie wielu zakładów produkcyjnych dających miejsca pracy i swoimi wyrobami zaspokajających potrzeby społeczeństwa. Z drugiej strony sprzedaż drewna przynosi przychód przedsiębiorstwu Lasy Państwowe, który jest przeznaczany na inne potrzeby związane między innymi z hodowlą, ochroną lasu, udostępnieniem powierzchni leśnych społeczeństwu. Utrzymywanie funkcji ochronnych, turystycznych lasów, ich zabezpieczenie pożarowe, a więc koszty tych zadań gospodarczych, które nie przynoszą bezpośrednich korzyści finansowych, muszą być pokrywane z przychodu ze sprzedaży drewna. Trudno sobie wyobrazić prawidłowe, bezpieczne funkcjonowanie terenów leśnych w sytuacji pozbawienia (lub ograniczenia) przychodów instytucji zarządzającej terenami leśnymi jakie przynosi sprzedaż drewna.

Pozyskanie drewna jest tym rodzajem działalności Lasów Państwowych, która z jednej strony wytwarza przychód przedsiębiorstwa, ale z drugiej niesie szereg zagrożeń i stanowi potencjalne źródło negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Celowe jest holistyczne podejście do zagadnienia pozyskania, składowania, transportu i odbioru drewna. Takie podejście można zrealizować analizując łańcuch dostaw w leśnictwie. W omawianym przypadku łańcuch ten będzie obejmował kilka wspomnianych ogniw. W dotychczasowej praktyce poszukiwano najkorzystniejszych rozwiązań (najczęściej z punktu widzenia czysto ekonomicznego – najniższy koszt) odrębnie dla każdego z tych ogniw. Znanych jest wiele opracowań z zakresu optymalizacji pozyskania drewna, transportu drewna czy też budowy i eksploatacji składnic. Z perspektywy bieżącej sytuacji ekonomicznej i stanu środowiska naturalnego brak jest w tych badaniach dwóch elementów. Po pierwsze włączenia do algorytmów optymalizacyjnych tak zwanych kosztów środowiskowych oraz, co wydaje się równie konieczne, potraktowania procesu zaopatrywania odbiorcy w surowiec drzewny jako jednego spójnego procesu, począwszy od powierzchni leśnej, na placu w zakładzie przetwórczym kończąc.

Funkcjonowanie łańcucha dostaw w leśnictwie determinowane jest przez kilka czynników. Różnią się one w zasadniczy sposób pomiędzy poszczególnymi krajami i często regionami. Bardzo istotnym czynnikiem są oczywiście powierzchnie leśne, ich wielkość, rozdrobnienie, zasobność czy dostępność. Elementy te są kształtowane w długim okresie, a bieżąca działalność nie ma na nie bezpośredniego wpływu. Duże znaczenie dla efektów pozyskania drewna (w tym środowiskowych) mają natomiast decyzje organizacyjne,



zarówno po stronie administracji Lasów Państwowych jak i wykonawców prac - zakładów usług leśnych (ZUL-i). Wielkość powierzchni, na których przewiduje się pozyskanie surowca, ich lokalizacja i udostępnienie oraz wybór rozwiązań technologicznych i technicznych w bardzo dużym stopniu determinuje wydajność eksploatacyjną maszyn, zużycie paliwa na jednostkę produkcji, a co za tym idzie emisję szkodliwych substancji.

Na drugim biegunie łańcucha znajdują się zakłady przetwarzające surowiec drzewny. To ogniwo wyznacza ilość, rodzaj produktu oraz częstotliwość dostaw. Najważniejszym czynnikiem jest jednak lokalizacja zakładów, z której wynika odległość dowozu surowca. Należy w tym miejscu wspomnieć, że nie w każdym przypadku odległość od najbliższych kompleksów leśnych jest jednoznaczna z odległością transportu drewna. Często w „najbliższych” nadleśnictwach nie ma wymaganego surowca lub jego ilość jest zbyt mała. W takim przypadku transport odbywa się pomiędzy zakładem przetwórczym, a tym kompleksem leśnym, z którego można pozyskać wymagany surowiec.

Transport, o którym wspomniano powyżej, jest niewralgiczną częścią łańcucha dostaw w leśnictwie. Mamy w tym przypadku do czynienia z takimi cechami jak długość dróg i ich kategoria. Determinuje to rodzaj środków transportu, zużycie paliwa oraz ewentualną potrzebę organizacji punktów przeładunkowo manipulacyjnych (składowisk drewna). Na składowiskach drewna wykonuje się szereg operacji (wyróbka sortymentów, korowanie, dostosowanie ładunku do potrzeb konkretnego odbiorcy), których celem jest podniesienie wartości produktu oraz zebranie takiej jego ilości, aby zoptymalizować transport. Istnienie składowiska jako punktu przeładunkowego stwarza okazje do zmiany środka transportu na bardziej opłacalny w danej sytuacji. Można zmienić rodzaj samochodu wywozowego lub zrezygnować z transportu drogowego na korzyść kolejowego, lub w specyficznych okolicznościach, transportu szlakami wodnymi.

Niniejsza monografia powstała w ramach realizacji projektu „Integracja łańcucha dostaw w leśnictwie jako instrument mitygacji skutków zmian klimatycznych”, którego celem jest wskazanie możliwości poprawy jego funkcjonowania w warunkach polskich. Bieżąca sytuacja została opisana na podstawie istniejących opracowań częściowych oraz wielu rozmów z przedstawicielami wszystkich ogniw łańcucha logistycznego. Bardzo istotnym źródłem informacji o stanie łańcucha dostaw w leśnictwie był sondaż przeprowadzony wśród pracowników PGL LP, przedsiębiorstw realizujących zadania gospodarze na terenach leśnych, firm transportowych oraz zakładów przetwórczych. Dzięki takiemu podejściu udało się zebrać najważniejsze informacje i opinie o bieżących problemach, zakłóceniach procesu wytwarzania surowca drzewnego, czy dostarczania go do odbiorcy końcowego.

## 1. PLANOWANIE W LEŚNICTWIE

Lasy są najbardziej złożonym ekosystemem na naszej planecie i jako takie wymagają specjalnej uwagi. Sprawia to, że stają się coraz częściej obiektem zainteresowania szerokiej rzeszy interesariuszy (Płotkowski i in., 2016). Kontynent europejski posiada największy odsetek lasów na planecie (27%), jednak ze względu na zaludnienie odsetek lasu na jednego mieszkańca np. w Europie Centralnej kształtuje się na poziomie 0,24 ha (FAO, 2020). Zwiększająca się świadomość społeczna uwypukla potrzebę specjalnej ochrony i dużej ostrożności przy gospodarowaniu w ekosystemach leśnych.

Leśnictwo, w odróżnieniu od innych działów gospodarki, charakteryzuje się długim okresem planowania swoich działań. Jest to związane z czasem jaki plon, czyli drewno wymaga do osiągnięcia swojej dojrzałości, wynoszącym od kilkudziesięciu do kilkuset lat. Sama dojrzałość natomiast jest trudna do określenia i zależy od wielu czynników, m.in. ekologii gatunku czy warunków środowiskowych (Poznański, 2005). Stąd też działania związane z pozyskaniem drewna w lesie dzielimy na dwa typy: cięcia rębne – wtedy, gdy chcemy przeprowadzić proces przemiany pokoleń i pobrania dojrzałego plonu oraz cięcia przedrębne, które mają charakter cięć pielęgnacyjnych i sanitarnych – w drzewostanach młodszych klas wieku (Borecki i in., 2017).

### 1.1. Wielkość pozyskania drewna oraz prognozy jego zmian

Pozyskanie drewna ma na celu spełnianie zapotrzebowania społecznego na drewno i jest kluczowym elementem zarządzania w leśnictwie. Zyski pochodzące ze sprzedaży drewna pozwalają na realizację pozostałych celów gospodarki leśnej (Szyć i in., 2023). Ogólna powierzchnia lasów świata wynosi około ok. 4 mld ha. Roczne pozyskanie drewna na świecie wynosi łącznie około 3,9 mld m<sup>3</sup>, z czego około 2 mld m<sup>3</sup> stanowi drewno przemysłowe (Forest Research, 2022). Szacuje się, że wielkość pozyskania drewna w skali globalnej wzrośnie w roku 2050 o 54% w stosunku do roku 2010, z 3,7 mld m<sup>3</sup> do 5,7 mld m<sup>3</sup> (Peng i in., 2023).

W przypadku cięć rębnych ważne jest odpowiednie połączenie ładu przestrzennego (możliwość lokowania cięć obok siebie) (Magnuski i Ważyński, 1998) oraz ładu czasowego (niezbędnymi odstępami czasu pomiędzy poszczególnymi cięciami) (Stępień i in., 1999), które finalnie kształtują przestrzenną strukturę lasu. Odpowiednie przygotowanie tej struktury zmniejsza podatność lasu na oddziaływanie zewnętrznych czynników, szczególnie silnych wiatrów zachodnich i północno-zachodnich na nizinach. Jednocześnie w celu ochrony lasu i siedlisk przed nadmierną eksploatacją stosowane są dodatkowe ograniczenia mające na celu planowanie w dłuższej niż najbliższe dziesięciolecie perspektywie m.in. obliczane są maksymalne ilości drewna do pozyskania zwane etatem (Stępień, 2005).

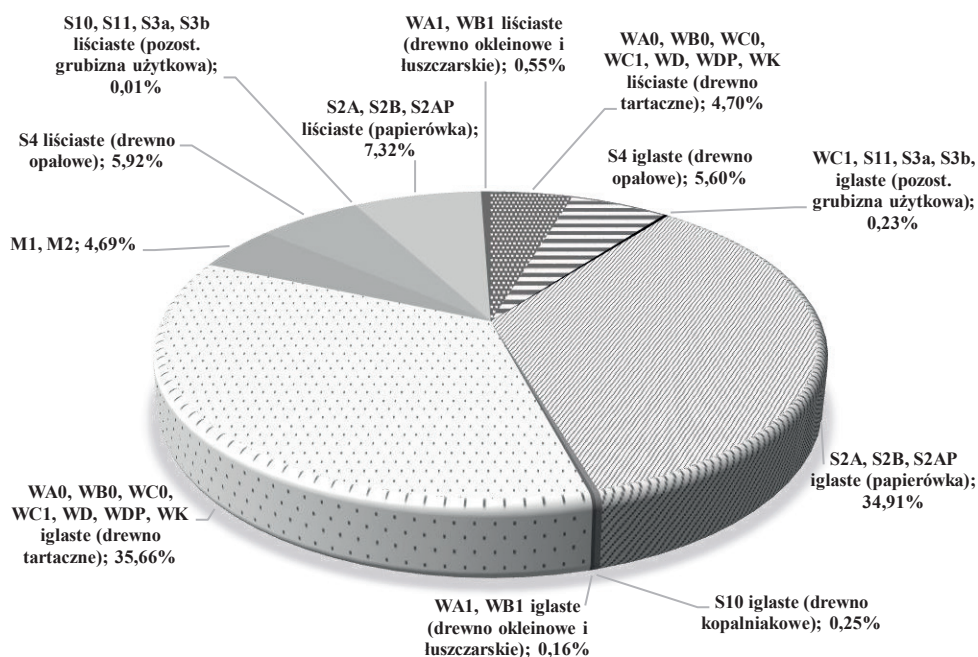
Cięcia przedrębne, czyli przeredzanie drzewostanu przed osiągnięciem wieku rębności, są również istotne. Poprawiają one warunki wzrostu pozostałych drzew, co zwiększa ich odporność na choroby i szkodniki oraz poprawia jakość drewna. Stosowane tutaj wyliczenia wielkości drewna do pozyskania wynikają z tzw. potrzeb hodowlanych lasu, czyli skupiają się na uzyskaniu struktury drzewostanu, która zapewni jego bezproblemowe dalsze trwanie oraz nie wpłynie negatywnie na jego stan w momencie cięć rębnych. Zabiegi które pozwalają uzyskać surowiec drzewny w tym okresie nazywamy trzebieżami.



### 1.1.1. Pozyskanie drewna w Polsce

Według stanu na dzień 31 grudnia 2023 r., powierzchnia gruntów leśnych w Polsce wynosiła 9,50 mln ha, w tym lasy zajmowały obszar 9,29 mln ha i stanowiły 29,6% powierzchni kraju. W 2023 r. w Polsce pozyskano 41,66 mln m<sup>3</sup> drewna, w tym 39,85 mln m<sup>3</sup> grubizny oraz 1,82 mln m<sup>3</sup> drewna małowymiarowego. Z ogólnej masy grubizny 38,25 mln m<sup>3</sup>, tj. 96,0% pozyskano w lasach będących w zarządzie Lasów Państwowych, a 1,19 mln m<sup>3</sup>, tj. 3,0% – w lasach prywatnych. W 2023 roku, w stosunku do roku poprzedniego, odnotowano spadek pozyskania drewna ogółem o 6,7%. Udział grubizny wielkowymiarowej dla drewna iglastego wyniósł w 2022 roku ok. 46%, a 54% stanowiło natomiast drewno średniowymiarowe. Dla drewna liściastego udział sortymentów wielkowymiarowych był na zdecydowanie mniejszym poziomie i wyniósł ok. 29%. Wskaźnik pozyskania drewna (grubizny) na 1 mieszkańca wyniósł 1,06 m<sup>3</sup>, a w przeliczeniu na 1 ha powierzchni lasu osiągnął poziom 4,30 m<sup>3</sup> (Główny Urząd Statystyczny, 2024).

Struktura sprzedaży drewna w Lasach Państwowych została zamieszczona na rys. 1.1. Wyraźnie dominują dwie grupy sortymentów: drewno wielkowymiarowe iglaste WA0, WB0, WC0 (35,66%) oraz drewno średniowymiarowe iglaste grupy S2 (34,91%).



Rys. 1.1. Struktura sprzedaży poszczególnych sortymentów drewna w Lasach Państwowych w 2023 roku (Koss, 2024) [z modyfikacjami].

W lasach prywatnych w różnych latach udział poszczególnych sortymentów jest zmienny, ale zauważalna jest przewaga drewna wielkowymiarowego, np. w 2023 roku pozyskano 1,19 mln m<sup>3</sup> drewna, z czego drewna wielkowymiarowego pozyskano 45%,

a średniowymiarowego około 30%. Dla drewna małowymiarowego brak było danych, natomiast pozyskano około 25% drewna opałowego (Główny Urząd Statystyczny, 2024). Należy uwzględnić fakt, że są to dane dla drewna zaewidencjonowanego. Nie ma danych dla około 3 mln m<sup>3</sup> drewna przeznaczonego głównie na potrzeby własne i na sprzedaż poza ewidencją. W porównaniu do Lasów Państwowych, w lasach prywatnych więcej jest sortymentów średniowymiarowych, a znacznie mniej wykazuje się drewna opałowego.

Według prognozy Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej na podstawie danych Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu (WISL) 2015-2019 (BULiGL, 2020) pozyskanie w lasach prywatnych do 2030 roku wyniesie 5,5 lub prawie 7 mln m<sup>3</sup>/rok (w zależności od wariantu prognozy), a do roku 2050 – 7,6 lub 9,2 mln m<sup>3</sup>/rok. Jest to prawie dwukrotny skok w porównaniu do tego co jest obecnie pozyskiwane łącznie z drewnem niezaewidencjonowanym.

Przy powyższych analizach należy wziąć pod uwagę, że powierzchnia lasów prywatnych jest mocno niedoszacowana. Według opracowania Instytutu Geodezji i Kartografii w Polsce istnieje około 800 tys. ha poza ewidencją (Hościło i in., 2016). Według WISL (2015-2019) powierzchnia lasów poza ewidencją wynosi 951 tys. ha (BULiGL, 2020). Wynika to głównie z zaniechania gospodarki rolnej na gruntach skrajnych (o niskiej klasie bonitacyjnej) i wchodzenie sukcesji naturalnej gatunków lekkonasiennych (sosna, brzoza, osika). Często zakładane są lasy, nawet jeśli nie jest możliwe pobieranie dopłat ze względu na występowanie form ochrony (np. Natura 2000). Koszty związane z przeklasyfikowaniem gruntu z roli na las odstrasza prywatnych właścicieli, aby wykazali w ewidencji swoje lasy.

W Polsce głównymi źródłami biomasy drzewnej przeznaczonej na cele energetyczne są leśnictwo (pozostałości zrębowe) i przemysł drzewno-papierniczy. Według Rocznika Statystycznego Leśnictwa GUS (Główny Urząd Statystyczny, 2024) pozyskanie drewna opałowego w samym 2023 roku wyniosło 6,65 mln m<sup>3</sup>. Udział pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskanego drewna jest zróżnicowany – wynosi średnio 11,14%, przy czym waha się on od 6,85 do 17,15% i zależy w dużej mierze od typu siedliskowego lasu (Gałęzia, 2016). Wyniki na podobnym poziomie uzyskały inne zespoły badawcze (Moskalik i in., 2016; Pilarek i in., 2007). Naukowcy podają również, że średnie dorosłe drzewo iglaste składa się z 82 kg gałęzi i 77 kg gałązek z igłami (Róžański i Jabłoński, 2009). Zakładając 300-400 drzew na ha, daje to 21,6 - 28,8 ton gałęzi i 20,1 - 26,8 ton gałązek z igłami na 1 ha. Udział biomasy, która tworzy pozostałości z pozyskiwania drewna w całkowitej biomasy drzewnej wynosi powyżej 15%.

Lasy Państwowe nie prowadzą bezpośredniej sprzedaży drewna do firm energetycznych. Dostawcami biomasy do dużych przedsiębiorstw energetycznych są firmy specjalizujące się w obrocie biomasą. Zrębki leśne są głównym paliwem w spalarniach biomasy. W 2023 roku LP sprzedały jedynie 188 tys. m<sup>3</sup> zrębków drzewnych (Główny Urząd Statystyczny, 2024). Uznanie biomasy drzewnej za odnawialne źródło energii w 2009 roku spowodowało wzrost importu do Polski drewna na cele energetyczne.

### 1.1.2. Prognoza użytkowania lasu w PGL Lasy Państwowe

W metodach prognozowania wielkości pozyskania użytków rębnych i przedrębnych, zwanych również głównymi, wykorzystuje się w Biurze Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej metodę w oparciu o dane z tabeli klas wieku (Szyć i in., 2020). Najnowsze metody umożliwiają modelowanie wielkości pozyskania drewna w ramach użytkowania głównego w Lasach Państwowych na poziomie poszczególnych drzewostanów z uwzględnieniem ładu przestrzennego i czasowego oraz innych ograniczeń wynikających choćby z ochrony przyrody (Borecki i in., 2018). W badaniach stworzono prognozy użytkowania lasu w rozbięciu na cięcia rębne i przedrębne, które obliczono dla 6 rozpatrywanych okresów w ujęciu brutto (w korze) i netto (bez kory) (tabela 1.1). Całość miała na celu analizę w odniesieniu do najbliższego półwiecza w kontekście równomierności dostaw drewna dla gospodarki, a podział na brutto i netto pozwala na lepsze zrozumienie pomiędzy leśnikami używającymi tej pierwszej, a drzewiarzami używającymi tej drugiej wartości.

*Tabela 1.1. Prognozowane wielkości użytkowania lasu w LP w okresie 2016-2075 (Borecki i in., 2018) [z modyfikacjami].*

Lata	Użytkowanie rębne	Użytkowanie przedrębne	Użytkowanie rębne	Użytkowanie przedrębne	Razem użytkownie główne
	brutto, mln m <sup>3</sup> /10 lat		netto, mln m <sup>3</sup> /10 lat		
2016-2025	24,62	21,08	19,70	16,86	36,56
2026-2035	26,53	20,96	21,23	16,77	38,00
2036-2045	28,58	21,62	22,86	17,29	40,15
2046-2055	30,80	21,89	24,64	17,51	42,15
2056-2065	31,65	23,94	25,32	19,15	44,47
2066-2075	31,25	24,22	25,00	19,38	44,38

Wyjściowa struktura wiekowa lasów w Polsce spowodowała, że prognozowany rozmiar cięć rębnych, w perspektywie najbliższych 10-leci będzie się zwiększał. Z zestawionych danych (tabela 1.1) wynika, że prognozowane wielkości użytkowania rębego w okresie najbliższych 50 lat kształtują się w przeliczeniu na rok od 19,7 (2016-2025) do 25,3 mln m<sup>3</sup> grubizny netto (2056-2065), tj. wykazują wzrost o ponad 28%. W ostatnim okresie według prognozy przewiduje się niewielki spadek użytkowania, do około 25 mln m<sup>3</sup>. Użytkowanie przedrębne w całym okresie prognozy wykazuje tendencję wzrostową od około 16,8 do około 19,4 mln m<sup>3</sup> grubizny netto rocznie. Konsekwencją stwierdzonych trendów w prognozie użytkowania rębego i przedrębego jest kształtowanie się wielkości użytkowania głównego. W całym okresie prognozy jego wielkość zwiększa się od około 36,6 do 44,4 mln m<sup>3</sup> grubizny netto rocznie, tj. o ponad 21%.

Uwzględniając przewidywane zmiany w rozwoju zasobów leśnych oraz prognozy dotyczące wielkości użytkowania, już teraz należy zadbać o zapewnienie równomierności dostaw drewna w długoterminowej perspektywie. Istotnym zagadnieniem dla polskiego

leśnictwa jest również konieczność podjęcia działań mających na celu poprawę stanu zasobów leśnych, które w wielu rejonach kraju są niezadowolające. Te działania należy traktować jako priorytetowe, ponieważ ich realizacja przyczyni się także do utrzymania ciągłości dostaw surowca oraz stabilności funkcjonowania rynku drzewnego.

Sterowanie w procesie kształtowania pożądanego kierunku rozwoju zasobów wymaga integracji polityki leśnej i planowania urzędzeniowego. Taki sposób postępowania stanowić powinien w zarządzaniu lasu podstawę wyznaczania, weryfikacji i synchronizacji celów hodowlanych, ochronnych, produkcyjnych i ogólnospołecznych oraz ich bilansowania zgodnie z wymogami i specyfiką regionalnego zróżnicowania problemów gospodarki leśnej.

## **1.2. Rębnie zupełne a częściowe**

W leśnictwie wyróżniamy dwa główne rodzaje cięć rębnych (Brzezicki, 2005): cięcia zupełne (rębnie zupełne) i cięcia częściowe (rębnie częściowe). Oba typy mają różne konsekwencje dla pozyskiwania drewna, logistyki dostaw surowca oraz długoterminowego zarządzania lasami. Analiza tych dwóch podejść pozwala na lepsze zrozumienie ich wpływu na gospodarkę leśną i zrównoważony rozwój.

### **1.2.1. Cięcia zupełne**

Cięcia zupełne zwane zrębami polegają na całkowitym usunięciu drzew z danego obszaru (zrębu) (PGL LP, 2012). Po takim zabiegu następuje tzw. odnowienie lasu, czyli jego powrót, często za pomocą sztucznego nasadzenia, co umożliwia kontrolę nad gatunkami drzew, które będą rosły w danym miejscu. Taki sposób prowadzenia gospodarki leśnej w pewien sposób imituje naturalne zaburzenia w ekosystemie (np. pożary) i sprzyja wzrostowi gatunków pionierskich, światłożądnych (sosna, brzoza). Powierzchnia po cięciach zupełnych nie może być od razu odnowiona, np. ze względu na możliwe szkody od owadów i najczęściej przeleguje przynajmniej rok zanim zaczną się prace odnowieniowe (przygotowanie gleby, sadzenie, pielęgnacja).

Nowy drzewostan potrzebuje wielu lat, zanim osiągnie wiek, w którym możliwe będzie ponowne pozyskiwanie dużej ilości drewna. Dlatego należy zadbać o równomierność pozyskania planując dużą liczbę mniejszych zrębów (aktualnie maksymalny rozmiar zrębu to 6 ha) na analizowanym obszarze i dbając równocześnie o zachowanie ładu czasowego i przestrzennego. Mimo to, jednorazowe, duże ilości drewna pozyskiwanego z cięć zupełnych mogą uprościć logistykę dostaw, ponieważ łatwiej jest planować transport i magazynowanie dużych partii surowca.

### **1.2.2. Cięcia częściowe**

Cięcia częściowe mają wiele odmian, ale w uproszczeniu polegają na stopniowym usuwaniu drzew z wybranej powierzchni (PGL LP, 2012). Taki sposób gospodarowania lasem jest bardziej złożony, ale ma istotne zalety ekologiczne. W typowym przypadku pozwalają utrzymać pokrywę drzew na danym obszarze co zmniejsza temperaturę wnętrza

lasu oraz zwiększa ocienienie gleby, dając możliwość życia wielu organizmom. Dopiero po uzyskaniu odpowiedniego pokrycia młodym pokoleniem następują dalsze prace.

Pozyskiwanie surowca odbywa się na większej powierzchni i z mniejszą intensywnością, co skutkuje mniejszymi ilościami drewna rozłożonymi w dłuższym czasie. Cięcia częściowe wymagają bardziej skomplikowanej logistyki, ponieważ mimo większego całościowego terenu drewno pozyskiwane jest z wielu różnych, mniejszych obszarów. Może to wymagać częstszych transportów mniejszych ilości drewna.

Oprócz wymienionych powyżej cięć całkowitych i częściowych istnieje jeszcze jedna grupa cięć, rzadziej używana w Polsce, gdzie drewno pozyskuje się w sposób ciągły z większego obszaru, jednocześnie dbając, aby drzewostan występował trwale na gruncie. Takie cięcia nazywają się cięciami przerębowymi.

### **1.2.3. Wpływ na ekosystem i logistykę**

Cięcia zupełne mają większy wpływ na ekosystem, ponieważ całkowite usunięcie drzew może prowadzić do erozji gleby, utraty bioróżnorodności oraz zaburzenia mikroklimatu leśnego. Proces odnowienia lasu jest długotrwały, wymaga dużych nakładów pracy i sporych środków finansowych. Jednorazowe pozyskanie dużej ilości surowca drzewnego pozwala na osiągnięcie dużego zysku z jego sprzedaży oraz ułatwia planowanie logistyki w krótkim okresie, jednak prowadzi do konieczności znalezienia nowych obszarów pozyskiwania drewna po wykonanej wycince, co komplikuje logistykę w dłuższym horyzoncie czasowym.

Cięcia częściowe natomiast pozwalają na zachowanie większej bioróżnorodności i stabilności ekosystemu. Stopniowe usuwanie drzew minimalizuje negatywne skutki dla środowiska, wspierając naturalne procesy regeneracji lasu. Mogą one być bardziej kosztowne w krótkim okresie z powodu bardziej złożonej logistyki związanej z potrzebą częstszych transportów drewna, ale długoterminowo zapewniają jego stabilny dopływ i mniejsze wahania ceny surowca.

## **1.3. Horyzont planowania w leśnictwie**

Ze względu na długi okres wzrostu drzew i połączony z nim długi okres produkcji drewna horyzont czasowy przyjmowany w leśnictwie jest znacząco dłuższy niż w innych dziedzinach gospodarki (Płotkowski i in., 2016). Leśnicy najczęściej myślą w perspektywie pokolenia lasu, które równa się kilku pokoleniom ludzkim. Dla uproszczenia można przyjąć, że mówimy tutaj o horyzoncie stuletnim. Jednocześnie w związku z różnymi możliwościami planowania opartymi o dokładność danych do prognoz oraz długim wyprzedzeniem, dzielimy ten horyzont na trzy części w związku z oczekiwaną dokładnością zakładanych planów: strategicznym (najdłuższym), taktycznym (średniookresowym) i operacyjnym (bieżącym). Jednocześnie mówimy w tym przypadku o różnej skali przestrzennej tych założeń: lokalnej, regionalnej i krajowej – w warunkach polskich skupionej na tej pierwszej i ostatniej grupie. Każdy z tych poziomów odgrywa istotną rolę w realizacji długoterminowych celów ekologicznych, ekonomicznych i społecznych.

### **1.3.1. Planowanie strategiczne**

Planowanie strategiczne obejmuje długofalowe strategie zarządzania lasami, zazwyczaj na okres ponad stu lat. Jest to etap, w którym określa się główne cele i kierunki rozwoju gospodarki leśnej na poziomie narodowym. Na poziomie krajowym obejmuje ono dwa dokumenty. Pierwszy to Narodowy Program Leśny, który określa długoterminowe cele i priorytety w zarządzaniu lasami na szczeblu krajowym. Uwzględnia on aspekty ekologiczne, ekonomiczne oraz społeczne, takie jak ochrona bioróżnorodności, zrównoważone pozyskiwanie drewna oraz adaptacja do zmian klimatycznych. Drugim jest Polityka Leśna Państwa – przyjęty w 1997 roku dokument dotyczący rozwoju leśnictwa zawierający założenia, cele, uwarunkowania, spodziewane efekty i harmonogram realizacji w trzech okresach: do 2000 roku, do 2020 roku i w drugiej połowie XXI wieku, jednak nieaktualizowany do obecnych uwarunkowań (Paschalis-Jakubowicz, 2020). W skali regionalnej mówi się tutaj o długofalowych strategiach hodowli lasu – obejmują one dobór rodzimych gatunków drzew do odnowienia lasu, co ma na celu zwiększenie odporności drzewostanów na zmiany klimatyczne oraz szkodniki. Strategia ta jest kluczowa dla zachowania zdrowych i zrównoważonych lasów na przyszłe pokolenia (PGL LP, 2012). Na poziomie lokalnym istnieją aktualnie dwa dokumenty planistyczne wpływające m.in. na lasy, tj. plan ogólny i plan miejscowy (Dz.U. 2023 poz. 1688, 2023).

### **1.3.2. Planowanie taktyczne**

Planowanie taktyczne obejmuje zazwyczaj krótsze okresy niż planowanie strategiczne, wynoszące ok. 5-10 lat. W Polsce, głównym elementem planowania taktycznego na poziomie lokalnym są plany urządzania lasu, opracowywane w cyklach 10-letnich, które:

- wdrażają założenia dotyczące zalesień gruntów – plany urządzania lasu obejmują szczegółowe wytyczne dotyczące zalesiania terenów oraz odnowienia powierzchni leśnych zgodnie z narodowym programem leśnym;
- implementują składy gatunkowe z hodowli lasu – plany te uwzględniają strategie hodowli lasu, w tym dobór rodzimych gatunków drzew do odnowienia lasu, co ma na celu zwiększenie odporności drzewostanów na zmiany klimatyczne i szkodniki;
- przygotowują plany cięć – określają miejsca i metody pozyskiwania drewna, co pozwala na zrównoważone zarządzanie zasobami leśnymi.

Na poziomie krajowym w cyklach 5-letnich wykonuje się Wielkoobszarową Inwentaryzację Stanu Lasów w Polsce (BULiGL, 2020), która obrazuje stan lasów w jednolitym momencie czasowym niezależnie od ich formy własności.

### **1.3.3. Planowanie operacyjne**

Planowanie operacyjne obejmuje jeszcze krótsze okresy, zazwyczaj jednego roku i koncentruje się na realizacji konkretnych działań gospodarczych w lesie. Na poziomie operacyjnym przygotowuje się szczegółowe wytyczne dotyczące:



- zakładania powierzchni zrębowych – na podstawie planów cięć przygotowuje się szczegółowe instrukcje dotyczące momentu wycinki, sposobu jej przeprowadzenia oraz dokładnego kształtu wycinanego fragmentu lasu;
- odnowienia powierzchni leśnych – określa się, co i jak będzie posadzone na miejscu wycinki, uwzględniając wytyczne z planów urządzania lasu oraz długofalowe strategie hodowli lasu;
- zarządzania logistyką prac leśnych – obejmuje to organizację i koordynację pracowników, maszyn i sprzętu potrzebnego do wycinki, transportu i przetwórstwa drewna.

W skali krajowej działania te są podsumowywane w ramach corocznego sprawozdania pt. Raport o stanie lasów w Polsce (DGLP, 2023).

Kluczowym elementem skutecznego zarządzania gospodarką leśną jest koordynacja pomiędzy poziomami planowania: strategicznym, taktycznym i operacyjnym. Planowanie strategiczne wyznacza długoterminowe cele i strategie, planowanie taktyczne wdraża te cele na okresy 10-letnie, a planowanie operacyjne koncentruje się na ich realizacji w krótkim okresie. Aby zapewnić spójność i efektywność działań, konieczne jest regularne aktualizowanie planów operacyjnych na podstawie wyników monitoringu i oceny realizacji planów taktycznych.

#### **1.4. Planowanie a realizacja pozyskania**

W organizacji gospodarstwa leśnego rozwiązywanie problemów użytkowania rębnego jak i przedrębego należą do zagadnień bardzo ważnych. Podjęte decyzje odnośnie użytkowania mają długookresowy wpływ na zmiany stanu lasów i jego zasoby. Istnieje stosunkowo dużo badań poświęconych zagadnieniom regulacji użytkowania rębnego związanej z pobieraniem plonu, czyli etatem rębnym (Poznański, 1987; Rutkowski, 1988, 1972). Natomiast etat użytków przedrębnych wynika z potrzeb hodowlanych drzewostanów, które na etapie urzędniowych prac taksacyjnych są trudne do dokładnego ustalenia, szczególnie że planuje się je na 10 lat wprzód.

Problem metody regulacji użytkowania przedrębego od dawna był dostrzegany i pojawiały się różne propozycje. W urządzaniu lasu wykorzystywano zarówno metody szacunkowe jak i szacunkowo-pomiarowe (Rosa i Smykała, 1985). W praktyce wyznaczenie etatu użytków przedrębnych ograniczało się do określenia wartości 50% spodziewanego przyrostu bieżącego miąższości. Często do wartości tych zgłaszano zastrzeżenia, że są zbyt niskie w stosunku do faktycznych potrzeb hodowlanych. W następstwie tych zastrzeżeń, zarządzeniem Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych (DGLP, 2007) przyjęto, iż w uzasadnionych przypadkach wielkość użytkowania przedrębego może być podniesiona do 70% spodziewanego bieżącego przyrostu miąższości tej grupy drzewostanów (DGLP, 2007). Taka propozycja budziła zastrzeżenia (Borecki i in., 2012), bo łączenie planowanego użytkowania przedrębego z przyrostem nie jest do końca właściwe. Szczególnie, że jak podano we wstępie, drzewostany w najbliższych dekadach będą się starzały, a przyrost, którego kulminacja występuje u drzew w wieku 40-60 lat, będzie malał, ponieważ będzie się zmniejszał udział tych drzewostanów. Jest sprawą oczywistą, że w najbliższym czasie zacniemy użytkować miąższość równą, a nawet wyższą niż odkładający się coraz mniejszy

przyrost miąższości. Nie ma w tym jednak nic dziwnego, ponieważ po poprawieniu struktury wiekowej i zasileniu grup drzewostanów charakteryzujących się maksymalnym przyrostem, stan ten wróci do równowagi. W obecnie obowiązującej instrukcji urządzania lasu (PGL LP, 2024) wykorzystuje się przede wszystkim dane z lat ubiegłych oraz spodziewany przyrost bieżący miąższości drzewostanów. Jednocześnie przyjęto zasadę, że planowany rozmiar użytkowania przedrębego ogółem nie powinien przekroczyć 50% spodziewanego przyrostu ze wszystkich drzewostanów nie objętych użytkowaniem rębny.

Na etapie zatwierdzania planu urządzania lasu, określony zgodnie z wymogami ustawowymi etat łączny użytków przedrębnych i rębnych (etat całkowity) stanowił maksymalną wielkość możliwą do pozyskania. Stan ten wymuszał określanie etatu użytkowania przedrębego nie tylko w wymiarze powierzchniowym, ale również miąższościowym. Miało to swoje negatywne następstwa, ponieważ faktyczne potrzeby hodowlane w trakcie realizacji cięć były z reguły wyższe niż prognozowany w rozmiarze miąższościowym etat użytków przedrębnych (Borecki i in., 2012; Zajączkowski, 2013, 1993). Do roku 2015 oba etaty traktowane były jako łączne (DGLP, 2014; Dz.U. 2014 poz. 222, 2014; Jaszczak i in., 2018) i obliczona wartość maksymalna etatu nie mogła być przekraczana. Jednocześnie potrzeby hodowlane drzewostanów traktowane były priorytetowo i etat użytków przedrębnych miał pierwszeństwo przed etatem użytków rębnych (Borecki i in., 2011), co przy większym użytkowaniu tego pierwszego kończyło się zmniejszeniem użytkowania tego drugiego (kompensowaniem). W konsekwencji miało to duży wpływ na strukturę wiekową polskich lasów.

W aktualnie obowiązującej Instrukcji urządzania lasu z 2012 roku (PGL LP, 2024) pojawił się zapis, który pozwolił na oddzielne traktowanie powyższych etatów, dzięki czemu etat użytków rębnych w wymiarze powierzchniowym oraz miąższościowym jest obligatoryjny do pozyskania i nie ma problemów z jego realizacją (Borecki i in., 2016). Natomiast etat użytków przedrębnych jest obligatoryjny w wymiarze powierzchniowym, co oznacza, że na takiej powierzchni trzeba go zrealizować. W wymiarze miąższościowym jest on fakultatywny, co oznacza, że jest to wartość przybliżona, która może zmieniać się w razie potrzeby wykonania zabiegu o mniejszej lub większej intensywności w momencie jego realizacji w stosunku do planu. Dzięki temu, nie ma problemów z realizacją etatu rębego w wymiarze miąższościowym, co zapewnia dostawy drewna wielkowymiarowego na odpowiednim poziomie. Poprawiła się też dokładność planowania wielkości pozyskania drewna w etacie przedrębnym poprzez wprowadzenie możliwości korzystania z danych historycznych oraz porównywania informacji na poziomie obrębu leśnego (Wójcik, 2013).

## 1.5. Wpływ zmian klimatycznych na pozyskanie drewna

Polska doświadcza szeregu zmian klimatycznych, które mają bezpośredni wpływ na lasy, a obserwowane lokalnie zmiany są silniejsze niż te globalne. Średnia roczna temperatura powietrza wzrastała w tempie 0,28°C na 10 lat w latach 1951–2019, a ocieplenie było najintensywniejsze wiosną i zimą, natomiast najwolniejsze jesienią (Wibig, 2020). Prognozy wskazują na dalszy wzrost średnich rocznych temperatur, co może wpływać na sezon wegetacyjny drzew i ich zdrowotność (Burchard-Dziubińska i Prandecki, 2020). Przewiduje się zmiany w rozkładzie opadów, z większą liczbą intensywnych opadów deszczu w krótszych okresach oraz dłuższymi okresami suszy. Częstsze burze, huragany, pożary

lasów oraz inne ekstremalne zjawiska pogodowe stanowią bezpośrednie zagrożenie dla lasów (Wibig, 2020). Zmiany klimatyczne mogą również sprzyjać rozmnażaniu się szkodników i rozwojowi chorób drzew, co może prowadzić do masowego obumierania drzewostanów, jak również do zmian składów gatunkowych poprzez ustępowanie gatunków borealnych na rzecz ciepłolubnych (Jagodziński i in., 2020).

Planowanie prac leśnych będzie musiało uwzględniać zmieniające się warunki klimatyczne, takie jak zmiany długości sezonu wegetacyjnego i wzrost ryzyka wystąpienia ekstremalnych zjawisk pogodowych, co może wymusić zmiany w harmonogramach prac leśnych. Na przykład, susze mogą ograniczać okresy, w których możliwe jest sadzenie nowych drzew, a intensywne opady mogą utrudniać prace wycinkowe.

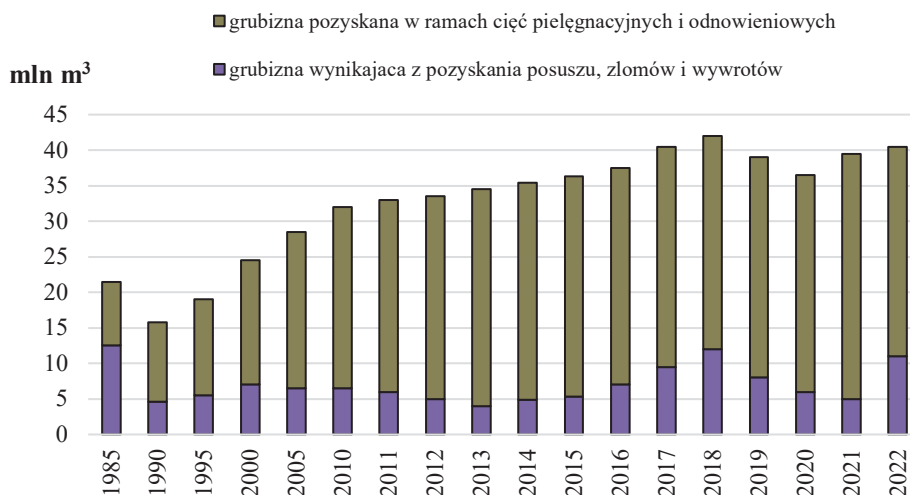
Konieczne będzie dostosowanie gatunków drzew do nowych warunków klimatycznych. Rodzime gatunki mogą być zastępowane lub uzupełniane bardziej odpornymi gatunkami, które lepiej przystosowują się do wyższych temperatur i zmieniających się warunków opadów. Możliwe, że rodzime gatunki drzew aktualnie nieuważane za lasotwórcze zmieniają swój profil (Jagodziński i in., 2020). Zmiany klimatyczne mogą też wymusić rozwój nowych technik sadzenia drzew, które będą bardziej odporne na susze i ekstremalne zjawiska pogodowe.

Kluczowe w tym zakresie będzie zwiększenie intensywności monitoringu lasów w celu wczesnego wykrywania szkodników, chorób oraz innych zagrożeń związanych ze zmianami klimatycznymi. Niezbędne stanie się wdrożenie systemów zarządzania ryzykiem, które będą umożliwiały szybkie reagowanie na zagrożenia. Wzrost ryzyka pożarów lasów wymaga dostosowania systemów zarządzania pożarami, w tym lepszej infrastruktury.

Zmiany klimatyczne mają również bezpośredni wpływ na pozyskanie drewna. Choć pozyskanie przygodne (czyli nieplanowane usuwanie drzew uszkodzonych lub martwych) kształtuje się na poziomie ok 5 mln m<sup>3</sup> rocznie (DGLP, 2023), to pojawiają się lata, kiedy przekracza 10 mln m<sup>3</sup> (Rysunek 1.2, np. lata 2018, 2022). Mimo, że wciąż daleko nam do poziomu 12 mln z połowy lat 80-tych XX wieku, to należy pilnie obserwować jak zmiany klimatyczne będą wpływały na te wyniki. Aktualnie największe szkody w drzewostanach spowodowane działaniem przyrody nieożywionej wywołuje wiatr (70%) następnie zmiany stosunków wodnych, czyli susze (21%) oraz śnieg (9%) (DGLP, 2023).

Prognozowane zwiększanie średniej temperatury w połączeniu z podobnymi ilościami opadów, ale inaczej rozłożonymi w czasie (bardziej nasilonymi z większymi przerwami pomiędzy nimi) skutkować będzie zmniejszoną dostępnością wody (Wibig, 2020), co jeszcze bardziej zwiększy problem uszkodzeń drzewostanu spowodowanych suszą. Uszkodzenia lub obumieranie drzew to większa skala cięć przygodnych, które powodują odłożenie w czasie planowanych prac leśnych, co może wpłynąć na jakość później pozyskanego drewna. Problem ten będzie miał niebagatelne znaczenie w przypadku logistyki dostaw surowca drzewnego. Dobrze to zobrazowały problemy po huraganie w Borach Tucholskich w 2017 roku, kiedy ogromne ilości drewna z jednej lokalizacji musiały zostać sprzedane w bardzo krótkim czasie.

Obniżenie poziomu wilgotności w środowisku będzie skutkowało ponadto zwiększoną podatnością ekosystemów leśnych na pożary. Odpowiednie przygotowanie zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz utrzymywanie przez Lasy Państwowe system rozpoznania zagrożenia pożarowego jest, póki co skutecznym narzędziem do zabezpieczenia przed negatywnymi skutkami takich przypadków. Aczkolwiek, jeśli presja z pożarami się nasili, konieczna będzie weryfikacja ilości martwego drewna w lesie, które w warunkach suszy zmienia się w paliwo.



Rys. 1.2. Udział pozyskania posuszu, złomów i wywrotów w użytkowaniu ogółem w Lasach Państwowych w latach 1985-2022 w mln m<sup>3</sup> grubizny netto (DGLP, 2023) [zmodyfikowany].

Ponadto ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak burze i intensywne opady deszczu, mogą utrudniać transport drewna z lasów do zakładów przetwórczych. Powodzie i uszkodzenia dróg leśnych mogą prowadzić do opóźnień i zwiększenia kosztów transportu. Poważny problem stanowią także mogą wspomniane pożary powierzchni leśnych. Występują one szczególnie często w okresie letnim i podczas coraz bardziej wydłużających się okresów bez opadów atmosferycznych. Klęski pożarów wymuszają inne niż zaplanowane miejsca i wielkości pozyskiwanego surowca drzewnego. Konieczność dostosowania działań operacyjnych, takich jak zmiana harmonogramów prac, do zmieniających się warunków klimatycznych i efektów klęsk żywiołowych, może prowadzić do wzrostu kosztów operacyjnych.

Zmiany klimatyczne będą wpływały również na zwiększone ryzyko związane z pracami leśnymi (bezpieczeństwo) i pozyskiwaniem drewna (omawiane wcześniej cięcia przygodne), co może prowadzić do wzrostu kosztów produkcji i wpłynąć na rentowność sektora leśnego. Zmniejszona dostępność drewna oraz zmiany struktury zasobów leśnych mogą prowadzić do zmiany dynamiki popytu i podaży na rynku drzewnym. To z kolei może wpłynąć na ceny drewna oraz konkurencyjność polskiego sektora leśnego na rynku międzynarodowym.

Innowacyjne metody zarządzania lasami będą kluczowe w adaptacji do zmian klimatycznych. Wykorzystanie teledetekcji oraz systemów informacji przestrzennej do monitorowania stanu lasów i przewidywania zagrożeń związanych ze zmianami klimatycznymi pozwala na szybkie reagowanie na zmieniające się warunki i minimalizację negatywnych skutków tych zmian (Miętkiewicz, 2020), ale również na sprawne oszacowanie ilości drewna wymagającego manipulacji na skutek nieprzewidzianych zdarzeń.

## 1.6. Ograniczenia w możliwości koncentracji prac leśnych

Koncentracja prac pozyskaniowych w lasach, czyli skoordynowane w czasie i przestrzeni działania związane z pozyskaniem drewna, może przynieść korzyści zarówno z punktu widzenia logistyki, jak i ochrony środowiska. Szczególnie korzystne jest zastosowanie koncentracji prac w przypadku wykonywania cięć pielęgnacyjnych, które stanowią około 50% całości pozyskania drewna w Lasach Państwowych. Nie jest istotne, poza wykonaniem cięć pilnych, w jakim czasie wykonamy cięcia pielęgnacyjne (użytkowanie przedrębne) w danym 10-leciu. W większości przypadków możemy wykonywać cięcia pielęgnacyjne na obszarze kompleksu leśnego, leśnictwa czy innego obszaru ograniczonego np. do drogi wywozowej i sieci dróg zrywkowych.

Podczas przygotowywania planu cięć rębnych, czyli zestawienia przestrzennego obejmującego wyznaczone do pozyskania w ciągu najbliższego dziesięciolecia drzewostany, należy zadbać o zachowanie mikroklimatu leśnego poprzez minimalizację powierzchni pozbawionej roślinności leśnej. W tym celu w ramach ładu przestrzennego w lasach zagospodarowanych w sposób zrębowy wyznacza się pasy ostępowe przebiegające w kierunku dominujących wiatrów. Następnie pasy te są dzielone na mniejsze jednostki, ostępy, które służą lepszemu planowaniu gospodarki leśnej (PGL LP, 2024). Przeciętna długość ostępu w warunkach nizinnych Polski to ok. 1000 m.

W ramach ostępu prowadzi się cięcia w kierunku „pod wiatr” tak aby docelowo drzewostany były ukształtowane w sposób schodkowy pozwalając przez to ochronić lasy przed niszczyielskim wpływem wiatrów (PGL LP, 2024). Minimalizacja powierzchni otwartej i jej rozproszenie w ramach kompleksu leśnego (wpływające finalnie na ład przestrzenny (Magnuski i Ważyński, 1998)) prowadzone są w ten sposób, że w ramach jednego ostępu można wykonywać tylko jedno cięcie w danym czasie (nie wycinamy dużej powierzchni na raz) oraz cięcia wykonywane w różnych ostępach nie mogą łączyć się w większe powierzchnie czasowo pozbawione lasu (np. zręb w jednym ostępie graniczący ze zrębem z drugiego ostępu). Zabiegi w ramach jednego ostępu rozłożone są w czasie w związku z ładem czasowym (Stępień i in., 1999) i nie wykonuje się kolejnych zabiegów pozyskaniowych, dopóki powierzchnia poprzedniego zabiegu nie zostanie przywrócona do stanu funkcjonalności (odnowiona). Wynika to z przyczyn ekologicznych – utworzenie dwóch zrębów rok po roku stworzyłaby dużą otwartą przestrzeń, czego chcemy uniknąć.

W wyjątkowych okolicznościach, np. gdy duża powierzchnia lasu porośnięta jest jednowiekowym drzewostanem, możliwe jest wykonywanie dwóch zabiegów rębnych w jednym ostępie, jednak muszą być one oddzielone od siebie przestrzennie. Ostępy takie nazywamy ostępami przejściowymi (PGL LP, 2024).

Najważniejszym jednak czynnikiem ograniczającym koncentrację prac leśnych jest przyjęty w danym lesie wiek rębności (również element ładu czasowego), który określa moment pozyskania danego drzewostanu. Tylko drzewostany bliskie lub przekraczające zakładany wiek rębności (określany na podstawie dojrzałości plonu), czyli bliskorębne, rębne albo przeszlorębne, mogą być pozyskane przy użyciu cięć rębnych. Drzewostany z pozostałych klas, tzw. przedrębne (PGL LP, 2024), mogą być jedynie użytkowane przy użyciu cięć pielęgnacyjnych.

## 1.7. Sprzedaż drewna

Spośród 96% drewna sprzedawanego w Polsce przez Lasy Państwowe (Główny Urząd Statystyczny, 2023) ok. 88% trafia do przedsiębiorców, a pozostałe 12% jest skierowane do odbiorców indywidualnych (detalicznych), czyli zarówno osób fizycznych oraz firm, których główna działalność nie polega na przeróbce drewna. Oferta skierowana do firm drzewnych opiera się na bezstronnych procedurach elektronicznych i ma na celu promowanie długofalowej współpracy, dlatego aż 75% drewna oferowanego w tej puli trafia do sprzedaży ofertowej wyłącznie dla stałych nabywców na Portalu Leśno-Drzewnym. Pozostałe 25% drewna sprzedawanych jest na otwartych aukcjach systemowych na portalu e-drewno (DGLP, 2024a). Ponadto sprzedaż drewna dla firm może odbywać się w ramach aukcji internetowych oraz submisji drewna cennego. Osoby fizyczne nabywają drewno (głównie opałowe) na podstawie cennika detalicznego, natomiast jednostki Lasów Państwowych mogą nabywać drewno na potrzeby własne.

Przedsiębiorca wybiera jeden z wariantów oceny oferty: wyłącznie cena zakupu albo łącznie cena zakupu, udział przerabianego drewna, głębokość przerobu oraz geografia zakupu. W tym drugim przypadku kryterium ceny ma wagę 75%, udział przerabianego drewna 7,5%, głębokość przerobu również 7,5%, natomiast geografia zakupu 10% (DGLP, 2024b). Ostatnie kryterium jest odwrotnie proporcjonalne do odległości między zakładem przetwórczym i miejscem zakupu. Nowe zasady, poprzez publikację planu sprzedaży oraz jawność procedur, a także większą elastyczność przy wydłużaniu umów, powinny ułatwić zakupy firmom drzewnym.

W PGL Lasy Państwowe obrót pozostałościami drzewnymi na cele energetyczne oparty jest o „Skorygowane zasady obrotu i ewidencji pozostałości drzewnych (drobnicy) na cele energetyczne M2E (zrębki energetyczne M2ZE i baloty M2BE)” wprowadzone pismem z dnia 15.04.2011 roku znak OM-906-72/11 (DGLP, 2011). Drewno M2E sprzedawane jest w ramach puli pozostałości drzewnych (DGLP, 2024b).

## Podsumowanie rozdziału 1

Leśnictwo, w odróżnieniu od innych działów gospodarki, charakteryzuje się długim okresem planowania swoich działań. Jest to związane ze specyficznymi cechami lasu, jakimi są wielkoobszarowość działania, długi okres produkcji, trudność w określeniu dojrzałości produktu oraz w jego bezpośrednim pobraniu. Dlatego działania związane z pozyskaniem drewna w lesie dzielimy na dwa typy: cięcia przedrębne o charakterze pielęgnacyjnym i sanitarnym w pierwszych kilkudziesięciu latach życia drzew oraz cięcie rębne wtedy, gdy chcemy przeprowadzić proces przemiany pokoleń.

Największym problemem w leśnictwie było planowanie użytków przedrębnych, ponieważ ustalane są one szacunkowo, a rzeczywiste potrzeby hodowlane znacząco odbiegają od planów. Jest to związane z wpływem warunków klimatycznych, gradacji owadów, pożarów itp., na stan lasu, co częściowo destabilizuje planowane w odniesieniu do wielkości pozyskania. Do roku 2015 rekompensowano wyższe potrzeby hodowlane i sanitarne rezygnacją z części użytków rębnych. Powodowało to jednak zwiększanie się puli drzewostanów przeszlórębnych (podatnych na różnorakie uszkodzenia) i oczywiście



rezygnację z bardziej wartościowego surowca drzewnego. Od roku 2015 nie ma potrzeby kompensacji cięć przedrębnych w cięciach rębnych.

Pozyskanie w Lasach Państwowych ustabilizowało się na poziomie 40-42 mln m<sup>3</sup> rocznie, głównie ze względów społecznych oraz zmian klimatycznych wpływających na konieczność coraz większego udziału użytków przygodnych. Wielkość użytkowania zależy od tego, w jakim stopniu strategii i polityki dotyczące leśnictwa i zmian klimatu, ustalane na poziomie Unii Europejskiej, zostaną wdrożone do naszego prawodawstwa. Śledząc większość zapisów dotyczących mitygacji i przeciwdziałania zmianom klimatu, można dojść do wniosku, że zamiast przyjąć rozwiązania optymalne dla funkcjonowania i leśnictwa, przyjmuje się rozwiązania dotyczące ograniczenia cięć, nie zdając sobie sprawy, że jest to działanie krótkowzroczne, a efekty po pewnym czasie będą dokładnie odwrotne od zamierzonych. Zaniechanie częściowego użytkowania lasów to z jednej strony wydłużenie dochodzenia ich do właściwej struktury wiekowej i gatunkowej, a z drugiej strony brak długotrwałego zatrzymania węgla.

Pozyskanie drewna w lasach prywatnych kształtuje się na poziomie około 1,5-1,8 mln m<sup>3</sup> drewna zalegalizowanego, a faktyczne pozyskanie wynosi w granicach 4,5-5 mln m<sup>3</sup>. Potencjał dotyczący pozyskania drewna w lasach prywatnych będzie się zwiększał, ponieważ podobnie jak w Lasach Państwowych drzewostany się starzeją i zwiększa się stopniowo udział drzewostanów dojrzałych do wycięcia. W przypadku lasów prywatnych nie występują zagrożenia w pozyskaniu drewna opisane powyżej, a więc wynikające z zapisów dokumentów autorstwa Komisji Europejskiej dotyczących zagospodarowania lasów zarządzanych przez państwo.

Wykazano, że możliwości pozyskania użytków rębnych są dużo większe niż wynosi obecna wielkość jego pozyskania. Starzenie się drzewostanów wprowadzonych na gruntach porolnych, spowoduje większą podaż surowca drzewnego w przyszłości. Jednocześnie starzejące się lasy będą mniej produktywne i będzie malał ich przyrost. Spowoduje to zmniejszenie akumulacji węgla, ale również okresowy wzrost użytkowania może być większy niż przyrost drzewostanów.

W leśnictwie niezbędne jest planowanie długookresowe, a wszelkie działania doraźne i rewolucyjne niestety odbijają się w dłuższej perspektywie na pogorszeniu stanu lasu i powodują negatywne następstwa przyrodnicze i ekonomiczne. Bez względu na kierunki przyjętych strategii i polityk, należy dążyć do optymalizacji działań, w tym optymalizacji łańcucha dostaw surowca drzewnego do odbiorców, w celu zminimalizowania kosztów prac leśnych i transportu pozyskanego drewna, a z drugiej strony do zmniejszenia zanieczyszczeń komunikacyjnych i ich negatywnego wpływu na środowisko.

## 2. ORGANIZACJA PROCESU POZYSKIWANIA I ZRYWKI DREWNA

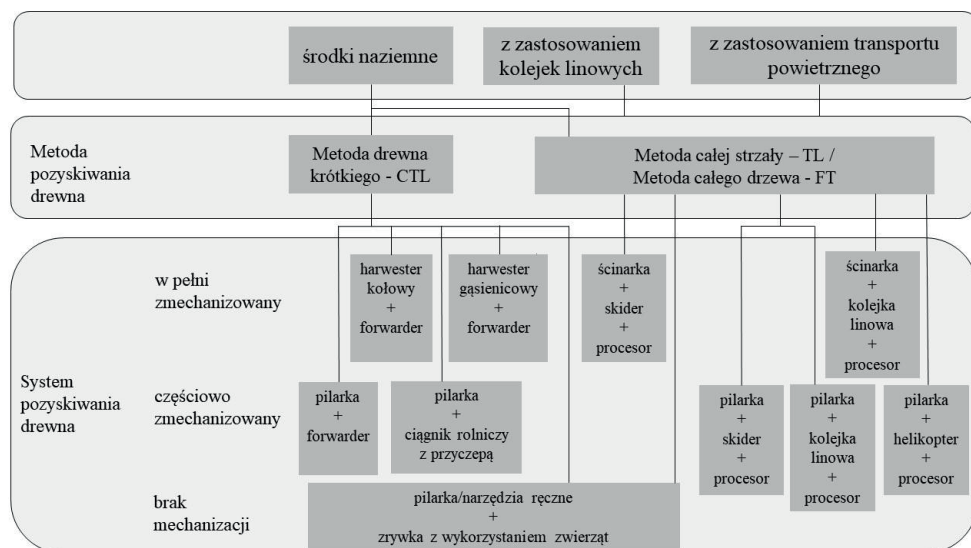
Procesy pozyskania i zrywki drewna są początkowymi etapami łańcucha dostaw w leśnictwie. Wynikiem tych procesów jest powstanie produktów (sortymentów drzewnych) w postaci handlowej lub w postaci półproduktu, z którego w kolejnej operacji taki produkt zostanie wytworzony (np. zrębki do produkcji płyt lub celulozy). Pozyskanie wraz ze zrywką stanowią dwa procesy o bardzo istotnym wpływie na środowisko. Można stwierdzić, że to w ich wyniku „znika las”. Drewno jednak trzeba pozyskiwać, ale przeprowadzając ten proces w taki sposób, aby zmniejszyć jego uciążliwość dla natury. Ta uciążliwość ma dwa zasadnicze oblicza. Szkodliwość dla obszaru, na którym dokonuje się pozyskania widoczna jako zniszczenia siedlisk leśnych, dróg leśnych, uszkodzenie drzew pozostających. Drugim obliczem jest zagrożenie pochodzące od spalin i innych podobnych zanieczyszczeń (paliwa i oleje) przedostających się do środowiska. Oddziaływania te można zredukować zarówno poprzez działania organizacyjne jak i dobór odpowiednich środków technicznych do realizacji wybranych technologii. Wybór technologii pozyskania i zrywki drewna wynika także z dostępności i kosztów pracy pracowników. Bardzo często to właśnie ich brak zmusza wykonawców prac do stosowania urządzeń o wysokim stopniu zmechanizowania, o dużej wydajności zastępujących wielu robotników leśnych wykorzystujących prymitywne środki pracy. Ceną jest jednak niszczenie gleby, uszkodzenie drzew czy duża emisja spalin.

### 2.1. Metody i systemy pozyskiwania i zrywki surowca drzewnego

Drewno jest pozyskiwane i zrywane różnymi metodami (Heinimann, 2004; Heinrich i Arzberger, 2004; Moskalik i in., 2017). W literaturze często można jednak spotkać się z wymiennym stosowaniem terminów „metoda” i „system”. Ujednolicenie terminologii w tym zakresie zostało opublikowane przez naukowców ze *Swedish University of Agricultural Sciences* (Lundbäck i in., 2021). Podają oni za innymi badaczami (Gerasimov i Sokolov, 2014; Lindroos i in., 2017), że wyróżnić można metody pozyskiwania drewna, definiowane na podstawie formatu surowca drzewnego zlokalizowanego na składnicy przy drodze wywozowej oraz systemy pozyskiwania drewna, określane na podstawie kombinacji używanych maszyn, siły roboczej i narzędzi. Ponadto na stosowane terminy może mieć wpływ poziom mechanizacji prac. Przykłady możliwych wariantów zostały przedstawione na rys. 2.1.

O wyborze dominujących procesów technologicznych pozyskiwania drewna w danym kraju decydują dwa czynniki. Są to udział terenów ze znacznymi spadkami oraz udział gleb o niskiej nośności w stosunku do całkowitej powierzchni gruntów leśnych (Nordfjell i in., 2004). Ponadto istotne znaczenie ma poziom rozwoju gospodarczego danego kraju, wpływający na koszty pracy. Przy wysokim ich poziomie stosowane są częściej rozwiązania charakteryzujące się dużym stopniem mechanizacji prac, w którym osiągnąca jest stosunkowo duża wydajność pracy (Asikainen i in., 2011). Jednym z ważniejszych czynników w tym zakresie jest koszt zakupu oleju napędowego, ponieważ prawie wszystkie operacje pozyskiwania drewna na świecie wymagają stosowania silników wysokoprężnych. Istnieje wyraźna różnica w zużyciu oleju napędowego pomiędzy metodami pozyskiwania drewna

(całego drzewa – *ang. full-tree method FT*, całej strzały – *ang. tree-length method TL*, drewna krótkiego – *ang. cut-to-length method CTL*). Wynika to z tego, że pozyskanie metodą CTL może wiązać się z użyciem mniejszych maszyn, co skutkuje o około 40% mniejszym zużyciem oleju napędowego na jednostkę pozyskanego drewna okrągłego (Zhang i in., 2016).



Rys. 2.1. Warianty pozyskiwania drewna w zależności zastosowanych metod i systemów (Lundbäck i in., 2021).

Opracowanie dotyczące wykorzystania stosowanych technologii pozyskiwania drewna w naszym regionie geograficznym zostało oparte o eksperckie badania ankietowe (Moskalik i in., 2017). Pytania dotyczyły stopnia mechanizacji prac w zakresie pozyskiwania i zrywki drewna w danym kraju, ze szczególnym uwzględnieniem podania liczby pracujących harwesterów i forwarderów, stosowanych procesów technologicznych oraz efektywności pozyskiwania i transportu surowca drzewnego. Rezultaty pozwoliły na wyróżnienie 9 metod pozyskiwania drewna krótkiego o długościach wyrabianych sortymentów poniżej 6 m oraz 5 metod pozyskiwania drewna długiego (powyżej 6 m). Metody te różnią się stopniem mechanizacji prac oraz odległością pomiędzy szlakami zrywkowymi. Dokładna charakterystyka procesów z częstotnością ich występowania, została zamieszczona w tabeli 2.1.

Największy poziom mechanizacji prac stwierdzono w krajach nadbałtyckich, szczególnie w Estonii (90% w drzewostanach rębnych i 80% w trzebieżach) i na Łotwie (70%). W Polsce, w analizowanym okresie (2017 r.) wynosił on ok. 30%.

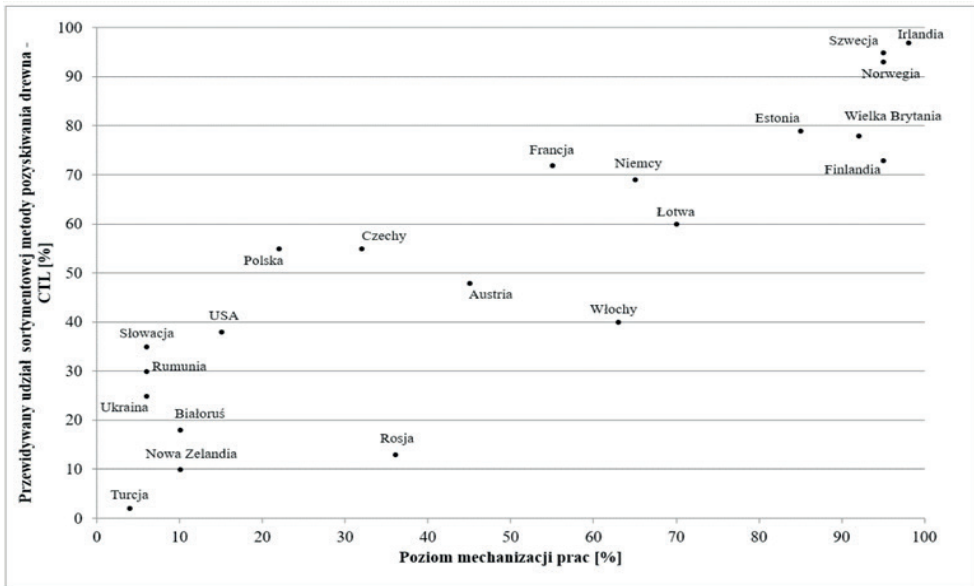
W ostatnich latach w wielu krajach, przy pozyskaniu surowca drzewnego zauważalny jest dynamiczny wzrost stosowania metody drewna krótkiego (CTL) z użyciem harwesterów i forwarderów. Występuje jednak duże zróżnicowanie między krajami wynikające z dostępności siły roboczej, z obawy przed bezrobociem i ze stopnia możliwości inwestycyjnych. Tempo inwestycji w mechanizację zależy również od regionalnej dostępności wykwalifikowanej siły roboczej. Złożoność wyspecjalizowanych maszyn

leśnych wymaga odpowiednio przeszkolonych operatorów, aby zespół człowiek-maszyna osiągnął pełną produktywność. Szkolenie operatorów maszyn jest kosztownym i długotrwałym procesem. Przykładowo, według licznych dyskusji z przedsiębiorcami leśnymi w kanadyjskiej prowincji Quebec, proces zdobywania pełnej produktywności operatora wynosi około dwóch lat po odbytych kursie.

Tabela 2.1. Metody pozyskiwania drewna w analizowanych krajach (objaśnienia skrótów: H – harwester; F – forwarder; C – pilarka; O – koń; OT – koń z przyczepą; S – skider; TW – ciągnik rolniczy z wciągarką; TT – ciągnik rolniczy z przyczepą; CC – kolejka linowa; (Moskalik i in., 2017).

Metoda pozyskiwania drewna	Odległość pomiędzy szlakami (m)	Poziom mechanizacji	Długość surowca drzewnego	Białoruś	Bułgaria	Czechy	Estonia	Łotwa	Litwa	Polska	Rumunia	Słowacja	Ukraina	
H-F	20	Pełna mechanizacja	Drewno krótkie < 6 m											
C-H-F	>20	Wysoki poziom mechanizacji												
C-F	20													
C-TT	2													
H-CC	20													
C-H-CC	>20													
C-O-H-F	>30	Częściowo zmechanizowane												
C-OT	20													
C-O-F/TT	>20													
H-TW/S	20	Wysoki poziom mechanizacji	Drewno długie > 6 m											
C-TW/S	>20													
C-CC	>40	Częściowo zmechanizowane												
C-O-TW/S	>20													
C-O	>20													
Opis częstości występowania	Bardzo często													
	Często													
	Rzadko													

Przewidując udział metody sortymentowej w pozyskiwaniu drewna w różnych krajach, opracowano model określający możliwości wprowadzania metody CTL, którego podstawę stanowiły ceny oleju napędowego w danym kraju, wielkość produktu krajowego brutto (GDP, ang: *Gross Domestic Produkt*) i udział terenów ze spadkami >20° (Lundbäck i in., 2021). Wyniki modelowania przedstawione zostały na rys. 2.2. Największe wartości, sięgające >90%, notowane są w krajach skandynawskich (Szwecja, Norwegia) oraz w Irlandii. Dla naszego kraju szacunek ten wynosi ok. 55%.



Rys. 2.2. Przewidywany udział stosowania metody CTL w analizowanych krajach (Lundbäck i in., 2021).

W wielu krajach Europy, w coraz większym stopniu pozostałości zrębowe oraz drewno o bardzo niskiej jakości są wykorzystywane do celów energetycznych. Dla ułatwienia transportu tego surowca i obniżenia kosztów, najczęściej stosuje się jego rozdrabnianie (zrębkowanie) na powierzchniach leśnych lub w niewielkiej odległości od tych powierzchni. Właściwości fizyczne, energetyczne i skład chemiczny zrębków z pozostałości zrębowych zależą od wielu czynników takich jak miejsce powstawania, surowce użyte do ich produkcji oraz warunki i parametry technologiczne prowadzonego procesu produkcji. Ważnymi czynnikami z punktu widzenia zanieczyszczenia zrębków leśnych jest technologia pozyskiwania biomasy przeznaczonej na zrębki i doświadczenie operatora. W trzech podstawowych technologiach zrębkowania, pozostałości zrębowe mogą być rozdrabniane bezpośrednio na powierzchni leśnej, mogą być zebrane z powierzchni i ułożone w stosach przy drodze leśnej, gdzie są rozdrabniane lub mogą być pakietowane, a rozdrabnianie pakietów wykonywane jest na placu u odbiorcy. Modyfikacją technologii pakietowania (balotowania) może być zrywka pozostałości i składowanie ich przy drodze wywozowej. We wszystkich przypadkach pozostałości zrębowe mają kontakt z glebą. Ważne jest zatem doświadczenie operatora maszyny, który podejmując pozostałości nie powinien zagłębiać chwytaka w glebę i nie powinien tym samym przenosić zanieczyszczeń mineralnych (głównie piachu) do gardzieli rębarki (Gendek i in., 2018b; Moskalik i Gendek, 2019).

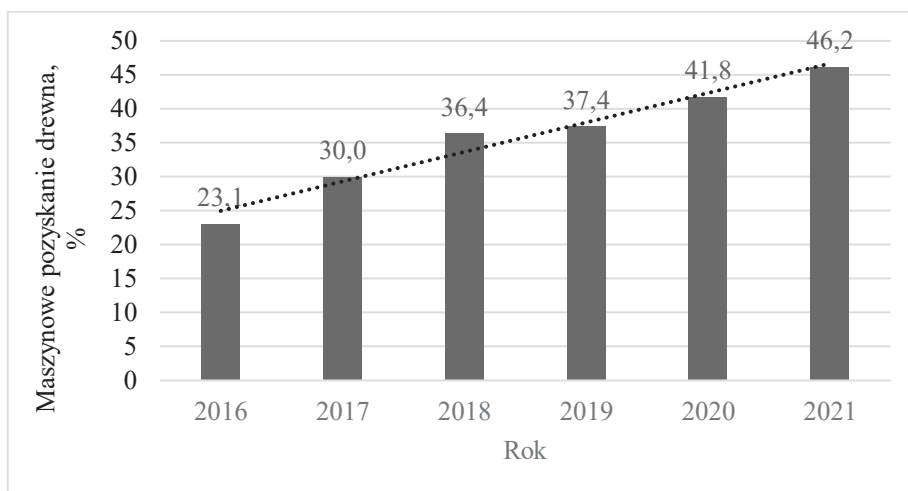
Ze względu na to, że najczęściej biomasę leśną do spalania w zakładach energetycznych dostarcza się w postaci zrębków, ich jakość można poprawić poprzez dobór maszyn i odpowiednie ustawienie parametrów roboczych rębarki (Assirelli i in., 2013; Spinelli i in., 2015), wprowadzenie do technologii urządzeń mechanicznych do poprawy jakości zrębków przez ich przesiewanie (Laitila i Nuutinen, 2015), jak również poprzez odpowiednie

przygotowanie i magazynowanie biomasy przed i po procesie rozdrabniania (Mendel i in., 2016). Przesiewanie zrębków powinno prowadzić do jak najmniejszego udziału cząstek drobnych (Kons i in., 2015), co pozwoli uzyskać optymalne parametry procesu spalania.

Kluczowym czynnikiem wpływającym na zmniejszenie kosztów procesu jest stosowanie istniejących, sprawdzonych technologii stosowanych w innych krajach i dostosowanie ich do swoich warunków. Aspekt ekonomiczny metod pracy w łańcuchu dostaw biomasy, wpływ technologii i metod pracy, transport, magazynowanie i pozyskanie biomasy są to tematy szeroko omawiane w literaturze przedmiotu (Erber i Kühmaier, 2017; Kühmaier i Erber, 2018; Röser i in., 2011; Wolfsmayr i in., 2015). Na efektywność ekonomiczną pozyskania i transportu wpływają również problemy związane z rozdrobnieniem i rozproszeniem powierzchni leśnych, rozproszeniem dużych odbiorców biomasy energetycznej, małą gęstością usypową zrębków i stosunkowo niską ich wartością energetyczną. Czynniki te ograniczają wykorzystanie biomasy leśnej na dużą skalę, zwiększają koszty transportu drogowego i w efekcie mają duże znaczenie dla efektywności ekonomicznej i ekologicznej procesu.

## 2.2. Udział i rozmiar maszynowego pozyskania drewna w Polsce

Jak podano powyżej, Polska znajduje się w grupie państw o średnim poziomie zmechanizowania prac pozyskaniowych. Dokładniejsze badania w tym zakresie przeprowadzono w Instytucie Badawczym Leśnictwa w Sękocinie. Według nich zwiększył się udział maszynowego pozyskiwania drewna z wykorzystaniem harwesterów w ostatnich latach (Bodył, 2022). W roku 2021 wynosił on 46,2% i w stosunku do roku 2016 zwiększył się prawie dwukrotnie (rys. 2.3). Otrzymane wyniki oparte zostały o badania ankietowe obejmujące ponad 85% nadleśnictw. Udział ten jest jednak różny w poszczególnych regionalnych dyrekcjach LP (rys. 2.4).



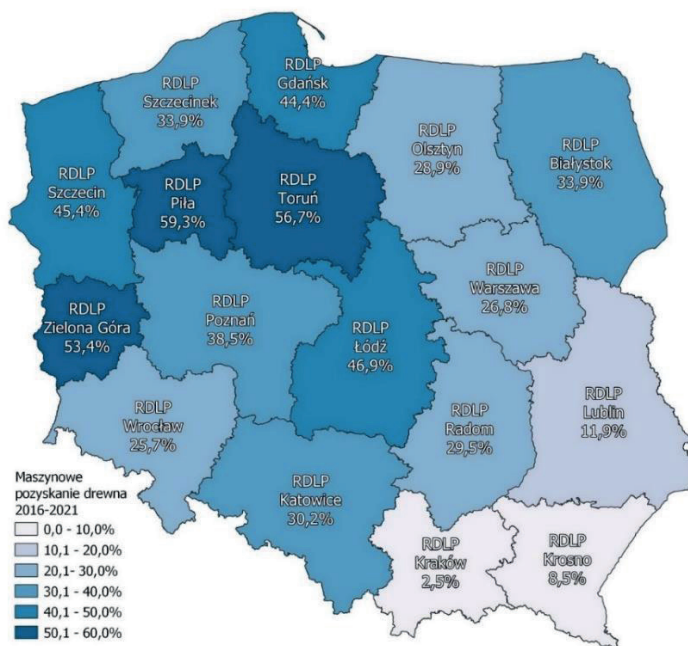
Rys. 2.3. Rozmiar pozyskania maszynowego w Polsce w latach 2016-2021 (Bodył, 2022) [zmodyfikowany].



W roku 2021, w maszynowym pozyskiwaniu drewna, ok. 15,5 mln m<sup>3</sup> drewna pozyskano przy pomocy harwesterów (tabela 2.2). Z danych wynika (rys. 2.4), że wysoki udział maszynowego pozyskania drewna jest skorelowany z lesistością poszczególnych dyrekcji regionalnych. Potwierdza się to w takich dyrekcjach jak zielonogórska, pilska (najwięcej - 59,3%), toruńska, szczecińska, gdańska. Mniejsze wykorzystanie harwesterów w dyrekcjach krośnieńskiej i krakowskiej (najmniej – 2,5%) wynika z górskiego charakteru tych dyrekcji. W tej grupie znajduje się również dyrekcja warszawska, w tym przypadku może to wynikać z dużego rozdrobnienia powierzchni leśnych. Z kolei w dyrekcji białostockiej obserwujemy mniejsze wykorzystanie harwesterów w porównaniu do innych dyrekcji o podobnie wysokiej lesistości. Powodem takiej sytuacji jest najprawdopodobniej łatwiejszy dostęp do siły roboczej w tym regionie Polski.

Tabela 2.2. Rozmiar maszynowego pozyskiwania drewna w PGL LP (rok 2021) w zależności od kategorii cięć (Bodul, 2022).

Kategoria cięć	Pozyskanie drewna	
	(mln m <sup>3</sup> )	(%)
Rębne	8,05	51,98
Przedrębne	6,98	45,08
Kłęskowe i użytki przygodne	0,46	2,94
Razem	15,49	100,00



Rys. 2.4. Udział maszynowego pozyskania drewna w regionalnych dyrekcjach Lasów Państwowych (Bodul, 2022).

Jak pokazano w tabeli 2.2. ponad 96% pozyskania drewna maszynami wielooperacyjnymi odbywa się w ramach cięć rębnych i przedrębnych, przy czym udział obu tych grup jest zbliżony. W cięciach rębnych udział ten jest o około 6 punktów procentowych większy. Istotne jest, że w sumie harwesterami w badanym roku pozyskano ponad 15 mln m<sup>3</sup> drewna, co stanowi ponad 1/3 całkowitego pozyskania w Polsce. Udział ten będzie rósł w kolejnych latach co ma związek z coraz większymi trudnościami w dostępie do pracowników podejmujących się tej ciężkiej pracy na niższym poziomie technicznym (przy użyciu pilarek spalinowych). Problem odpowiedniej organizacji ich pracy, pozwalający na maksymalizację wydajności eksploatacyjnej i w efekcie uzyskanie niskich kosztów jednostkowych – w tym kosztów środowiskowych staje się szczególnie ważny.

### 2.3. Efektywność pracy maszyn

Opłacalność stosowania określonego sprzętu, wyrażona kosztami jednostkowymi zależy od godzinowych kosztów jego użycia oraz od osiągniętej w ciągu godziny wydajności pracy. Z kolei wydajność pracy zależy od bardzo wielu czynników. W przypadku prac związanych z pozyskaniem i zrywką drewna wyróżnić należy kilka ich grup (Eliasson, 1998; Moskalik, 2004; Wołk, 1989). Są to czynniki:

1. organizacyjno-techniczne, wynikające z różnic w stosowanych środkach technicznych oraz sprawności kadry menedżerskiej w organizowaniu pracy, a także będące efektami wpływu otaczającego środowiska – uwarunkowania drzewostanowe (gatunek drzew, rozmiary drzew, liczba drzew przeznaczonych do usunięcia oraz pozostających po zabiegu); sposób udostępnienia powierzchni leśnej; warunki terenowe, takie jak nachylenie terenu, rodzaj podłoża; kategoria cięć; warunki klimatyczne;
2. ekonomiczne, obejmujące mierniki opłacalności produkcji;
3. tkwiące w naturze ludzkiej.

Badania dotyczące wydajności pracy maszyn leśnych były i są prowadzone przez wielu autorów. W tabeli 2.3 przedstawiono zakres wydajności pracy w zależności od zastosowanej metody pozyskiwania drewna oraz kategorii cięć. Wyraźnie zauważyć można, że godzinowa wydajność pracy wzrasta wraz ze stopniem mechanizacji pracy oraz wiekiem drzewostanów.

Tabela 2.3. Zakres osiągniętych wydajności pracy przy pozyskiwaniu i zrywce drewna (Moskalik i in., 2017).

Rodzaj cięć	Średnia miąższość pozyskiwanych drzew, (m <sup>3</sup> )	Wydajność pracy, (m <sup>3</sup> /h)			
		operacje technologiczne (ścinka-okrzesywanie-przerzynka)		zrywka drewna na odległość 300 m	
		metoda dłuźycowa Pilarka	metoda drewna krótkiego (CTL) Harwester	metoda dłuźycowa Skider	metoda drewna krótkiego (CTL) Forwarder
Trzebież wczesna	0,06-0,08	0,5-1,1	4,4-5,6	4,2-5,3	4,6-5,4
Trzebież późna	0,18-0,32	0,7-1,5	8,6-16,1	6,3-14,2	8,8-15,1
Zrąb zupełny	0,32-0,57	1,8- 4,3	19,8-32,1	13,7-16,3	16,5-17,9

Użytkując maszyny leśne do pozyskiwania drewna istotne jest określenie żywotności ekonomicznej, rocznego zużycia i wartości rezydualnej harwesterów i forwarderów. Spinelli z zespołem (2011) zgromadzili obszerną bazę danych ofert sprzedaży maszyn używanych, zawierającą ponad 1000 jednostek, pochodzących z Europy i Ameryki Północnej. Na podstawie analizy tych danych wykazano żywotność ekonomiczną na poziomie 18 000 h zarówno dla harwesterów jak i forwarderów. Średnie roczne wykorzystanie maszyn znajdujących się w bazie wyniosło 1424 h/rok dla harwesterów i 1581 h/rok dla forwarderów. W krajach skandynawskich osiągnano wyższe roczne wykorzystanie maszyn w porównaniu do krajów z Europy Środkowej. Po 5 latach od momentu zakupu, harwestery i forwardery zachowują odpowiednio 38% i 44% wartości nowej maszyny, a wartość rezydualna jest silnie powiązana z wiekiem maszyny.

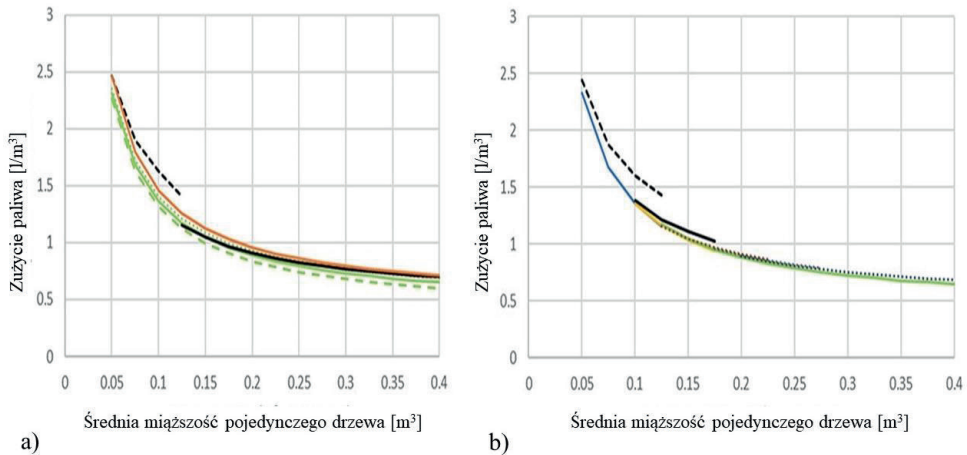
W krajach Europy Zachodniej powszechnie przyjmuje się dla harwesterów wydajność roczną na poziomie 20 000 m<sup>3</sup> drewna. W związku z tym, że w Polsce stan maszyn jest nieco gorszy (maszyny starsze, mniejsze wykorzystanie godzinowe w ciągu roku) należy założyć, iż w naszych warunkach pozyskują one średnio ok. 15 000 m<sup>3</sup> drewna. Zakładając pozyskanie roczne na poziomie 40 mln m<sup>3</sup> i około 50% tej ilości do pozyskania maszynowego można przyjąć, że liczba pracujących harwesterów w Polsce powinna wynosić około 1200 sztuk. Jak podają dane literaturowe, w Polsce ok. roku 2016 było ich ponad 500 (Mederski i in., 2016; Stańczykiewicz i in., 2023), a obecnie szacuje się, że jest to ok. 950 szt. (Bembenek, 2022), jednak ich wiek, stan techniczny i wykorzystanie jest zróżnicowane.

## 2.4. Zużycie paliwa

Jednym z czynników negatywnie wpływającym na środowisko naturalne są spaliny wytwarzane przez maszyny wykorzystywane w procesie pozyskania drewna. Zanieczyszczają one bezpośrednio atmosferę wpływając na zmiany klimatyczne. Konieczne jest zatem uwzględnienie zużycia paliwa oraz związanej z nim emisji dwutlenku węgla. Badania z tego zakresu w ostatnim czasie rozwijane są dosyć intensywnie, co związane jest z obserwowanymi zmianami klimatycznymi (Athanasiadis, 2000; Haavikko i in., 2022). Wcześniej, więcej uwagi poświęcano badaniom związanym ze strukturą czasu i wydajności pracy, a zużycie paliwa traktowano jako informacje dodatkowe (Bacescu i in., 2022). Zagadnienia te należy rozpatrywać w kontekście rodzaju maszyn, ich zastosowania, wielkości.

Zużycie paliwa i olejów przez pilarki spalinowe jest uzależnione od ich mocy oraz prac wykonywanych z ich wykorzystaniem - odrębnie lub razem wykonywana ścinka, okrzesywanie czy przerzynka. Jak podaje literatura (Antonić i in., 2023; Popovici, 2013), w badaniach przy użyciu pilarek Husqvarna o mocach 2,5-3,9 kW zużycie paliwa wynosi 0,15-0,42 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> pozyskanego drewna, a olejów do smarowania pił ok. 0,17 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> drewna.

Z kolei w przypadku wysokowydajnych maszyn do pozyskiwania drewna, stworzono modele do określania zużycia paliwa przez harwestery (Eliasson i in., 2023). Osiągnięte rezultaty, zostały przedstawione na rys. 2.5. Porównano je także z wynikami innych autorów. Można zauważyć, że zużycie paliwa spada wraz ze wzrostem miąższości drzew, oscylując od ok. 2,5 l/m<sup>3</sup> (dla miąższości drzew 0,05 m<sup>3</sup>) do ok. 0,7 l/m<sup>3</sup> (dla miąższości drzew 0,4 m<sup>3</sup>).



Rys. 2.5. Zużycie paliwa przy pracy harwesterów w zależności od średniej objętości drzew: a – przewidywane zużycie paliwa zgodne z modelem 1 (zielona kropkowana linia = harwester trzebieżowy, zielona ciągła linia = różne warunki pracy, zielona przerywana linia = harwester zrębowy) porównane do modelu Brunberga (Brunberg, 2013) (linia pomarańczowa) i modelu Kärhä (Kärhä i in., 2023a) modele dla trzebieży (przerywana linia czarna) i dla zrębu zupełnego (ciągła linia czarna); b - przewidywane zużycie paliwa zgodne z modelem 2 (linia niebieska – pozyskanie 40 m<sup>3</sup>/ha, linia żółta – pozyskanie 70 m<sup>3</sup>/ha i zielona - pozyskanie 210 m<sup>3</sup>/ha) w porównaniu do modelu Kärhä – modele dla trzebieży (przerywana linia czarna) i zrębu zupełnego (ciągła linia czarna 70 m<sup>3</sup>/ha).

W procesie pozyskania drewna w różnym stopniu wykorzystywane są z reguły, zarówno harwestery jak i pilarki spalinowe oraz forwardery lub inne ciągniki zrywkowe. Zadaniem osób planujących prace pozyskaniowe powinno być takie dobranie maszyn i sposobu ich wykorzystania, aby z punktu widzenia funkcji celu osiągnąć optymalne rozwiązanie. Rozwiązanie to jest zależne od wielu czynników ekonomicznych (dostępny park maszynowy), przyrodniczo-leśnych (skład gatunkowy) czy infrastrukturalnych (szlaki operacyjne, drogi, składnice). Ułatwieniem jest tu wprowadzenie przez PGL LP w roku 2019 zaleceń, które zobowiązują jednostki administracyjne PGL LP do udostępniania drzewostanów poprzez sieć szlaków operacyjnych (Stańczykiewicz i in., 2023), co powinno być wykonywane zgodnie z Zasadami Hodowli Lasu. Dla optymalizacji prac, zalecenia te obejmują również możliwość stosowania mieszanych zespołów roboczych (np. harwester i pilarka) w tych drzewostanach, które nie są udostępnione szlakami.

## 2.5. Przedsiębiorstwa leśne

Pozyskanie drewna w Polsce, podobnie jak pozostałe zadania gospodarcze w nadleśnictwach wykonywane jest przez prywatne firmy – Zakłady Usług Leśnych (ZUL). Te prywatne podmioty gospodarcze zatrudniają pracowników, a także są właścicielami maszyn i urządzeń.

Sytuacja firm świadczących usługi dla polskiego leśnictwa jest zmienna i nadal trudna. Niestety od wielu lat nie prowadzi się żadnych badań dotyczących tych przedsiębiorstw. Badania takie prowadził w pierwszej dekadzie XXI wieku prof. Janusz Kocel. Ich wyniki opisał w wielu artykułach i obszernej publikacji pt. „Firmy leśne w Polsce” (Kocel, 2013). Informacje i analizy zawarte w tym dokumencie są bardzo cenne i dobrze charakteryzują stan sektora firm leśnych na przełomie pierwszej i drugiej dekady dwudziestego pierwszego wieku. Niestety badania te nie były kontynuowane, a informacje dotyczące przebiegu transformacji tego sektora i jego obecnego stanu są jedynie fragmentaryczne. Konieczne jest więc pilne podjęcie kompleksowych badań sektora firm leśnych w Polsce i określenie strategii ich rozwoju, zwłaszcza w kontekście zmian polityki PGL Lasy Państwowe oraz oczekiwań środowiskowych społeczeństwa.

Wyrównane informacje dotyczące sektora firm leśnych zamieszczane są na portalu FIRMYLEŚNE.PL (firmylesne.pl, 2023). Na przykład opisano sytuację w Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych (RDLP) w Szczecinie na podstawie informacji oraz ustaleń z posiedzenia komisji ds. współpracy RDLP w Szczecinie z Zakładami Usług Leśnych (ZUL).

W przypadku RDLP w Szczecinie, prace leśne (od prac hodowlanych po pozyskanie drewna) wykonywało w 2023 roku około 180 ZUL-i. Nie oznacza to jednak, że taka właśnie jest liczba przedsiębiorstw działających na terenie RDLP w Szczecinie. Część spośród nich korzysta bowiem z podwykonawstwa, część natomiast tworzy większe konsorcja. Najistotniejszą informacją pokazującą tendencję panującą w sektorze firm leśnych działających na terenie RDLP Szczecin jest to, że w latach 2019-2023 liczba firm zmniejszyła się o około 30% (z 260 w roku 2019 do 180 w roku 2023). Jak wspomniano, trudno dziś o dane obejmujące cały kraj. Można jednak podjąć próbę oszacowania liczby ZUL-i na podstawie przedstawionych danych i charakterystyki szczecińskiej RDLP. Zajmuje ona obszar charakteryzujący się jedną z największych lesistości w Polsce. Powierzchnie leśne są skupione w duże kompleksy. Takie cechy sprzyjają rozwojowi sektora usług leśnych. Duże pozyskanie skoncentrowane w dużych kompleksach leśnych dają możliwość wykorzystania nowoczesnych środków technicznych i uzyskania satysfakcjonującego przychodu. Z przeprowadzonych rozmów wynika, że w dyrekcjach o takich cechach, ZUL-e rozwijają się w podobnym kierunku. Maleje ich liczba, poprzez procesy łączenia i jednocześnie rośnie poziom wyposażenia technicznego. Niestety na obszarach o małej lesistości i dużym stopniu rozproszenia drzewostanów sytuacja jest trudniejsza. Rozdrobnienie i rozrzucenie powierzchni, na których wykonywane są prace leśne nie sprzyja rozwojowi firm usługowych. Przedsiębiorstwa nie osiągają na tyle dużego przychodu, aby mogły pozwolić sobie na unowocześnianie parku maszynowego. Nie zachęca do tego mała wielkość pojedynczych zadań i konieczność przemieszczania środków technicznych i pracowników – przejazdów lub przewozów dodatkowymi samochodami z przyczepami. Przemieszczanie maszyn to dla ZUL-i strata czasu i niepotrzebne zużycie paliwa (zanieczyszczenie środowiska naturalnego), ale także konieczność wykonania szeregu czynności dodatkowo absorbujących pracowników leśnych i zajmujących im czas. Należy bowiem pamiętać o konieczności organizacji bazy postoju maszyn, zapoznania się z nowym zadaniem, ukształtowaniem terenu, rodzajem pozyskiwanych sortymentów drzewnych itp. Wszystko to powoduje znaczne zmniejszenie wydajności, co z kolei pociąga za sobą wzrost kosztów. W skrajnych przypadkach może dojść do sytuacji, kiedy około 50% dziennego czasu pracy zajmuje transport maszyn i czynności towarzyszące (Nurek, 2007).

Analizując stan sektora firm leśnych i czekające ten sektor zmiany, należy wziąć pod uwagę specyfikę poszczególnych regionalnych dyrekcji. Dla uproszczenia można wyróżnić dwie grupy: o dużej lesistości i dużym pozyskaniu surowca drzewnego (dyrekcje zachodniej i północnej Polski: np.: szczecińska, szczecinecka, pilska, zielonogórska, olsztyńska, białostocka) oraz te, na powierzchni których jest mniej drzewostanów, są one rozproszone, a produkcja drewna jest stosunkowo niewielka (np. warszawska, łódzka, radomska, lubelska).

W przypadku tych pierwszych sytuacja jest zbliżona do tej panującej w dyrekcji szczecińskiej. Tam należy oczekiwać zmniejszania liczby zakładów usług leśnych i jednocześnie zwiększania zatrudnienia, a także poprawy wyposażenia technicznego – zwiększania liczby nowoczesnych maszyn pozyskaniowych i transportowych. Firmy leśne zlokalizowane w zachodnich dyrekcjach lasów państwowych przystępują niejednokrotnie do przetargów organizowanych przez zarządców lasów w Niemczech. To źródło dochodu daje przedsiębiorcy dodatkowe (bardzo istotne) możliwości rozwoju, zarówno jeśli chodzi o zwiększanie liczby zatrudnionych jak i rozwój parku maszynowego. Zdobycie kontraktu za granicą świadczy także o poziomie technicznym i kompetencyjnym tych firm leśnych. Istotną cechą firm uzyskujących kontrakty zagraniczne jest bardzo wysoki poziom respektowania zasad bezpieczeństwa i higieny pracy. Wielkość zatrudnienia w ZUL-ach działających w korzystnych warunkach przyrodniczo leśnych, dochodzi niejednokrotnie do kilkudziesięciu osób (50 osób). Firmy te powstały poprzez łączenie się mniejszych podmiotów i zatrudnianie dodatkowych pracowników. Jak wspomniano, takiej sytuacji sprzyja wielkość zadań gospodarczych w rejonie działania oraz możliwość inwestowania w sprzęt. Dzięki różnorodności wyposażenia i jego wielkości, firmy stają się coraz bardziej mobilne, co również sprzyja ich dalszemu rozwojowi. Istotne jest także to, że w przypadku dużych przedsiębiorstw leśnych zarówno dla ich kierownictwa jak i pracowników są one jedynym i podstawowym miejscem pracy.

Inna sytuacja ma miejsce w dyrekcjach o mniejszej produkcji i rozproszonych drzewostanach. Tam bardzo często liczba ZUL-i obsługujących dane nadleśnictwo odpowiada liczbie leśnictw, których to liczba często wynika z lokalizacji kompleksów leśnych. W tym przypadku liczba zakładów nie ulega zmianie ze względów społecznych oraz logistycznych. Utrzymywana jest sytuacja, w której jeden ZUL obsługuje jedno leśnictwo w zakresie wszystkich zadań gospodarczych. Te zakłady są zwykle gorzej wyposażone, co wynika z mniejszego zakresu (wielkości) zadań i mniejszych możliwości wygenerowania zysku na poziomie umożliwiającym zakup i opłacalną eksploatację nowoczesnych maszyn. Wielkość zatrudnienia w zakładach usług leśnych funkcjonujących w tych „trudniejszych” warunkach waha się od kilku do kilkunastu osób (nie wliczając w to osób pracujących w tak zwanej szarej strefie). Zakłady te nie mają też tendencji do konsolidacji (łączenia się). Jak wspomniano działają bowiem na niewielkim obszarze w nadleśnictwach (np. jedno leśnictwo), w których często od wielu lat utrzymywane jest swoiste *status quo* podziału zadań gospodarczych. Istotną cechą przedsiębiorstw leśnych funkcjonujących na terenie nadleśnictw o małym pozyskaniu drewna jest charakter zatrudnienia pracowników. Są to często osoby, dla których praca w ZUL jest dodatkowym zajęciem (podstawowym jest gospodarstwo rolne). Taki stan nie sprzyja rozwojowi firm i chęci inwestowania ze strony ich właścicieli. Należy w tym miejscu wspomnieć także o odchodzeniu wielu pracowników do lepiej płatnej, łatwiejszej pracy w budownictwie lub drogownictwie. Jest to zjawisko szczególnie silne w regionach sąsiadujących z dużymi ośrodkami miejskimi.



Bardzo poważnymi problemami, które w coraz większym stopniu dają się we znaki wykonawcom prac leśnych jest więc brak pracowników oraz ich słabe przygotowanie do wykonywania zadań. Ograniczony dostęp do wykwalifikowanej kadry pracowniczej w sektorze usług leśnych oraz rotacja kadry stanowią istotne problemy dla przedsiębiorców leśnych. Spowodowane jest to niską płacą, trudnymi i niebezpiecznymi warunkami pracy, niejednokrotnie wymagającymi znacznego wysiłku fizycznego oraz brakiem perspektyw na przyszłość (Szewczyk, 2021). W polskich lasach pozyskiwanie drewna prowadzone jest głównie na poziomie ręczno-maszynowym, a podstawowym urządzeniem drwala służącym do ścinki drzew, okrzesywania i przerzynki drewna jest pilarka spalinowa. Prace te należą do grupy wysokiego ryzyka (Blombäck i in., 2003). Jak podają dane (Google, 2024), w latach 2018-2024 podczas prac leśnych wydarzyło się 257 wypadków, z tego 153 śmiertelne. Znaczna część tych wypadków dotyczyła pozyskiwania drewna przy pomocy pilarek spalinowych.

Drwal, zanim zostanie zatrudniony w lesie, musi ukończyć odpowiednie szkolenie i uzyskać uprawnienia operatora pilarek spalinowych (Serwański, 2010). Przepisy większości krajów europejskich nakładają na pracodawców obowiązek zapewnienia każdej osobie odpowiedniego przeszkolenia w zakresie obsługi narzędzi i maszyn (Medved, 1998). Zdobyta na szkoleniach wiedza i umiejętności są potwierdzane odpowiednim certyfikatem (Martinić i in., 2011). W Unii Europejskiej został opracowany i częściowo wdrożony minimalny standard dotyczący wykonywania zawodu drwala w ramach *European Certification Standard (ECS)*. Opracowany standard nie jest prawnie wiążący zawierając wiedzę uznawaną za „najlepsze praktyki” profesjonalnego użytkownika pilarek łańcuchowych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektu bezpieczeństwa pracy.



Rys. 2.6. Szkolenie operatorów maszyn leśnych na symulatorze harwestera (ZSL w Lesku, 2021).

W Polsce, organizatorami kursów i szkoleń dla drwali są różnego rodzaju instytucje, np. wyższe uczelnie, fundacje gospodarcze, placówki edukacyjne i inne podmioty gospodarcze. Nie zawsze zakres szkolenia spełnia standardy wyznaczone przez Dyrektora Generalnego

Lasów Państwowych (DGLP, 2012). Nie wszystkim organizatorom szkoleń zależy też na jakości przekazywanej wiedzy, nie tylko teoretycznej, ale również praktycznej. Na podstawie wyników badań ankietowych dotyczących szkoleń pilarzy (Gendek i in., 2018a), najbardziej popularną formą szkolenia był kurs trwający około 2 tygodni. Kursy takie ukończyło 86% badanych pilarzy. Siedem procent spośród ankietowanych pilarzy ukończyło kurs trwający zaledwie 2–3 dni. Domyślać się można, że zasób wiedzy przekazany na takim kursie był mocno okrojony, a czas niewystarczający do przekazania istotnych zagadnień z zakresu BHP lub techniki ścinania drzew. Z kolei 4% respondentów wskazało na kurs trwający 4 tygodnie (około 18 dni), a 3% wskazało na inny okres szkolenia.

Obecnie w naszym kraju w jednoznaczny sposób są określone wymagania, jakie powinien spełniać operator maszyn typu harwester i forwarder. Są to posiadanie aktualnego badania lekarskiego, zezwalającego na pracę tego typu maszynami, zdanie egzaminu przed komisją Urzędu Dozoru Technicznego, uprawniającego do obsługi maszyn wyposażonych w żurawie, posiadanie ważnego prawa jazdy kategorii – „B”, ukończenie szkolenia z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy oraz odbycie szkolenia i zdobycie kwalifikacji uprawniających do obsługi maszyn typu harwester lub forwarder. Najwięcej wątpliwości budzi wymaganie mówiące o odbytym szkoleniu i zdobytych kwalifikacjach. Żaden dokument prawny nie normalizuje treści merytorycznej i zakresu takiego szkolenia (Marciniak, 2011). Kurs operatora harwestera i forwardera (wraz z egzaminem UDT) obejmuje często ok. 100 godzin szkolenia, w tym 15 godzin indywidualnej praktyki na harwesterze lub forwarderze (30 godzin na obydwóch maszynach) (FCC, 2022).

## 2.6. Koncentracja zadań pozyskaniowych, alokacja sprzętu

Wydajność maszyn stosowanych do pozyskania drewna, szczególnie maszyn wielooperacyjnych zależy w bardzo dużym stopniu od organizacji ich pracy. Największe znaczenie ma udział efektywnego czasu pracy (czasu pozyskiwania drewna) w czasie zmiany roboczej. Jednym z działań organizacyjnych mogących przyczynić się do poprawy tej sytuacji jest koncentracja zadań gospodarczych.

Koncentracja zadań gospodarczych na jak najmniejszej powierzchni nadleśnictw może doprowadzić do znacznych oszczędności czasu, wzrostu wydajności eksploatacyjnej maszyn i w efekcie do obniżenia kosztów jednostkowych ich pracy. Negatywnym skutkiem może być natomiast odbiór społeczny takiej kumulacji prac związany z teoriami o „nadmiernym eksploataowaniu” lasu.

Jak wspomniano istotnym problemem, charakterystycznym dla pozyskania drewna w Polsce, jest konieczność przemieszczania ludzi i sprzętu. Wynika ona z rozdrobnienia kompleksów leśnych, ale także z przyjętych zasad użytkowania lasu. Lasy w Polsce zlokalizowane są w ponad 57 tysiącach kompleksów leśnych. Pokazują to dane zebrane w tabeli 2.4. Wynika z nich, że około 90% kompleksów to takie, których powierzchnia nie przekracza 100 ha. Jedynie 0,22% to kompleksy bardzo duże, o powierzchni przekraczającej 10 000 ha. Fakt preferowania w polskich lasach rębni o małych powierzchniach (np. rębni gniazdowej) oznacza, że specjalistyczne maszyny muszą być często przemieszczane na znaczne odległości.

Tabela 2.4. Powierzchniowa i ilościowa struktura kompleksów leśnych (Nurek, 2007).

Zakres powierzchni kompleksów, ha	Sumaryczna powierzchnia kompleksów, (ha)	Struktura powierzchniowa, (%)	Liczba kompleksów, (szt.)	Struktura ilościowa, (%)	Skumulowana struktura ilościowa, (%)
0-1,0	7 379,94	0,10	17 249	29,84	29,84
1,1-10,0	85 248,40	1,16	22 892	39,61	69,45
10,1-100,0	392 826,46	5,35	11 866	20,53	89,98
100,1-1000,0	1 401 458,01	19,08	4 484	7,76	97,74
1 000,0-10 000,0	3 608 640,23	49,13	1 177	2,04	99,78
ponad 10 000,0	1 849 107,35	25,18	130	0,22	100,00
Razem	7 344 660,39	100,00	57 798	100,00	-

Niezależnie od tego czy transport odbywa się z wykorzystaniem dodatkowych pojazdów z przyczepami czy też maszyny same przemieszczają się na nową powierzchnię leśną, zawsze generowane są koszty (straty) związane ze zużyciem paliwa i przede wszystkim z amortyzacją maszyn. Działaniem mogącym zapobiec generowaniu tych kosztów jest koncentracja zadań związanych z pozyskaniem drewna na mniejszych powierzchniach. Nadleśnictwa mają możliwość określania terminu realizacji konkretnych zadań w ramach 10-letniego planu urządzania lasu. Korzystne jest takie wyznaczenie powierzchni do pozyskania w roku gospodarczym, aby znajdowały się one blisko siebie. Ogranicz się wtedy konieczność przemieszczania maszyn. Takie rozwiązanie jest już stosowane w wielu nadleśnictwach. Z takim podejściem wiąże się jednak niedogodność natury społecznej. Koncentracja powoduje bowiem, że nagle w krótkim czasie „znika” wiele powierzchni leśnych ze stosunkowo niewielkiego obszaru, a drewno masowo „wyjeżdża” z lasu. Opinie wynikające z niskiej świadomości społeczeństwa sprawiają, że środowiska „ekologiczne” otwarcie krytykują taki sposób gospodarowania zasobami drzewnymi kraju. Z tych powodów wielu zarządzających lasami nie decyduje się na grupowanie prac pozyskaniowych.

Dodatkowo w ostatnim czasie wprowadzane są nowe kategorie lasów takie jak lasy społeczne i lasy puszczańskie o zwiększonej funkcji ochronnej i ograniczonej funkcji gospodarczej (DGLP, 2022). Pojawiają się informacje o naciskach środowisk ekologicznych na dalsze ograniczanie powierzchni pozyskania drewna i rezygnacji z cięć na „większych” powierzchniach (rębnia I), a nawet z cięć gniazdowych (rębnia III). Pojawiają się informacje o konieczności stosowania rębni przerębrowej na obszarach lasów o znaczeniu ochronnym czy ważnym turystycznie. Szanując te działania należy jednak pamiętać o kosztach takiego systemu pozyskania drewna oraz możliwościach mechanizacji tego procesu. Takie podejście może spowodować cofnięcie się do technologii pozyskiwania drewna pilarkami spalinowymi i transportu surowca prymitywnymi środkami technicznymi. Oprócz tych efektów należy się spodziewać zwiększenia negatywnego oddziaływania tych technologii na środowisko oraz znacznego pogorszenia warunków bezpieczeństwa przy pozyskiwaniu drewna.

## 2.7. Zasady wyboru wykonawców prac leśnych

Możliwość przeprowadzenia omówionej powyżej koncentracji prac wynika między innymi ze sposobu wyłaniania ich wykonawców. Kwestia zakresu pakietów prac, ich lokalizacji czy też wskazanie możliwego okresu ich realizacji determinuje w dużym stopniu możliwość przesuwania terminu realizacji zadań przez ZUL. Zgodnie z zasadami przyjętymi w Unii Europejskiej dostęp do rynku usług leśnych jest otwarty. Oznacza to, że każda osoba prawna (ZUL) może starać się o uzyskanie zlecenia na wykonanie prac na terenach administrowanych przez PGL LP. W celu udzielania zamówień publicznych zobowiązane jest ono do stosowania ustawy Prawo Zamówień Publicznych (PZP) (Dz.U. 2021 poz. 1129, 2021). Zawieranie umów następuje w jednym z trybów udzielania zamówień określonych w PZP, przy czym priorytetem jest stosowanie przetargu nieograniczonego.

Do wykształcenia jednolitych zasad udzielania zamówień publicznych w jednostkach organizacyjnych Lasów Państwowych, w tym wykonania opisu przedmiotu zamówienia przygotowano wzór Specyfikacji Warunków Zamówienia (SWZ) oraz opis standardu technologii wykonawstwa prac leśnych. Dokumentacja ta opiera się na zasadzie prowadzenia postępowania w sposób gwarantujący zachowanie uczciwej konkurencji oraz na założeniu pełnej transparentności postępowania o udzielenie zamówienia publicznego.

Zgodnie z wytycznymi, przygotowując specyfikację do zamówienia należy uwzględnić takie elementy jak:

- planowany rozmiar prac,
- szczegółowy rozmiar prac według grup czynności i lokalizacji,
- charakterystykę leśnictwa w zakresie pozyskania drewna,
- układ sortymentowy pozyskania drewna w leśnictwie,
- zestawienie odległości i warunków zrywki drewna,
- zestawienie pozycji z dodatkowymi utrudnieniami w zakresie pozyskania i zrywki,
- zestawienie pozycji nieudostępnych dla pozyskania maszynowego,
- informację o optymalnej technologii pozyskania drewna (tzw. potencjał),
- informację o charakterze pielęgnacji lasu (strefy dla wykaszania chwastów).

Informacje te determinują sposobie realizacji zadań oraz rodzaj wykorzystywanych maszyn. Stanowią one opis warunków, w jakich zwycięska firma uzyska zlecenie i będzie realizować prace. Warunki te wpływają na ustalenie ceny za wykonanie zadania.

Specyfikacja Warunków Zamówienia powinna zawierać również opis standardu technologii wykonawstwa prac leśnych. Opisanie tego standardu jest warunkiem dopuszczalności zastosowania kryterium ceny jako jedynego kryterium oceny ofert. Może jednocześnie stanowić podstawę do przeprowadzenia symulacji procesu pozyskiwania drewna na terenie nadleśnictwa. Zamawiający, PGL LP, może zastosować kryterium ceny jako jedyne kryterium oceny ofert albo jako kryterium o wadze przekraczającej 60%. Możliwe jest to jednak w przypadku, gdy w opisie przedmiotu zamówienia określone zostaną wymagania jakościowe odnoszące się przynajmniej do głównych elementów przedmiotu zamówienia.

PGL LP przygotowały wzory SWZ dla przedmiotu zamówienia obejmujące prace z zakresu zagospodarowania lasu (w tym ochrony i hodowli lasu) oraz pozyskania i zrywki

drewna. Wzory te przygotowane dla zamówienia udzielanego na 1 rok, mogą zostać adaptowane do wykorzystania na potrzeby zamówień wieloletnich.

Najistotniejszą częścią SWZ jest opis przedmiotu zamówienia (OPZ), który opiera się na dokumencie „Opis standardu technologii wykonawstwa prac” przyjętego decyzją DGLP oraz na opisach standardów w danej RDLP przyjętych przez Dyrektora RDLP. Opis przedmiotu zamówienia zakłada przeprowadzenie postępowania ze składaniem ofert częściowych i podziałem zamówienia na części, tzw. pakiety. Podział przedmiotu zamówienia na pakiety powinien uwzględniać dywersyfikację ryzyka związanego ze zlecaniem usług z zakresu gospodarki leśnej. Należy brać pod uwagę łączenie w ramach pakietu powierzchni atrakcyjnych dla wykonawstwa, jak i następujących trudności w trakcie realizacji usługi. W tego typu przypadkach możliwe jest stosowanie w ramach jednego pakietu odrębnych kosztorysów ofertowych dla poszczególnych leśnictw celem umożliwienia wykonawcom zróżnicowania wyceny usług. Rekomendowane jest grupowanie w ramach pakietów jednostek administracyjnych sąsiadujących geograficznie, tak aby móc stworzyć wykonawcom stosowne fronty prac i ograniczyć zbędne koszty przemieszczania sprzętu i personelu wykonawcy. W obecnych warunkach przy zwiększaniu maszynowego pozyskiwania drewna, w ramach opisów przedmiotu zamówienia dopuszcza się i wyodrębnia się również tzw. pakiety harwesterowe, co stosowane jest już w niektórych RDLP.

W SWZ przewiduje się warunek udziału w postępowaniu odnoszący się do sytuacji finansowej wykonawców, który jest w wielu przypadkach problematyczny dla ZUL-i. Określona jest wysokość środków finansowych (lub zdolności kredytowej) na poziomie 5 -15 % wartości danego pakietu. Wartość tej kwoty jest określana na poziomie wydatków, jakie wykonawca musi ponieść na realizację zamówienia w pierwszych dwóch miesiącach realizacji umowy, w których pokrywa koszty wykonywania prac z własnych zasobów.

Określając zdolność techniczną lub zawodową w zakresie osób skierowanych przez wykonawcę do realizacji zamówienia, wskazane są przykładowe wymagania dotyczące kwalifikacji personelu, które powinny być dostosowane do potrzeb wynikających z opisu przedmiotu zamówienia. Przykładowo, w treści warunku udziału w postępowaniu konieczności dysponowania pilarczami, musi być to powiązane z wymaganą technologią pozyskania przy założeniu, że jeden pilarz powinien przypadać na każde rozpoczęte 2 500 – 3 000 m<sup>3</sup> drewna, z zastrzeżeniem, że w nadleśnictwach górskich wielkość ta może być zmniejszona poniżej 2 000 m<sup>3</sup> drewna.

Podobne warunki dotyczą również przypadków dysponowania maszynami wielooperacyjnymi. Przyjmuje się, że zleceniobiorca musi dysponować taką maszyną dla pozyskania 25 000 m<sup>3</sup> drewna, a jeden ciągnik zrywkowy lub ciągnik przystosowany do zrywki drewna powinien przypadać na 15 000 m<sup>3</sup> drewna z zastrzeżeniem, że w nadleśnictwach górskich wielkość ta może być zmniejszona do 10 000 m<sup>3</sup> drewna.

## 2.8. Pomiar surowca drzewnego

Ważnym i czasochłonnym elementem łańcucha dostaw w leśnictwie jest też pomiar drewna. Jest to ważnym proces w łańcuchu dostaw drewna, który wymaga zaawansowanych, sprawnie działających rozwiązań (Borz i in., 2022), w tym nowoczesnych rozwiązań opartych o urządzenia cyfrowe, sztuczną inteligencję i automatyczne algorytmy obliczeniowe.

Określanie miąższości drewna w Polsce wykonywane jest dotychczas w sposób tradycyjny (PN-D-95000, 2002; Suwała, 2000). W przypadku drewna wielkowymiarowego wykorzystywane są średnicomierz oraz taśma miernicza. W przypadku drewna stosowego zaś, za pomocą taśmy mierniczej, należy określić długość, wysokość i szerokości stosu, a następnie wykonać odpowiednie obliczenia. Wykonanie niezbędnych pomiarów, przeprowadzonych przez administrację leśną wymaga długiego okresu. Zdecydowanie najwięcej czasu potrzeba na wykonanie pomiaru drewna stosowego metodą tradycyjną, nieco ponad 0,19 min/m<sup>3</sup>. Na podstawie swoich badań (Grzywiński i in., 2019) wykazali, że w strukturze dziennej czasu pracy leśniczego odbiór drewna zajmuje 9%, a podleśniczego 16%.

Dlatego też istotnym wyzwaniem dla administracji leśnej jest wydajny pomiar i ewidencja pozyskanego surowca drzewnego (Moskalik, 2024). Czas wykonania pomiaru z wykorzystaniem różnych metod fotooptycznych jest znacznie mniejszy od podanego powyżej uzyskanego metodami tradycyjnymi. Według różnych autorów wyniósł on odpowiednio 0,12 min/m<sup>3</sup> (FOVEA), 0,09 min/m<sup>3</sup> (AFoRS) i 0,04 min/m<sup>3</sup> (sScale) (Jodłowski i in., 2016). Główne zalety metod fotooptycznych to większa dokładność pomiaru, szybkość jego wykonania w stosunku do rozwiązań tradycyjnych, łatwiejsza dokumentacja, możliwość rejestracji zapasów, łatwy raport statystyczny. Wady natomiast związane są z wyższymi kosztami urządzeń oraz potrzebą obsługi przez odpowiednio wyszkolone osoby (Pászatory i Polgár, 2016). Do wad można zaliczyć również duży wpływ warunków atmosferycznych na precyzję pomiaru: śnieg znacznie utrudnia pomiary fotometryczne, a duży mróz uniemożliwia pracę aparatów mierzących.

Dla zmniejszenia obciążenia pracowników leśnych, poprawy komfortu pracy i usprawnienia leśnego łańcucha dostaw, możliwy jest także pomiar miąższości i odbiór drewna przy użyciu systemów komputerowych harwestera w czasie trwania operacji okrzesywania i przerzynki sortymentów. Głowice harwesterowe wyposażone są w systemy do pomiaru długości i średnicy drewna oraz do znanienia kolorami poszczególnych sortymentów. Harwestery automatyzują pomiar wymiarów kłód i późniejsze oszacowanie objętości (miąższości). Jeśli głowica jest prawidłowo skalibrowana i skonfigurowana, dane wyjściowe z jej systemu sterowania i przetwarzania informacji mogą być akceptowane jako dokładny szacunek ilości drewna pozyskanego przez tę maszynę. Z drugiej strony, dane wyjściowe z harwesterów mogą być obciążone błędami pomiaru wynikającymi np. z niewłaściwej kalibracji, stosowanymi metodami i procedurami przecinania (Marshall, 2005). Aby dane wyjściowe z harwesterów były uważane za wiarygodne w ewidencji leśnej, niezwykle ważna jest właściwa kalibracja głowic stosowana przez operatorów maszyn co najmniej raz w tygodniu.

Chociaż harwestery są w stanie mierzyć długości z dokładnością w centymetrach i średnice w milimetrach (Löwe i in., 2019; Sládek i Neruda, 2007), w polskim leśnictwie brakuje przepisów i normy, która regulowałaby akceptację tych pomiarów na potrzeby oficjalnych rejestrów. W Polsce został przyjęty i narzucony ręczny odbiór drewna, w którym każda sztuka powinna być dokładnie zmierzona przez leśniczego, a pomiary z głowic harwesterów mogą być obecnie wykorzystywane tylko przez operatora maszyny lub właściciela firmy do własnych rozliczeń lub do sprawdzenia zgodności z pomiarami leśniczego (Aniszewska i in. 2011).

Elektroniczne systemy pomiaru drewna są szczególnie przydatne przy pomiarach na dużą skalę. Obliczenia miąższości mogą być oparte o wyznaczony współczynnik zamienny właściwy dla danego rodzaju drewna i jego długości lub o określony dla danego kraju



współczynnik tablicowy odniesiony do gatunku i długości sortymentu. Błąd pomiaru z reguły nie przekracza  $\pm 2\%$ , w stosunku do pomiaru manualnego zgodnego z obowiązującymi normami (Cremer i in., 2020; Kärhä i in., 2019; Mederski i in., 2021, 2024; Stańczykiewicz i in., 2021).

Dla drewna wielkowymiarowego, podlegającego dalszej obróbce w tartakach, ogólne informacje na temat parametrów geometrycznych danej dłużycy lub kłody (jej długości, średnicy górnej, dolnej i środkowej, kształtu i objętości) można uzyskać za pomocą bezkontaktowych optycznych technik pomiarowych (Siekański i in., 2019). Do pomiaru kłód drewna wykorzystuje się najczęściej skanery laserowe, które zapewniają zadowalającą dokładność i szybkość skanowania (Janák, 2007).

Dokładność określenia objętości drewna ma podstawowe znaczenie przy planowaniu i rozliczaniu poszczególnych procesów związanych z obrotem surowca drzewnego. Jest jednocześnie podstawą określenia maksymalnego pojedynczego ładunku drewna pozwalającego na wykorzystanie dopuszczalnej całkowitej masy zestawu wywozowego (Brown, 2021; Moskalik i in., 2022; Trzeciński i in., 2018). Wprowadzenie do praktyki leśnej zautomatyzowanego pomiaru drewna może mieć duże znaczenia dla funkcjonowania leśnego łańcucha dostaw. Z jednej strony oczekiwać można przyspieszenia tego procesu, a co się z tym wiąże udrożnienia przepływu ładunków, a z drugiej zautomatyzowania procesu przekazywania informacji o wytworzonym sortymencie drzewnym. Ułatwi to proces wyboru odbiorców drewna i organizacji jego wywozu, a także przyczyni się do lepszego śledzenia surowca w łańcuchu dostaw.

## Podsumowanie rozdziału 2

Pozyskanie drewna jest elementem gospodarki leśnej w największym stopniu oddziałującym na środowisko naturalne. Wynika to z liczby i rodzaju sprzętu mechanicznego wykorzystywanego w tym procesie. Oddziaływanie to wyraża się poprzez emisję do atmosfery szkodliwych substancji (spaliny), emisję hałasu a także bezpośredni fizyczny wpływ na elementy środowiska naturalnego takie jak gleba (deformacja, zagęszczenie), pozostająca roślinność (uszkodzenie, zniszczenie). Szczególnie emisja spalin oraz fizyczne zniszczenia środowiska przyczyniają się do obserwowanych od wielu lat zmian klimatycznych.

Odpowiednia organizacja procesu pozyskania może doprowadzić do zminimalizowania tego wpływu. Mówiąc o organizacji należy rozumieć zarówno etap ścinki i wywozu drewna z powierzchni leśnych, jak i wszelkie mechanizmy i struktury w jakikolwiek sposób związane z procesem głównym. Już sam proces zawierania umów na sprzedaż drewna determinuje odległość i sposób jego transportu. Podobnie wybór miejsca pozyskania drewna (sprzedawanego surowca drzewnego) może mieć istotny wpływ na „efekt środowiskowy” całego łańcucha dostaw. Rozproszenie tych miejsc wymusza stosowanie dodatkowego przewozu, co z kolei generuje dodatkowe koszty środowiskowe. W wielu nadleśnictwach plan pozyskania na dany rok gospodarczy uwzględnia tak zwaną koncentrację prac, czego efektem jest zmniejszenie odległości pomiędzy kolejnymi lokalizacjami surowca gotowego do wywiezienia. Taka koncentracja musi przebiegać zgodnie z zasadami użytkowania lasu oraz zapisami dziesięcioletniego PUL.

Koncentracja prac może oznaczać także zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko ze strony operacji realizowanych przez firmy pozyskujące i zrywające drewno. Wynikać to może z ograniczenia nieproduktywnych przejazdów maszyn pomiędzy kolejnymi powierzchniami leśnymi, a także z możliwości lepszego wykorzystania maszyn wielooperacyjnych charakteryzujących się dużą wydajnością i jednocześnie mniejszym negatywnym oddziaływaniem na środowisko. Istotna staje się więc także struktura i wyposażenie zakładów usług leśnych. Firmy większe, o lepszym wyposażeniu są korzystniejsze z punktu widzenia ich wpływu na środowisko, przeliczając obciążenie środowiska na jeden metr przestrzenny pozyskanego (zerwanego) drewna.

Mówiąc o efekcie środowiskowym prac pozyskaniowych (leśnego łańcucha dostaw) należy wspomnieć o strukturze sektora firm leśnych i prowadzonej przez PGL LP polityce kształtującej tę strukturę. Przyjęte przez administrację PGL LP zasady zawierania umów na wykonanie prac nie sprzyjają zwiększeniu zatrudnienia i inwestowaniu w nowoczesny sprzęt przez firmy leśne. Tymi barierami może być okres na jaki zawierana jest umowa z ZUL-em oraz wielkość pojedynczego zadania.

Ostatnie lata wskazują, że coraz większa liczba nadleśnictw podejmując decyzje dotyczące organizacji procesu sprzedaży drewna, jego pozyskania i transportu kieruje się omówionymi powyżej aspektami. Są to jednak działania intuicyjne wynikające z doświadczenia pracowników administracji PGL LP oraz kierownictwa ZUL-i. Korzystne byłoby opracowanie narzędzia, które wskazywałoby na możliwe rozwiązania organizacyjne oraz na efekty ekonomiczne i środowiskowe ich zastosowania.



### 3. TRANSPORT SUROWCA DRZEWNEGO

W typowych realiach produkcyjnych (ekonomicznych) zasoby (w analizowanym przypadku zasoby surowca drzewnego) oraz odbiorcy tych zasobów (odbiorcy zużywający drewno na potrzeby własne oraz różnego rodzaju zakłady zajmujące się przerobem drewna) są rozproszeni geograficznie. Zadaniem menedżerów zatrudnionych w administracji leśnej, w prywatnych zakładach usług leśnych i wśród podmiotów kupujących drewno, jest takie zorganizowanie procesu, które zapewni przestrzenno-czasowe zbilansowanie podaży i popytu. Pozyskany surowiec drzewny musi dotrzeć do odbiorcy w odpowiednim czasie, w wcześniej uzgodnione miejsce, w ilości zgodnej z zamówieniem oraz uzgodnionych parametrach wymiarowo-jakościowych.

Ważną rolę we właściwym funkcjonowaniu każdego systemu gospodarczego odgrywa transport. Transport drewna stanowi integralną część składową produkcji leśnej, a jego szczególna rola wypływa z przestrzennego charakteru gospodarstwa leśnego. Transport leśny w zasadniczy sposób różni się od transportu obsługującego inne działy gospodarki narodowej. Różnice te przejawiają się między innymi w sezonowości działalności gospodarczej, przeważającej jednokierunkowości przewozów, różnej podatności przewozowej ładunków, różnorodności warunków drogowych oraz atmosferycznych (Kubiak, 1998). Sukces przedsiębiorstwa specjalizującego się w transporcie drewna nie zależy wyłącznie od niego, a od współpracy wszystkich podmiotów związanych z łańcuchem dostaw z nim współpracujących, takich jak PGL Lasy Państwowe przygotowujące surowiec, podwykonawcy, jednostki z grupy przewozów kolejowych biorące udział w spedycji oraz pracownicy współdziałający (Devin, 2014; Sieniawski, 2012).

Wybór gałęzi transportu drewna i przewoźnika należą do strategicznych decyzji podejmowanych przez osoby zajmujące się zagadnieniami logistycznymi. Pod uwagę muszą zostać wzięte zarówno zrywka drewna jak i usytuowanie składnicy przyrębowej w sąsiedztwie drogi wywozowej. Wybór ten przeprowadzany jest obecnie w Lasach Państwowych głównie przez ZUL-e. Niemniej jednak administracja PGL LP może przy zawieraniu umów wpływać na to jakich środków technicznych należy używać (ciągnik rolniczy z wyposażeniem specjalistycznym, specjalistyczny ciągnik leśny - skider lub forwarder), aby potencjalne szkody powstałe w środowisku leśnym były jak najmniejsze (Moskalik, 2006). Powinny być to środki wysoce wyspecjalizowane, dostosowane do konkretnych warunków drzewostanowych.

#### 3.1. Wywóz drewna

##### 3.1.1. Transport samochodowy

Wywóz drewna realizowany jest w Polsce w 90% taborem kołowym (Moskalik, 2006), przede wszystkim 5- i 6-osioowymi samochodami wysokotonażowymi. Do załadunku i rozładunku pojazdów najczęściej stosowane są żurawie hydrauliczne, montowane na stałe na samochodach przewozowych (Marciniak i Szkoda, 2013). Samochód transportujący powinien być wyposażony w przednią ścianę spełniającą przedmiotową normę (*PN-EN 12642:2017*, 2017), a ładunek nie powinien być wyższy od tej ściany. Podczas mocowania

każda sekcja ładunku powinna być od góry przepasana odciągami, w liczbie co najmniej jednego, jeśli sekcję stanowi drewno z korą nie dłuższe niż 3,3 m, a co najmniej dwóch, jeśli sekcja ładunku jest dłuższa niż 3,3 m lub niezależnie od długości, jeśli drewno jest okorowane.

Badania nad sposobem transportu drewna okrągłego przemysłowego na duże odległości zostały przeprowadzone przez Kärhä z zespołem (2024b). Wykazano, że w wielu krajach przeważa transport drogowy. Tylko w Danii udział transportu drogowego stanowił mniej niż 50% całkowitego wolumenu drewna okrągłego. Z kolei udział transportu drogowego przekroczył 95% w Bośni i Hercegowinie, Kanadzie, Japonii, Nowej Zelandii, Stanach Zjednoczonych i Urugwaju. Ogółem, w analizowanych krajach, transport drogowy odpowiadał średnio za 87% masy przewożonego drewna.

Parametry i cechy eksploatacyjne pojazdów i maszyn stosowanych w transporcie drewna w Polsce zostały opisane w 2015 roku w monografii „Urządzenia techniczne w produkcji leśnej” (Zychowicz i Więsik, 2015). Autorzy przedstawili w niej również podstawowe zasady doboru parametrów pojazdu do rodzaju i wielkości przewożonego ładunku.

Efektywność użytkowania pojazdów do transportu drewna istotnie zależy od odległości, na którą wykonywany jest transport. Ta zależność nie jest wprost proporcjonalna do odległości. W przypadku przewozów na małe odległości, samochody poruszają się po drogach o gorszych parametrach geometrycznych i jakościowych, co zmniejsza osiągnięte prędkości jazdy i zwiększa opory ruchu, a tym samym jednostkowe zużycie paliwa (Zychowicz, 2001a).

W tabeli 3.1 zamieszczono parametry eksploatacyjne standardowych zestawów (ciągnik drogowy z wózkiem kłonicowym) stosowanych do wywozu drewna długiego na niewielkie odległości. Przedstawione wyniki potwierdzają znaczącą zmienność wskaźników efektywności samochodów transportujących drewno na niewielkie odległości z rozproszonych powierzchni zrębowych (miejsce załadunku surowca).

Wydajność pojazdów do transportu drewna zależy także od przebiegu prac ładunkowych (załadunek i rozładunek). Na przełomie 2004 i 2005 roku, na terenie północno – wschodniej Polski, przeprowadzono badania eksploatacyjne samochodu wywozowego MAN 26.463 wyposażonego w żuraw Loglift F 240 SL oraz przyczepę kłonicową bezrozworową Kramer 2848. Udział czasów załadunku i rozładunku w cyklu roboczym pojazdu wyniósł odpowiednio 23,8 i 9,8%, w sumie 33,6%. Właściwe dla samochodu wywozowego o takiej konstrukcji czasy wkładania na samochód i zdejmowania przyczepy stanowią odpowiednio 1,5 i 1,0% całego cyklu roboczego. Odpowiednie przygotowanie mygieł przy drogach wywozowych może spowodować wzrost wydajności samochodu do 7,79 m<sup>3</sup>/h (o 4,1%), a jednostkowej pracy transportowej do 508,8 m<sup>3</sup>·km/h. Zastosowanie u odbiorcy maszyn rozładunkowych o większej wydajności (ładowarki, suwnice, wywrotnice) może pozwolić na wzrost wydajności do 8,15 m<sup>3</sup>/h (o 8,9%) a jednostkowej pracy transportowej do 532,5 m<sup>3</sup>·km/h (Zychowicz i Szuchnik, 2006). Przedstawione wyniki wskazują, że w każdym przypadku około 50% czasu trwania procesu transportu drewna zajmują operacje inne niż jazda z i po ładunek. Świadczy to o uwadze jaką należy przykładać do procesu organizacji transportu: przygotowania, odpowiedniego zlokalizowania i wyposażenia miejsc załadunku i rozładunku wysokotonażowych samochodów wywozowych.

Tabela 3.1. Parametry eksploatacyjne pojazdów do wywozu drewna długiego (źródło: badania własne).

Wyszczególnienie	Man 24-362 Wywóz drewna liściastego		Man 24-362 Wywóz drewna iglastego		Mercedes ALG 2626 Wywóz drewna iglastego	
	średnia	maks. min.	średnia	maks. min.	średnia	maks. min.
Czas załadunku, $t_z$ , (min)	19,0	27,0 13,0	13,0	14,0 12,0	22,9	28,0 17,0
Czas jazdy z ładunkiem, $t_b$ , (min)	31,3	48,0 28,0	38,7	42,0 35,0	36,4	62,0 10,0
Czas jazdy powrotnej, $t_p$ , (min)	18,1	28,0 9,0	21,3	23,0 20,0	20,4	45,0 10,0
Czas rozładunku, $t_w$ , (min)	8,6	12,0 5,0	10,3	15,0 7,0	13,2	17,0 7,0
Czas jazdy pomiędzy mygłami, $t_g$ , (min)	2,1	10,0 0,0	8,3	9,0 7,0	3,4	8,0 0,0
Czas ustawiania przyczepy, $t_k$ , (min)	2,1	3,0 1,0	2,3	3,0 2,0	3,5	6,0 2,0
Całkowity czas cyklu, $t_c$ , (min)	81,2	108,0 49,0	94,0	99,0 87,0	99,8	138,0 56,0
Ilość jednorazowo zrywanego drewna, ( $m^3$ )	21,0	30,0 12,0	23,5	24,0 22,0	20,7	27,0 15,0
Odległość jazdy z ładunkiem, (km)	15,4	30,0 5,0	20,3	21,0 19,0	18,2	40,0 5,0
Odległość jazdy po ładunek, (km)	14,8	22,0 7,0	20,0	21,0 19,0	15,6	35,0 7,0
Prędkość jazdy z ładunkiem, (km/h)	29,5	38,7 17,7	31,5	36,0 29,2	30,0	38,7 24,0
Prędkość jazdy bez ładunku, (km/h)	49,0	66,0 41,5	56,3	57,1 54,8	45,9	51,4 41,1

Również w przypadku transportu biomasy leśnej w postaci zrębków lub balotów z powierzchni leśnej do odbiorcy wykorzystywane są odpowiednio przystosowane samochody. W przypadku transportowania balotów używane są samochody do transportu drewna okrągłego. Do zrębków używa się najczęściej ciągników siodłowych z naczepami lub samochodów ciężarowych z kontenerami. Analizując transport zrębków, w początkowych latach XXI wieku zakładano, że będzie on wykonywany na krótkie odległości do odbiorców lokalnych. Obecnie przy zwiększającym się zapotrzebowaniu na zrębki przez rozbudowanie zakładów energetycznych o kotły na biomasę, zwiększył się rejon dostaw i wzrosły odległości transportowe.

W wielu krajach europejskich drewno i zrębki przeznaczone na cele energetyczne przemieszczane jest przede wszystkim transportem samochodowym (Moskalik i Gendek, 2019), jednak w Finlandii (Tahvanainen i Anttila, 2011) czy Austrii (Wolfsmayr i in., 2015) istnieje i rozwija się transport drewna energetycznego na średnie i duże odległości z wykorzystaniem szlaków wodnych i kolejowych. W Polsce drogowy transport zrębków jest bardzo częstą praktyką. Jak pokazują wyniki dotychczasowych badań odległości przejazdu



dochodzą do ponad 300 km (Gendek i Nurek, 2016). Tak duże odległości transportu stawiają pod znakiem zapytania opłacalność wykorzystania zrębków na cele energetyczne zarówno pod kątem opłacalności ekonomicznej jak również pod kątem śladu węglowego i wpływu transportu na środowisko naturalne. Istotne staje się w takiej sytuacji przeprowadzenie analizy czynników wpływających na wartość biomasy dostarczonej do zakładu energetycznego oraz wskazanie możliwości poprawy efektywności ekonomicznej jej transportu i sprzedaży. Ekonomicznie uzasadniony i opłacalny jest transport zrębków z pozostałości zrębowych na odległość do 50-100 km (Goltsev i in., 2011; Sukhanov i in., 2013a, 2013b), zrębków wykonanych z drewna okrągłego na odległość do 150 km (Gerasimov i Karjalainen, 2013) i 100-200 km zrębków po rozdrobieniu drzew z upraw (Manzone i Balsari, 2015). W przypadku większych odległości (powyżej 145 km) zalecane jest stosowanie transportu kolejowego (Wolfsmayr i Rauch, 2014).

Jak wiele innych procesów technologicznych również transport drewna należy optymalizować. Optymalizacja ta powinna być realizowana poprzez redukcję liczby miejsc załadunku drewna na drogach leśnych. Według przeprowadzonych badań (Tymendorf i Trzciniński, 2020), w 36% analizowanych dostawach drewna z tego samego roku, drewno było ładowane z dwóch, a maksymalnie z ośmiu różnych miejsc, co wydłużało dystans na średniej jakości drogach leśnych o 1625 km. Zmniejszenie liczby miejsc ładunkowych do jednego ułatwiłoby również sam odbiór drewna, który jest zadaniem pracochłonnym. Dodatkowo zrywka drewna do jednego placu poprawiałaby bezpieczeństwo dostaw: przygotowane drewno w wielu miejscach może być niedostępne w związku ze stanem dróg w danych warunkach atmosferycznych.

### 3.1.2. Transport kolejowy

Transport kolejowy odgrywa kluczową rolę w efektywnym funkcjonowaniu rynku drzewnego, będąc istotnym ogniwem w łańcuchu dostaw tego surowca (Rogaczewski i in., 2017). Transport drewna, w zestawieniu Urzędu Transportu Kolejowego, jest zaliczony do 6-tej grupy towarowej w transporcie kolejowym. W komunikacji krajowej osiąga zaledwie 0,1 mld tkm, natomiast w przypadku przewozów międzynarodowych jest to wynik 0,5 mld tkm (Chojnacki i in., 2023).

Transport kolejowy jest efektywny przy masowych przewozach drewna na duże odległości (Gronalt i Rauch, 2018). Wymaga on od odbiorcy posiadania dodatkowej infrastruktury transportowej w postaci bocznic kolejowej. Tylko nieliczni nabywcy drewna na rynku polskim są potencjalnymi użytkownikami tego rodzaju transportu (Marciniec i Szkoda, 2013). Szacuje się, że obecnie wynosi on ok. 10% miąższości pozyskiwanego drewna. W przypadku odkrytego wagonu, ładunek musi być tak uformowany, aby nie wystawał poza skrajnię ładunkową. Do przewozów drewna surowego i nieobrobionego stosowane są różne wagony zależnie od długości poszczególnych kłód.

W dzisiejszym środowisku gospodarczym optymalizacja procesów transportu ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia efektywności oraz minimalizacji kosztów. W kontekście przewozów kolejowych, szczególnie na rynku drzewnym, ustalenie precyzyjnych założeń odgrywa kluczową rolę w projektowaniu i zarządzaniu siecią przewozową (Chojnacki i in., 2023).

### 3.2. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna pojazdów stosowanych do drogowego transportu drewna

Masa całkowita zestawu wywozowego jest określona przepisami dopuszczającymi poruszanie się pojazdów po drogach publicznych, które zostały wydane przez instytucje odpowiedzialne za transport i drogi publiczne, z jednoczesną możliwością ograniczenia dopuszczalnego obciążenia danej drogi. W Polsce dopuszczalną masę zestawu wywozowego określono w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury (Dz.U. 2022 poz. 2803, 2022). Dopuszczalna masa całkowita (DMC) pojazdu członowego mającego pięć lub sześć osi, składającego się z:

1. ciągnika siodłowego o dwóch osiach i naczepy o trzech osiach – nie może przekraczać 42 ton;
2. ciągnika siodłowego o trzech osiach i naczepy o dwóch lub trzech osiach – nie może przekraczać 44 ton.

Ten maksymalny ciężar ograniczony jest jednak warunkami: transport ten powinien być realizowany 3-osioowego ciągnikiem siodłowym oraz naczepami o 2 lub 3 osiach, na odległość mniejszą niż 100 km. Obecnie w warunkach polskich większość samochodów wywozowych charakteryzuje się DMC na poziomie 40 t (Moskalik i in., 2022). Dopuszczalna masa pojazdu transportowego jest istotnym ograniczeniem, które utrudnia zwiększenie efektywności transportu, natomiast wydaje się, że dopuszczalne wymiary geometryczne pojazdów, są w przypadku drewna mniej istotnym ograniczeniem.

W wielu krajach na świecie obserwuje się duże zróżnicowanie w zakresie maksymalnych limitów DMC przy transporcie drewna. Maksymalne DMC są silnie powiązane z liczbą zastosowanych osi: w przypadku 4-osiowych konfiguracji pojazdów dopuszczalna masa całkowita wynosi 36 ton. Ponadto przy 5, 6, 7, 8 i 9-ciu osiach DMC wynoszą odpowiednio 40, 44, 60, 68 i 74 tony (Kärhä i in., 2024b).

Od samego początku gospodarczego wykorzystywania towarowego transportu samochodowego zaznacza się silne dążenie do wzrostu efektywności operacji wykonywanych za jego pomocą. Ten wzrost ma się przede wszystkim przejawiać spadkiem wydatku zasobowego (paliwo/energia, czas, zaangażowani ludzie) niezbędnego do realizacji danego zadania przewozowego. Przykład takich zestawów stanowi szwedzko-fińska koncepcja High Capacity Transport (HCT), czyli transportu o dużej pojemności/zdolnościach przewozowych/przepustowości (rys. 3.1), w której do normalnego ruchu dopuszcza się ponadgabarytowe (prawnie nietraktowane za ponadgabarytowe) zestawy o długości 32 – 34 m i dopuszczalnej masie całkowitej od 72 - 74 t do nawet 104 t (Brach, 2024; Kärhä i in., 2023b; Palander i in., 2021; Venalainen, 2015).



Rys. 3.1. Samochód HCT (Scania Group, 2024).

Większe wartości DMC skutkują większą ładownością pojazdów: w przypadku konfiguracji 4-osiowych zestawów wywozowych ładowność drewna okrągłego wynosi około 20 – 24 ton. Przy zastosowaniu konfiguracji o 5, 6, 7, 8 i 9-ciu osiach ładowność drewna wynosi zazwyczaj odpowiednio 24–30, 24–37, 33–38, 43–47 i 47–51 ton. Ładunki o masie przekraczającej 45 ton mają miejsce w Argentynie, Australii, Brazylii, Kanadzie, Finlandii, Republice Południowej Afryki, Szwecji, Stanach Zjednoczonych Ameryki i Urugwaju (Kärhä i in., 2024b). Wykazano, że wyższe limity DMC oraz pojazdy transportowe o dużej pojemności (HCT) lub dłuższe, cięższe pojazdy (*Longer Heavier Vehicle* - LHV) w transporcie drewna zmniejszają całkowitą przebytą odległość i całkowitą liczbę wymaganych ładunków drewna, a także zużycie paliwa i emisję gazów cieplarnianych w odniesieniu do objętości dostarczonego drewna (Kärhä i in., 2023b; Liimatainen i in., 2020; Palander i in., 2021; Woodrooffe, 2016). Istnieją ambitne cele związane z przejściem na bardziej wydajne i zrównoważone systemy transportu w Europie. Na przykład w białej księdze dotyczącej transportu wyznaczono cel polegający na ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych z europejskiego sektora transportu o 60% do 2050 r. w porównaniu z 1990 r. i o około 20% do 2030 r. w porównaniu z poziomami emisji w 2008 r. (European Commission, 2011).

W celu uregulowania transportu drewna w Polsce wprowadzono zasadę określania masy ładunku drewna jako iloczynu jego objętości i normatywnej gęstości ustalonej dla danego gatunku drewna (Dz.U. 2012 poz. 536, 2012). W przypadku drewna sosnowego wielkość ta została określona na 740 kg/m<sup>3</sup>. W rzeczywistości jednak duża zmienność przewożonych sortymentów wyrabianych z różnych gatunków oraz zróżnicowana wilgotność drewna nie pozwalają na jednoznaczne określenie masy transportowanego surowca. Wpływa to bardzo często na nadmierne obciążenie masy zestawu wywozowego (Brown, 2008; Ghaffariyan i in., 2013; Owusu-Ababio i Schmitt, 2015; Sieniawski i Trzciniński, 2010; Trzciniński i in., 2017).

Badania przeprowadzone w warunkach polskich (Trzciniński i in., 2018; Trzciniński i Tymendorf, 2022), wykazały statystycznie istotne różnice masy całkowitej zestawów wywozowych oraz masy ładunków w poszczególnych porach roku. Masa całkowita pojazdów wahała się od 41,3 do 66,9 t. Masa dostarczanych ładunków drewna wyniosła natomiast 30,56 t, oscylując w przedziale od 29,93 t (jesienią) do 31,12 t (zimą). Stwierdzono jednocześnie, że rzeczywista masa całkowita pojazdów transportujących drewno jest o około 17% większa od masy obliczonej zgodnie z obowiązującymi przepisami transportu drogowego. Przeładowane pojazdy wywożące drewno stwarzają określone problemy związane z deformacją zarówno nawierzchni dróg jak i podłoża (Martin i in., 1999; Öztürk i Şentürk, 2009).

Zużycie paliwa i wiążąca się z nim emisja szkodliwych substancji do atmosfery jest najistotniejszym czynnikiem oddziaływania transportu na środowisko naturalne. Według badań, w warunkach polskich samochód wywożący drewno spala od 0,27 do 0,39 litra oleju napędowego na 1 km jazdy (Lijewski i in., 2017; Mydlarz i Wieruszewski, 2020). Wcześniejsze analizy Portera wykazały spalanie na poziomie około 0,45 litra oleju napędowego na 1 km jazdy (Porter, 2012).

Istotnym problemem jest także stan techniczny użytkowanych w Polsce środków transportu. Często są to pojazdy o znacznych przebiegach. Ten fakt, a także nie w każdym przypadku odpowiednie serwisowanie, może doprowadzać do szczególnie dużej emisji spalin. Wymagania, co do dopuszczalnego stanu technicznego są stale zaostrzane.

Przykładem są zmiany w normach emisji spalin, opisane w innej części niniejszego opracowania. Świadectwem tych zmian są liczne modyfikacje w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 26 czerwca 2012 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach (Dz.U. 2015 poz. 776; Dz.U. 2015 poz. 1076; Dz.U. 2016 poz. 1075; Dz.U. 2017 poz. 2089; Dz.U. 2019 poz. 1787; Dz.U. 2019 poz. 2466; Dz.U. 2022 poz. 2066; Dz.U. 2023 poz. 248). Jednak system kontroli nie jest szczelny, o czym świadczą dostępne informacje z Głównego Inspektoratu Transportu Drogowego.

Wdrażanie alternatywnych źródeł napędu samochodów ciężarowych, prowadzące do zmniejszenia emisji niepożądanych gazów spalinowych, a końcowym efekcie do zerowej emisji, prowadzi z reguły do zwiększenia masy własnej pojazdów. W prawie europejskim wprowadzane są zmiany, które umożliwiającą wdrażanie takich pojazdów z zachowaniem efektywności ich eksploatacji. Parlament Europejski zaakceptował poprawki do dyrektyw (Dzienniki UE, 2023) dotyczące obciążenia i wymiarów niektórych pojazdów drogowych. W zakresie odnoszącym się do drogowych samochodów ciężarowych istotne wydają się następujące ustalenia (Dornoff i Rodríguez, 2024):

Maksymalne dopuszczalne wymiary pojazdów:

- maksymalna długość - pojazd silnikowy inny niż autobus 12,00 m, przyczepa 12,00 m, pojazd przegubowy 16,50 m, pociąg drogowy 18,75 m.

Dopuszczalne masy całkowite pojazdów:

- pojazdy silnikowe dwuosiove z naczepami trzyosiowymi wykorzystywane w operacjach transportu intermodalnego - 44 t;
- w przypadku zespołów pojazdów, w tym pojazdów silnikowych napędzanych paliwem alternatywnym innych niż bezemisyjne pojazdy silnikowe, maksymalne dopuszczalne masy zwiększa się odpowiednio o dodatkową masę z racji technologii paliwa alternatywnego wynoszącą maksymalnie 1 tonę;
- w przypadku zespołów pojazdów, w tym bezemisyjnych pojazdów silnikowych, maksymalne dopuszczalne masy zwiększa się o 2 lub 4 tony, w zależności od szczegółowych parametrów pojazdu;
- w przypadku zespołów pojazdów, w tym przyczep lub naczep wyposażonych w technologie bezemisyjne, maksymalne dopuszczalne masy zwiększa się o 2 tony.

Jeżeli jeden zespół pojazdów może skorzystać z więcej niż jednej możliwości zwiększenia maksymalnej dopuszczalnej masy dla zespołów pojazdów określonych powyżej, zwiększenia te kumulują się.

Dodatkowym czynnikiem, który wprowadzi istotne zmiany w procesie transportu drewna, a dotyczy w pierwszej kolejności transportu drogowego są regulacje klimatyczne Unii Europejskiej. Od 2035 roku do użytkowania będą dopuszczane wyłącznie samochody (w tym ciężarowe) o zerowej emisji. Ich udział będzie się zwiększał już wcześniej w wyniku przyjętych założeń, że emisja ma się zmniejszyć o 45% w roku 2035 w odniesieniu do 2019 roku, 65% w roku 2035 i 90% w roku 2040. Mają to zapewnić sukcesywnie wprowadzane działania promujące użytkowanie pojazdów o zmniejszonej lub zerowej emisji. Jednym z nich jest rozporządzenie *Euro 7*, które ustanawia przepisy o emisjach spalin z pojazdów drogowych, ale też o innych rodzajach emisji wytwarzanych np. podczas ścierania opon i hamowania. Wprowadza również wymogi dotyczące trwałości akumulatorów (Dornoff i Rodríguez, 2024). W przypadku pojazdów ciężarowych norma *Euro 7* będzie obowiązywać

od 2029 roku dla nowo homologowanych pojazdów, a od 2030 roku będzie dotyczyć wszystkich pojazdów ciężarowych.

Wspomniane wyżej uwarunkowania, wynikające z woli ograniczenia wpływu procesów transportowych na środowisko, spowodowały opracowanie nowych pojazdów ciężarowych o zmniejszonej lub zerowej emisji. Wszystkie znaczące firmy produkujące samochody ciężarowe oferują pojazdy napędzane silnikami wewnętrznego spalania na paliwo gazowe. Zastosowanie tego typu silników zapewnia zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o kilkanaście do kilkudziesięciu procent, jednak jest to niewystarczające dla osiągnięcia złożonych celów klimatycznych.

Firma Scania ma w swojej ofercie produkcyjnej różnego rodzaju pojazdy do transportu drewna. Od tego roku oferowany jest także taki pojazd o napędzie elektrycznym. Te właśnie pojazdy już znalazły zastosowanie w transporcie drewna w największej szwedzkiej firmie leśno-drzewnej SCA. Podstawowe dane techniczne samochodów są następujące:

- dopuszczalna masa całkowita – 70 ton,
- konfiguracja jezdna – dwie lub trzy osie (z napędem 2 lub 4 kół),
- układ napędowy o mocy 210/240 kW lub 270/300/330/360/400 kW lub 400/450 kW,
- baterie – o pojemności 416 kWh lub 624 kWh zapewniające zasięg - do 520 km dla DMC 29 t, zasięg 440 km dla DMC 40 t i zasięg 320 km dla DMC 64 t.

W trakcie eksploatacji w warunkach transportu leśnego, zasięg pojazdów o dużej ładowności był nie mniejszy niż 200 km (Scania Group, 2024).

Z wykorzystaniem opisanych wyżej pojazdów jest obecnie realizowany projekt badawczy „*TREE - Transition to Efficient Electrified forestry transport*”, którego celem jest zapewnienie skutecznego przejścia na zelektryfikowany ciężki transport drogowy - do 2030 r. w leśnictwie szwedzkim 50% nowych samochodów ciężarowych powinno posiadać napęd elektryczny (Vinnova, 2024).

Kolejną wdrażaną alternatywą są pojazdy elektryczne zasilane z ogniw wodorowych. Największym producentem tego rodzaju samochodów jest firma Hyundai. Ponad 100 samochodów ciężarowych zasilanych z ogniw wodorowych jest eksploatowanych w Szwajcarii i w Niemczech. W Szwajcarii samochody ciężarowe o napędzie wodorowym serii Hyundai XCIENT Fuel Cells przejechały 10 milionów kilometrów, zmniejszając emisję CO<sub>2</sub> o ponad 6700 ton (hyundai-hm, 2024). Na rynku północnoamerykańskim firma Hyundai oferuje zestaw transportowy składający się z ciągnika i naczepy, przeznaczony do transportu dużych ładunków w różnych warunkach drogowych, o zasięgu 400 km (przy DMC 38 ton).

Produkcyjne testy drogowe podobnych pojazdów do transportu drewna prowadzi firma VOLVO, spodziewane jest uruchomienie produkcji pojazdów komercyjnych w 2025 roku. Ta sama firma prowadzi zaawansowane prace rozwojowe pojazdów transportowych napędzanych silnikami spalinowymi zasilanymi wodorem, spodziewając się, że tego rodzaju transformacja będzie łatwiejsza do wdrożenia niż wykorzystanie ogniw wodorowych. Testy drogowe rozpoczną się w 2026 r., a wprowadzenie na rynek planowane jest pod koniec tej dekady (Lind, 2024).

### 3.3. Odległość transportu drewna

Duże rozproszenie ładunków drewna na powierzchni leśnej, jak i jego odbiorców skutkuje znacznymi odległościami transportowymi. Z badań Sieniawskiego i Trzcinińskiego

(2010) wynika, że średnia odległość transportu dla drewna wielkowymiarowego przeznaczonego dla przemysłu tartaczno-celulozowego wynosi 77 km, a dla drewna dla przemysłu celulozowego 202 km. Podawane są również średnie odległości transportowe dla drewna wynoszące od 50 do 202 km (Sieniawski, 2012), w zależności od jego dalszego przeznaczenia, a przy drewnie do przemysłu celulozowego u jednego z odbiorców 40% dostaw było transportowane z odległości powyżej 400 km. Według ostatnich dyskusji z przedstawicielami PGLLP, odległości te wynoszą 60 km dla przemysłu tartaczno-celulozowego i 120 km dla celulozowego.

Tabela 3.2. Średnie promienie zaopatrzenia i drogi przewozu drewna okrągłego w zależności od wielkości sprzedaży (Ballaun, 2021).

Wielkość sprzedaży	Promień zaopatrzenia, (km)	Droga przewozu, (km)
1 tys. m <sup>3</sup>	30	38
1-10 tys. m <sup>3</sup>	46	58
10-50 tys. m <sup>3</sup>	68	86
50-100 tys. m <sup>3</sup>	95	120
100-500 tys. m <sup>3</sup>	91	115
Powyżej 500 tys. m <sup>3</sup>	107	135
Sprzedaż ogółem	76	96

Interesujące opracowanie dotyczące odległości transportowych drewna okrągłego zostało wykonane w Lasach Państwowe (Ballaun, 2021). Zespół wykonał symulację wpływu na zmianę promienia zaopatrzenia i odległości transportowych związanych z możliwością ograniczenia pozyskania drewna z Lasów Państwowych. Symulację wykonano przy zmniejszeniu pozyskania odpowiednio o 10%, 20% oraz 40%. Zastosowano optymalizator opracowany wewnętrznie przez PGL LP, wykorzystywany w procedurach sprzedaży drewna na lata 2016 - 2018 r. Symulacja miała na celu minimalizację globalnej pracy transportowej, nie uwzględniając cen surowca i preferencji klientów. W roku 2019 średnie promienie zaopatrzenia w surowiec drzewny wynosiły w zależności od wielkości sprzedaży drewna od 30 do 107 km (tabela 3.2). Dla drewna ogółem, spadek pozyskania o 10% spowoduje wydłużenie promienia zaopatrzenia o 7%, spadek pozyskania o 20% wydłuży promień zaopatrzenia już o 22%, a spadek o 40% wydłuży promienia zaopatrzenia aż o 65%. Przejście na realną drogę przewozu drewna wymaga pomnożenia promienia zaopatrzenia o współczynnik wydłużenia drogi, którego wartość wynosi 1,26.

Z ankiet przeprowadzonych w różnych krajach wynika, że średnia geometryczna odległości transportu drogowego drewna okrągłego przemysłowego wynosi 119 km. W Bułgarii, Turcji i Urugwaju średnie odległości transportu na duże odległości w transporcie drewna przekraczały 200 km. Z kolei najkrótsze średnie podróże w transporcie dalekobieżnym dla drewna okrągłego mają miejsce w Danii, Estonii, Japonii i Słowenii. Wynoszą one średnio mniej niż 60 kilometrów (Kärhä i in., 2024b).



### 3.4. Koszty transportu surowca drzewnego

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na opłacalność produkcji w sektorze leśno-drzewnym są koszty związane z transportem surowca drzewnego. Chociaż zużycie paliwa jest jednym z głównych parametrów kształtujących koszty eksploatacji pojazdów transportowych, to często, ze względu na bezpośredni wpływ na emisję szkodliwych gazów, a tym samym na środowisko naturalne, jest przedmiotem oddzielnych analiz.

Udział kosztów transportu w stosunku do kosztów całkowitych działalności leśnej jest znaczący. Szacuje się, że stanowi on około 17% i jest zdecydowanie wyższy w porównaniu z innymi sektorami. Największe koszty operacji łańcucha dostaw w leśnictwie związane są z wywozem drewna. Stanowią one od 40 do 60% (Shaffer i Stuart, 2005).

Istnieją symulacje dotyczące elementu transportowego w stosunku do całkowitych kosztów łańcucha dostaw drewna. Obliczono (Sinnott, 2016), że w Kanadzie transport drewna stanowił 35–50% całkowitych kosztów surowców. Z kolei wyniki innych badań (McConnell, 2019) podają, że koszty transportu stanowiły średnio 36% całkowitej stawki kontraktowej w Luizjanie w USA, a w przypadku Europy Środkowej (Hirsch, 2011) transport stanowił około 30% całkowitych kosztów drewna okrągłego.

Rzeczywisty koszt transportu drewna okrągłego w warunkach polskich w 2019 roku oscylował w granicach 0,28–1,13 zł/m<sup>3</sup>/km netto, osiągając średnią ważoną 0,85 zł/m<sup>3</sup>/km netto. Maksymalna wartość została wykazana dla odległości przewozu w przedziale 71–80 km. Dystans ten nie był jednak znaczący, gdyż stanowił tylko 3% udziału wszystkich rozpatrywanych dostaw surowca (Wieruszewski i in., 2020).

Koszty transportu drewna zależą w dużej mierze od odległości, gatunku drewna oraz grupy sortymentowej. Z badań ankietowych przeprowadzonej przez autorów wśród przewoźników drewna w roku 2019 wynikało (tabela 3.3), że wynoszą one od prawie 17 do 78 zł/m<sup>3</sup> dla drewna iglastego. W przypadku drewna liściastego, z uwagi na mniej efektywne wykorzystanie przestrzeni ładunkowych, są one odpowiednio o 3–4 zł wyższe.

Z badań ankietowych przeprowadzonych przez Kärhä zespołem (2024b) wynika, że średni koszt transportu drewna okrągłego przemysłowego wyniósł 11,1 EUR za tonę przewiezionego drewna. Rozpiętość kosztów przeciętnych wahała się w zależności od kraju, od 4 do 24 EUR/t. Najniższe średnie koszty transportu drogowego występowały w Ameryce Południowej (Argentyna i Brazylia) oraz w krajach bałtyckich (Estonia i Łotwa). Najwyższe średnie koszty transportu odnotowane zostały w Europie Południowej (Bośnia i Hercegowina, Włochy, Rumunia i Hiszpania), wschodniej Kanadzie i Chinach.

Istotny wpływ na koszty transportu drewna ma jego wilgotność. Ograniczenie dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów także istotnie zmniejsza wielkość ładunku wpływając negatywnie na poziom kosztów. W przypadku drewna możliwe jest pewne zwiększenie jednorazowo przewozonej ilości drewna, poprzez zmniejszenie jego wilgotności. Przeprowadzono szczegółową analizę wpływu wilgotności drewna (zrębków drzewnych) na efektywność procesu transportowego, wykorzystując parametry charakteryzujące proces wywozu zrębków pojazdami ciężarowymi w Polsce (Gendek i in., 2018c). Zmniejszenie wilgotności biomasy z 45 do 25% może skutkować wzrostem wartości ładunku około 7%. Stwierdzono także, bardzo niewielki, ale zauważany spadek zużycia paliwa. W przypadku przedsiębiorcy dostarczającego do zakładu energetycznego około 350 t zrębków (co stanowi ładunek 15 pojazdów), dzienny zysk dostawcy w wyniku zmniejszenia

wilgotności zrębków w czasie transportu może wynieść od min. 225 PLN do ok. 1890 PLN lub więcej, co w skali roku przełoży się na dziesiątki tysięcy złotych.

Tabela 3.3. Stawki oferowane przy transporcie drewna okrągłego w roku 2019 (opracowanie własne, 1 EUR=4,30PLN).

Odległość transportu, km	Drewno iglaste, (PLN/m <sup>3</sup> )	Drewno liściaste, (PLN/m <sup>3</sup> )
30-40	16,8	19,8
70-90	26,7	29,7
100-120	35,3	39,1
260-180	45,6	50,3
230-250	56,3	61,5
270-290	65,4	69,7
350-370	74,4	78,3
ponad 400	77,8	81,7

Ważnym czynnikiem przy transporcie drewna, wpływającym na wielkość emisji gazów cieplarnianych, jest zużycie paliwa. W literaturze scharakteryzowanych jest szereg czynników technicznych wpływających na ten parametr. Zaliczyć do nich należy: cechy pojazdu, cechy zastosowanych przyczep, geometrię dróg, prędkość jazdy, styl jazdy, warunki pogodowe, budowę i stan górnej warstwy dróg leśnych, odległość przewozu oraz organizację pracy (Berg i Lindholm, 2005; Klvac i in., 2013; Svenson, 2011). Do porównania wpływu wielkości pojazdu i ładunku, odległości transportu i długości sortymentów drewna na wskaźniki efektywności jego transportu, np. wydajność, efektywność energetyczną i koszty transportu stosuje się m.in. metodę symulacji zdarzeń dyskretnych (*ang. Discrete-event simulation DES*). Tendencja wykorzystywania do wywozu drewna pojazdów o coraz większej dopuszczalnej masie całkowitej, a tym samym ładowności prowadzi do zmniejszenia kosztów operacyjnych i zużycia paliwa.

### 3.5. Przewóz drewna – planowanie, składnice drewna

Transport surowca drzewnego jest jedną z kluczowych operacji w gospodarce leśnej odnoszących się do surowców drzewnych, która ma duże znaczenie w kosztach pozyskania, ale także posiada znaczny potencjał możliwości optymalizacji (Devlin i in., 2008; Greulich, 2002; McDonald i in., 2010; Trzciniński i Tymendorf, 2022). Od wielu lat coraz większą uwagę zwraca się na kryteria racjonalności przewozów nabywanego drewna ze względu na realizację celów społecznych (Kłapeć i in., 2017). Określenie i eliminacja zbędnych przewozów drewna mogą zmniejszyć całkowite koszty transportu (Rix, 2014), a także przyczynić się do redukcji zużycia paliwa (Kanzian i in., 2009), emisji gazów cieplarnianych i ryzyka wypadków.

Dlatego coraz częściej opracowuje się metody oraz buduje systemy służące wspomaganie decyzji w zakresie planowania przewozów surowca drzewnego. Wykonane zostały analizy symulacyjne umożliwiające ograniczenie przewozów (Kłapeć i in., 2017). W badaniach

wykorzystano udostępnione przez Lasy Państwowe dane dotyczące sprzedaży drewna w 2015 roku. Analizom poddano sprzedaż drewna sosnowego średniowymiarowego grupy S2A, przeznaczonego do przerobu przemysłowego. Skala oszczędności przewozowych zawarła się w przedziale od 3 do 31%. W średnich odległościach przewozu efekty optymalizacji spowodowały skrócenie tras ze 108 km do 93 km. Badania zagraniczne w tym zakresie również potwierdzają, że w wyniku optymalizacji przewozów możliwe jest uzyskanie oszczędności w pracy przewozowej do kilkunastu procent (Lückge i Weber, 1997; Poudžiunas i in., 2004).

Proces transportu drewna z lasu do odbiorców, najczęściej naturalnie dzieli się na dwa etapy - transport terenowy (głównie zrywka) i transport drogowy (po różnego rodzaju odpowiednio przygotowanych szlakach komunikacyjnych). Z tego powodu pojawia się potrzeba przeładowywania i krótkookresowego przechowywania drewna. Rozwiązaniem są leśne składnice drewna, o różnych rozwiązaniach infrastrukturalnych oraz o różnym przewidywanym czasie eksploatacji. Różnorodność warunków przyrodniczych i pozyskiwanych gatunków drewna i jego sortymentów, a także struktura sieci komunikacyjnej powodują, że możliwe są różne rozwiązania lokalizacji i wielkości składnic, wynikające z założonego stopnia koncentracji surowca. Rosnąca wielkość składnic leśnych skutkuje zwiększeniem odległości (a tym samym kosztów) terenowego etapu transportu, ale przy tym zwiększa dogodność i dostępność drewna dla transportu drogowego. Większe składnice z reguły wymagają dodatkowych działań infrastrukturalnych i mają dłuższy przewidywany czas eksploatacji. Zychowicz (1996) podjął próbę opisanie i optymalizacji procesu transportu drewna z lasów. Uwzględniając warunki charakterystyczne dla pozyskiwania i transportu drewna w Polsce, została zaimplementowana metoda wskazująca najbardziej racjonalne rozmieszczenie i wielkość leśnych składnic drewna w wybranym obszarze leśnym.

Liczba składnic drewna w Polsce systematycznie zmniejsza się, od 1950 w 1955 roku, poprzez 733 składnice w 1975 roku do 407 składnic w 1988 roku, z czego 370 było zorganizowanych w 28 zespołów składnic, a 37 składnic podlegało bezpośrednio nadleśnictwom. Proces zmniejszania się liczby składnic wynikał z rozwoju mechanizacji prac pozyskaniowych prowadzonych w lesie i z jednoczesnego dążenia do zwiększenia wielkości składnic. W latach 1970 - 1988 powstawały głównie składnice spedycyjno-manipulacyjne zapewniające dostawy drewna znaczącym odbiorcom, którymi były duże państwowe przedsiębiorstwa produkcyjne i handlowe. W latach dziewięćdziesiątych nastąpił dalszy spadek liczby składnic drewna, w roku 1999 działało już tylko 8 zespołów składnic i nieliczne składnice podlegające nadleśnictwom (Zychowicz 2001b). W tym czasie nadal działały Zespoły Składnic w Białogardzie i Miastku. W latach 1997 i 1998 kupowały one ok. 350 tys. m<sup>3</sup> sortymentów drewna, stanowiło to około 20% całkowitego pozyskania drewna w RDLP Szczecinek. Należy pamiętać, że składnice świadczyły jednocześnie usługi spedycyjne na rzecz innych podmiotów Lasów Państwowych. Przykładem wskazującym na korzyści z przekazywania drewna poprzez składnice jest manipulacja sortymentów brzożowych przez ZS w Miastku w okresie od stycznia do maja 1997 roku. W tym czasie poddano przerobowi 5 950 m<sup>3</sup> sortymentów wielkowymiarowych (WC) i 275 m<sup>3</sup> sortymentów średniowymiarowych dłużycowych (S2). W sumie na składnicy wyrobiono 6 584 m<sup>3</sup> drewna do sprzedaży, uzyskano zatem przyrost miąższości o 5,8%.

Obecnie w ramach PGL Lasy Państwowe funkcjonują trzy zespoły składnic leśnych (Koss, 2024). Prowadzą one wieloaspektową działalność gospodarczą, w zakresie obrotu drewnem, świadczą w ograniczonym zakresie usług transportu i składowania drewna.

System transportu drewna (tak jak w przypadku każdego innego rodzaju transportu) jest pochodną procesu produkcyjnego – pozyskiwania drewna. Zastosowane rozwiązania wynikają ze struktury zasobu (asortyment, rozmieszczenie przestrzenne oraz dostępność w czasie), a także potrzeb i charakterystyki odbiorców surowca drzewnego. Rozwiązania techniczne i technologiczne są dodatkowo kształtowane przez wskazania wynikające z dążenia do uzyskania maksymalnej efektywności, poprzez zastosowanie odpowiednich metod z zakresu logistyki.

Przykładem wysokiej efektywności i elastyczności procesu pozyskiwania i transportu drewna jest logistyka łańcucha dostaw drewna w Skandynawii. Odnacza się ona dużą koncentracją pozyskiwania surowca drzewnego, ograniczeniem różnorodności sortymentów, zastosowaniem wysokowydajnych maszyn mobilnych – zarówno technologicznych jak i pojazdów transportowych oraz wysoce rozwiniętą koordynacją prac z zakresu pozyskiwania i transportu. System transportu drewna w Skandynawii charakteryzuje się wysoką efektywnością logistyczną z elastycznie wykorzystywanym systemem przejściowego składowania drewna (*ang. terminals*). Istnienie przejściowych składnic uzasadnione jest potrzebą wzajemnego dopasowania parametrów potoków transportowych związanych z sezonowością pozyskiwania i transportu lub potoków przerobowych surowca drzewnego (lepsza kontrola jakości i wilgotności drewna). Składnice przejściowe są niezbędne w przechowywaniu dużych ilości drewna pokłeskowego, szczególnie w sytuacji małej powierzchni składnic przyzakładowych (Väättäinen i in., 2021). Można zakładać, że wraz ze spodziewanym wzrostem kosztów pracy ludzkiej i tym samym koniecznością szerszego stosowania wysokowydajnych maszyn, system pozyskiwania i transportu drewna w Polsce będzie ewoluować w kierunku opisanych powyżej rozwiązań.

Pozyskanie drewna w Polsce realizowane jest w lasach o charakterystyce wyraźnie odmiennej od lasów w Skandynawii, tym samym różnicujące cechy zasobu produkcyjnego, mogą spowodować potrzebę modyfikacji rozwiązań stosowanych w Skandynawii. Koncentracja surowca może zostać osiągnięta nie poprzez większe zręby a poprzez gromadzenie drewna z wielu zrębów na przejściowych składnicach przy drogach.

Wysokie koszty oraz niska sprawność transportu kolejowego powodują, że znaczne ilości drewna są transportowane w Polsce na duże odległości z użyciem samochodów ciężarowych. W tym wypadku preferowane są szosowe wersje samochodów ciężarowych (nie dostosowane do poruszania się po drogach gruntowych), nie wyposażone w urządzenia załadownicze, jest to dodatkowy czynnik wskazujący na ewentualną potrzebę tworzenia przejściowych składnic drewna przy drogach.

Trudniejsze niż w Skandynawii, ze względu na większy udział pozyskania drewna liściastych gatunków drzew oraz na duże zapotrzebowanie na drewno długie (które w zasadzie nie jest pozyskiwane w Skandynawii) wydaje się też uzyskanie zmniejszenia różnorodności asortymentu surowcowego drewna. Liczne przykłady z Europy kontynentalnej wskazują, że dążenie do wysokiej efektywności i elastyczności systemu produkcyjnego powoduje jednak uproszczenie asortymentu, między innymi dzięki wdrażaniu nowych wysokowydajnych maszyn zdolnych do obróbki drewna twardego–gatunków liściastych (Mederski i in., 2021).

Nieco innym zagadnieniem jest wprowadzanie punktów lub zakładów przerobu-kondycjonowania surowca drzewnego. Niewątpliwie ich występowanie w układzie produkcyjnym bardzo istotnie zmienia system transportowy surowca drzewnego. Uzasadnienie potrzeby ich istnienia rozważane jest jednak na poziomie kształtowania całego systemu produkcyjnego. Są to nowe zakłady przetwórcze istotnie zmieniające strukturę systemu pozyskiwania surowca drzewnego. Wprowadzenie, takiego nowego etapu przetwórczego musi w konsekwencji być uwzględnione w odpowiednio zmodyfikowanym systemie logistycznym.

Zmieniający się sposób prowadzenia gospodarki leśnej spowodował potrzebę wprowadzenia lepszej synchronizacji (w czasie i przestrzeni) procesów pozyskiwania drewna i transportu drewna. Został opracowany kompleksowy model matematyczny i odpowiadający modelowi algorytm symulacyjny (Zychowicz, 2012). Model symulacyjny zapewniał wskazanie najlepszych wariantów technologicznych pozyskiwania i transportu drewna. Środki techniczne i rozwiązania technologiczne są w nim dobierane tak, aby zapewnić niezakłócony przebieg procesów transportowych drewna odwzorowujących potoki ładunków powstające w procesie pozyskania.

Proces transportu drewna jest przypadkiem typowego zagadnienia logistycznego. W analizach logistycznych wyzwaniem jest przedstawienie lasu jako rozległego magazynu ze skomplikowanym opisem matematycznym dostępności zasobów – drewna pod postacią różnorodnych sortymentów. W celu zapewnienia synchronizacji przebiegu operacji wchodzących w skład procesu pozyskiwania i transportowania drewna model logistyczny został uzupełniony o procedury programowania dynamicznego, zapewniające uwzględnienie stochastyczności zjawisk warunkujących przebieg pozyskiwania i transportowania drewna (Zychowicz i in., 2016).

Innym przykładem doskonalenia systemu transportowego jest wykorzystanie metody najkrótszej ścieżki, dzięki której możliwe było porównanie czy dostawca z danego obszaru będzie mógł przewozić drewno z innych (oprócz swojego obszaru pracy) leśnictw. Skrócenie długości tras i czasu przewozu drewna pozwoliło na zmniejszenie kosztów eksploatacji samochodów (Szada-Borzyszkowski i Szada-Borzyszkowska, 2018). Łączna miesięczna suma tras przewożonego drewna dla wszystkich przewoźników odwiedzających leśnictwo średnio 5 razy w tygodniu skróciła się z o 2115 km. Czas pracy dla wszystkich przejazdów po wprowadzeniu zmian można było skrócić o około 5,5 godziny.

Różnorodność i zmienność czynników kształtujących proces pozyskiwania drewna, a w konsekwencji proces transportowy, powoduje, że do rozwiązania problemu transportowego wykorzystywane są modele matematyczne opisywane metodami numerycznymi. Takie podejście zastosowano do planowania transportu w wybranym regionie w Austrii. Stworzono trzyetapowy algorytm przydziału potoków surowcowych do odbiorców. Na początku rozwiązywany jest problem transportowy w celu optymalizacji przepływu drewna okrągłego z miejsc składowania do zakładów przemysłowych. W celu zagwarantowania, że transportowane ilości są równomiernie rozłożone na poszczególne dni horyzontu planistycznego jako obciążenia przewoźników i/lub zakładów przemysłowych, wprowadzono możliwość wygładzania zleceń transportu drewna. Codzienne decyzje dotyczące tras były następnie podejmowane poprzez rozwiązanie problemu wyznaczania tras dla pojazdów do transportu drewna (Hirsch i Gronalt, 2013).

Interesujące są także opracowania dotyczące modelowania i optymalizacji procesów związanych z przemieszczaniem surowca drzewnego w Skandynawii, kompleksowo

uwzględniające oddziaływanie procesów produkcyjnych (w tym wypadku przede wszystkim transportowych) na środowisko naturalne (Palander, 2024, 2023; Palander i in., 2020, 2018).

### **Podsumowanie rozdziału 3**

Jednym z kluczowych elementów umożliwiających niezakłócone, rytmiczne dostawy drewna, jest jego wywóz. W Polsce w 90-ciu procentach realizowany jest on głównie z zastosowaniem taboru kołowego. Pozostałe 10% realizowane jest koleją, a związane jest to przede wszystkim z większymi odległościami transportu.

Prawidłowa organizacja procesu transportu drewna jest niewątpliwie dużym wyzwaniem logistycznym. Nowoczesne rozwiązania technologiczne, związane z rozwojem systemów informacji przestrzennej w połączeniu z programami optymalizacyjnymi przyczyniają się do zwiększenia efektywności wykorzystania dostępnego taboru wywozowego, co skutkuje większą wydajnością pracy i niższymi kosztami jednostkowymi. Umożliwia to również użycie mniejszej ilości materiałów pędnych, przyczyniając się do ochrony środowiska naturalnego. Jednym z kluczowym zagadnień, pozwalających na zmniejszenie potrzebnych nakładów jest także planowanie procesów transportowych, które zapewnia zmniejszenie dystansów pokonywanych przez pojazdy z zachowaniem przypisania surowca (odpowiedniego zestawu sortymentów drzewnych) do odbiorcy. Problemy z doбором metody obliczeniowej do tego celu wynikają z trudności poprawnego opisu rozproszonej bazy surowcowej o bardzo zmiennych i zróżnicowanych cechach. Znaczną zmiennością odznacza się również charakterystyka odbiorców.

Znaczącą rolę w łańcuchu dostaw w leśnictwie odegrać mogą składnice drewna. Ich liczba w okresie kilkudziesięciu lat znacznie się zmniejszyła, pojawiają się jednak przesłanki skłaniające do rozważenia potrzeby wdrożenia nowego systemu składnic. Mogą one przyczynić się do zoptymalizowania wartości wyrobionych sortymentów drzewnych oraz ułatwić taką organizację transportu surowca drzewnego, która ograniczy jego niekorzystne oddziaływanie na środowisko.

Zmniejszenie negatywnego oddziaływania środowiskowego procesów produkcyjnych i transportowych w leśnictwie zostanie osiągnięte również dzięki innowacjom technicznym wprowadzanym do maszyn i pojazdów, zapewniającym niską lub zerową emisję czynników niebezpiecznych.

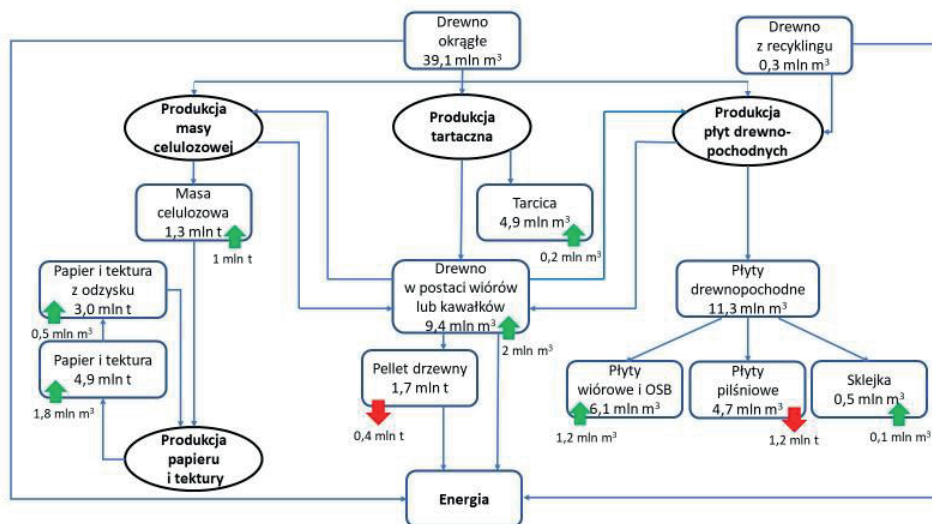




#### 4. ZAKŁADY PRZETWÓRSTWA DREWNA

Przemysł produktów leśnych jest ważny w wielu gospodarkach świata (Chabanet i in., 2023). W Polsce przemysł drzewny wytwarza 2,3% PKB oraz około 11% wartości dodanej w przetwórstwie przemysłowym, co stanowi ok. 30 mld zł rocznie. Sektor gospodarki Polski zajmujący się przerobem drewna zatrudnia aż 330 tys. osób, co stanowi 2,5 proc. zatrudnienia w całej gospodarce, dodatkowo 25 tys. osób zatrudnionych przez Lasy Państwowe i 50 tys. w firmach wykonujących różne prace leśne (Czemko, 2024). Dla porównania w 2022 roku we Francji (Weber, 2024) w sektorze leśno-drzewnym zatrudnionych było 440 tys. osób, w Niemczech 1,1 mln osób, a w Szwecji 70 tys. osób i dodatkowe 50 tys. osób z tego kraju stanowi jednoosobowe działalności gospodarcze (Jaworski, 2024). Z kolei w Kanadzie, w przemyśle leśno-drzewnym zatrudniano 212 tys. osób, a jego wkład wyniósł 1,2% nominalnego produktu krajowego brutto (Chabanet i in., 2023).

Do zakładów przetwórstwa drewna, zaliczyć można m. in: tartaki, celulozownie i papiernie, elektrownie i elektrociepłownie zasilane częściowo biomasą czy firmy wytwarzające pellet i brykiet drzewny. Wśród zakładów przetwórczych drewna ważnym ogniwem są tartaki, które uczestniczą w pierwszym przetwarzaniu pozyskanego w lasach drewna okrągłego w produkt główny, np. tarcicę o różnych specyfikacjach wymiarowo-jakościowych czy produkty uboczne. Produkty uboczne, czyli trociny, zrębki, kora, niewymiarowe kawałki drewna, mogą zostać wykorzystane przez inne gałęzie przemysłu do produkcji energii (elektrownie i elektrociepłownie), celulozy i papieru (celulozownie i papiernie) oraz związków chemicznych.



Rys. 4.1. Schemat przepływu surowca drzewnego w Polsce według danych FAO z 2020 roku i koncepcji Cazzaniga i in. (Cazzaniga i in., 2019; FAO, 2020).

Uproszczony przepływ surowca drzewnego w Polsce według danych FAO (ang. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), pokazano na rysunku 4.1 (FAO, 2020). Według schematu, w Polsce przetworzono łącznie 39,1 mln m<sup>3</sup> drewna okrągłego.

Wykorzystywane było głównie w produkcji tartacznej, na płyty drewnopochodne, masę celulozową, papier i tekturę. Drewno okrągłe wielkowymiarowe i częściowo średniowymiarowe przerabiane w produkcji tartacznej na tarcicę stanowiło 4,9 mln m<sup>3</sup>, a drewno w postaci wiórów lub kawałków - 9,4 mln m<sup>3</sup>. Wyprodukowane płyty drewnopochodne stanowiły 11,3 mln m<sup>3</sup>, z czego 6,1 mln m<sup>3</sup> to płyty wiórowe i płyty OSB (*ang. Oriented Strand Boards*, czyli kompozytowa płasko prasowana płyta o wiórach orientowanych), 4,7 mln m<sup>3</sup> to płyty pilśniowe, a 0,5 mln m<sup>3</sup> stanowiły sklejki. Pozostałe drewno średniowymiarowe i odpady z procesów tartacznych były wykorzystywane do produkcji celulozy i papieru. Według danych FAO uzyskano 1,3 mln ton masy celulozowej i wyprodukowano 7,9 mln t papieru oraz tektury, w tym 3,0 mln t z odzysku. Z drewna w postaci wiórów wykonano pellet drzewny, którego masę oszacowano na 1,7 mln t. Poza drewnem bezpośrednio pozyskanym z lasu w przemyśle było również wykorzystywane około 0,3 mln ton drewna z recyklingu. Jest to drewno poużytkowe (surowiec wtórny), pochodzące zazwyczaj z fabryk pozyskania surowca z wyspecjalizowanych firm recyklingowych, które segregują zużyte produkty drzewne, wstępnie je oczyszczają i przekazują zazwyczaj do zakładów zajmujących się produkcją płyt budowlanych, meblowych lub podłogowych (EcoReporters, 2022). Na rysunku 4.1 za pomocą strzałek skierowanych w górę (zielony kolor) oraz w dół (czerwony kolor) przedstawiono odpowiednio wartości importu oraz eksportu wymienionych produktów.

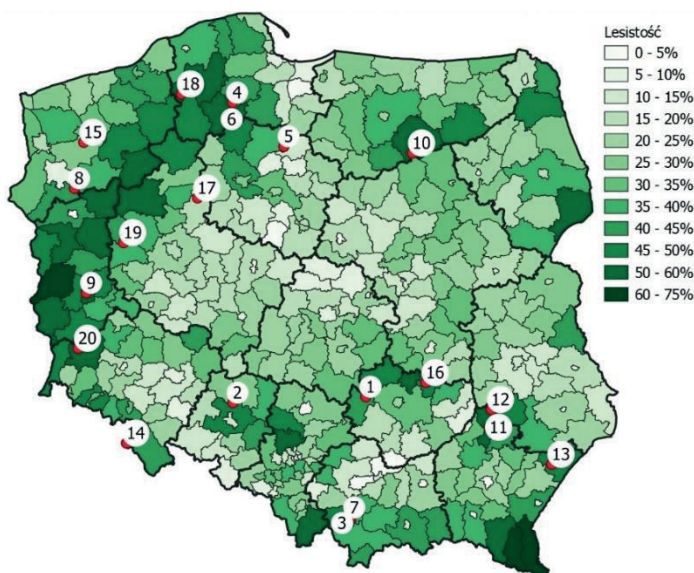
#### 4.1. Tartaki

Tartaki to zakłady przerobu drewna, w których w procesie technologicznym przecierania (przecinania) drewna (zazwyczaj wzdłuż włókien) dokonuje się przerobu drewna okrągłego na produkt zwany tarcicą. W wyniku przetarcia pojedynczego surowca można uzyskać jednocześnie kilka głównych jak i ubocznych produktów (Dumetz i in., 2019), co w połączeniu z niejednorodnością surowca (kłody mają różne wymiary, kształty i jakość) utrudnia zarządzanie produkcją w zakładach przetwórstwa drzewnego (Dumetz i in., 2017). Poza produktami tarcicy (np. deski, deseczki, bale, listwy, krawędziaki i in.) można wytwarzać, palety, podkłady kolejowe, kołki sadownicze, elementy ogrodzeń, a z odpadów tartacznych np. pellety, brykiety, zrębki czy korę. Na terenie tartaku prowadzi się prace na placu surowca (składnicy przytartacznej), w hali tartacznej oraz na składzie produktu gotowego. Dostarczany do tartaków surowiec drzewny może podlegać klasyfikacji jakościowo-wymiarowej i zabezpieczeniu przed pęknięciami w wyniku przesychania, zabezpieczeniu przed grzybami i owadami. Wytworzone produkty podlegają m.in. suszeniu w suszarniach, obróbce końcowej i pakowaniu.

Według danych PGL LP w 2019 roku było ok. 7 tys. nabywców drewna, z kolei w 2022 roku w Polsce działało ok. 7,5 tys. firm, które kupowały i przetwarzały drewno okrągłe (Orlikowska, 2022). Większość z tych firm można zaliczyć do przedsiębiorstw bardzo małych i małych, przerabiających rocznie do 10 tys. m<sup>3</sup> drewna kłodowanego. Ich udział w rynku wynosił ok. 32%. Zazwyczaj te firmy zaopatrują się w drewno lokalnie, tj. na terenach RDLP, w których funkcjonują, a ograniczone, niewielkie ilości zamawianego i kupowanego drewna, utrudniają sprawne planowanie dostaw w ciągu roku. Około 18% udziału w rynku miały tartaki przerabiające od 10 do 50 tys. m<sup>3</sup> drewna rocznie. Zakłady te mają najtrudniejszą sytuację na rynku ze względu na ograniczoną dostępność surowca oraz

pozyskiwanie klientów. Są za duże, aby skorzystać z drewna lokalnie, a za małe, aby konkurować z potentatami na polskim rynku. Załedwie 30 zakładów, czyli około 1% wszystkich jednostek, to firmy przerabiające powyżej 50 tys. m<sup>3</sup> drewna okrągłego rocznie i mające największy udział w rynku, wynoszący ok 50%. Zakłady te w związku z dużym zapotrzebowaniem na surowiec drzewny, muszą zaopatrywać się w całym kraju oraz w innych krajach Unii Europejskiej, co generuje wysokie koszty transportu i powoduje większe emisje gazów cieplarnianych.

W Europie w 2019 roku do największego producenta wyrobów z drewna należało 16 tartaków firmy Stora Enso z Finlandii przerabiających łącznie ok. 5,69 mln m<sup>3</sup>/rok. Porównywalnie, w 2022 roku tartak Fügen w Austrii (firma Binderholz) przerabiał 1,1 mln m<sup>3</sup>/rok, Boruth z Niemiec – 1,8 mln m<sup>3</sup>/rok, czy Lieksa z Finlandii – 1,0 mln m<sup>3</sup>/rok (Holzkurier, 2020). Z kolei w naszym kraju, w 2023 roku, tylko dwa tartaki przekroczyły przerób 500 tys. m<sup>3</sup> surowca drzewnego.



Rys. 4.2. Lokalizacja 20 największych tartaków w Polsce na tle lesistości w Polsce, opracowanie własne na podstawie danych z czasopisma *Przemysł drzewny* (Wnorowska, 2023). Opis lokalizacji i nazw zamieszczono w tabeli 4.1.

W Polsce lokalizacja największych tartaków pokrywa się z obszarami największej lesistości. Najwięcej zakładów znajduje się w północno-zachodniej części Polski w województwie pomorskim, kujawsko-pomorskim, zachodniopomorskim i lubuskim oraz w południowo-wschodniej części Polski tj. na granicy województw świętokrzyskiego i podkarpackiego. Na rysunku 4.2 przedstawiono lokalizację tartaków, w których w 2023 roku przerobiono najczęściej drewna okrągłego, a w tabeli 4.1 podano ich nazwę, województwo, w którym jest zlokalizowane oraz przerób w 2022 i 2023 roku. W wymienionych tartakach produkowano nie tylko tarcicę, ale i palety, panele podłogowe, pellet, czy korę i zrębki. Jak wynika z przedstawionych danych, na terenie Polski można

znaleźć zarówno duże światowe koncerny drzewne, jak i prywatnych polskich przedsiębiorców.

Tabela 4.1. Największe tartaki w Polsce pod względem wielkości przerobu drewna okrągłego w 2022 i 2023 roku (Wnorowska, 2023).

Lp.	Nazwa	Województwo	Przerób drewna okrągłego	
			2022 r., (tys. m <sup>3</sup> )	2023 r., (tys. m <sup>3</sup> )
1	Tartak Olczyk	świętokrzyskie	500	600
2	Stora Enso Wood Products	opolskie	530	500
3	Tartak Gałka	małopolskie	360	280
4	Sylva	pomorskie	275	280
5	Stelmet	kujawsko-pomorskie	360	270
6	KB	kujawsko-pomorskie	310	260
7	DrewoPol Suwaj	małopolskie	260	260
8	Barlinek	zachodnio-pomorskie	300	250
9	Stelmet	lubuskie	300	220
10	Ikea Industry	warmińsko-mazurskie	330	210
11	Ikea Industry	podkarpackie	300	200
12	Dankros	podkarpackie	160	160
13	CMC	podkarpackie	140	140
14	Stelmet	lubuskie	170	120
15	Biomasa Partner Group	zachodnio-pomorskie	160	110
16	Drewex	świętokrzyskie	125	110
17	ZPD Roma	wielkopolskie	100	110
18	Expro	kujawsko-pomorskie	120	105
19	Tartak Zębowo	wielkopolskie	120	105
20	Forest Style	dolnośląskie	110	105

## 4.2. Zakłady celulozowo-papiernicze

Przedstawicielami zakładów przemysłu celulozowo-papierniczego, są celulozownie (fabryki celulozy), papiernie (fabryki papieru i tektury), ścieralnie (fabryki ścieru), fabryki opakowań i wyrobów z papieru oraz tektury. W tych pierwszych zazwyczaj produkowana jest masa celulozowa, w drugich - papier i tektura z dostarczonej masy celulozowej, ścieru i makulatury, a w trzecich – ścier drzewny, wykorzystywany również do produkcji papieru gorszej jakości z przeznaczeniem na gazety. Zdarza się, że wszystkie produkcje łączone są w jednym zakładzie. Najlepszej jakości papier powstaje z masy celulozowej, gorszy ze ścieru i dodatków z recyklingu z makulatury.

Zakłady celulozowo-papiernicze zazwyczaj skupują drewno średniowymiarowe tzw. papierówkę (S2), którą na przykładowym placu korują, a następnie rozdrabniają. Zrębki,

po sezonowaniu w hałdach, są transportowane do warników i poddawane dalszemu procesowi przetwarzania na masę celulozową.

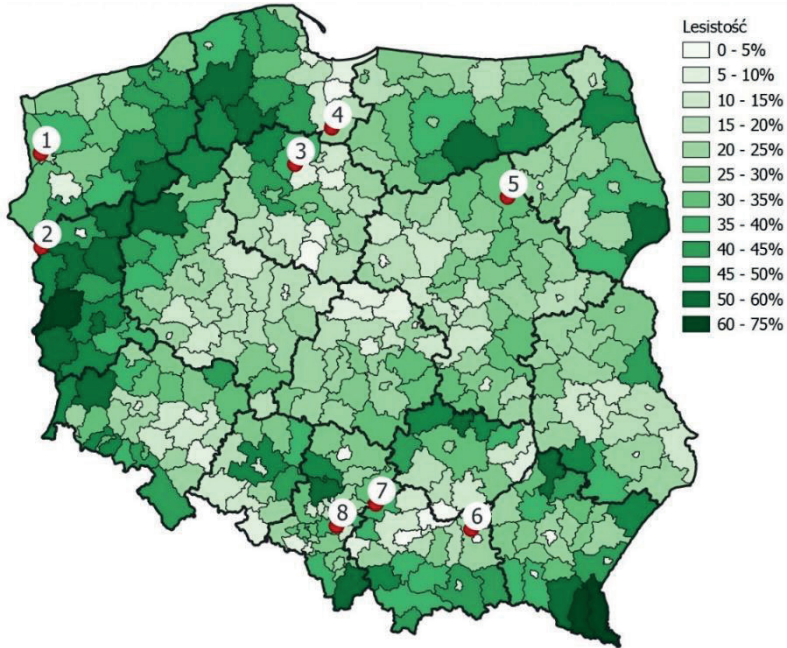
Zgodnie z danymi Konfederacji Europejskiego Przemysłu Papierniczego (Rynek Papierniczy, 2024) w 2023 roku produkcja masy celulozowej w Europie wyniosła 32,7 mln ton (CEPI, 2024), a produkcja pulpy z papieru z recyklingu ok. 35 mln ton, pozostałe ok. 9,3 mln to materiały niewłókniste (np. kleje, barwniki, wypełniacze), wykorzystywane do produkcji papieru. Łączna produkcja papieru w tym roku wyniosła ok. 73,9 mln ton. Największy udział w produkcji miały Niemcy – ponad 25%, Włochy i Szwecja po ponad 10%, a Polska 6,2%. Zużycie papieru w tym samym roku wyniosło zaledwie 62,7 mln ton. Najwięcej papieru zużyto do opakowań 38,7 mln ton i papierów graficznych - ponad 13,5 mln ton. Produkcja papieru i tektury w Europie zmniejsza się z roku na rok, co spowodowane jest wysokimi kosztami produkcji, zwłaszcza energii, ale też postępującą cyfryzacją i zmniejszeniem popytu na opakowania i produkty z papieru. W Polsce, po ponad 2-letnim okresie wzrostu sprzedaży w branży papierniczej, zmniejszenie produkcji papieru i tektury przyniosło w 2023 roku spadek przychodów sektora o 17,1% (Koleśnikow i in., 2023).

Produkcja celulozy i papieru wymaga znacznej ilości wody, dlatego największe zakłady umiejscowione są nad dużymi rzekami (Odrą, Wisłą, Narwią czy Wartą), ale i w pobliżu terenów o znacznej lesistości w celu zminimalizowania odległości transportu z dużych kompleksów leśnych (rys. 4.3). Jednak ze względu na duży przerób drewna w tych zakładach, ich lokalizacja wymusza i zwiększa odległości transportu drewna stosowego z innych regionów Polski, ponieważ lokalne zasoby drewna są niewystarczające. Przyjmuje się, że średnia odległość transportu drewna stosowego wynosi 120 - 130 km.

W 2024 roku w Polsce łącznie działały 94 zakłady przerabiające drewno na produkty z papieru, tektury i wytwarzające opakowania, w tym 16 fabryk pozyskujących włókna celulozowe i ścier. Do największych producentów celulozy i papieru w Polsce należą zakłady w Świeciu, Kwidzynie, Ostrołęce, Kostrzynie, Niedomicach, Tychach – Czułowie, Szczecinie i Kluczach. Przykładowo w Kostrzynie nad Odrą, w drugim kwartale 2024, wyprodukowano ok. 90 tys. ton celulozy.

Zakłady celulozowo-papiernicze są zobowiązane do redukcji emisji CO<sub>2</sub>. W 2023 roku, w porównaniu do poprzedniego roku, wśród sektorów przemysłowych produkujących masę celulozową i papier zarejestrowano zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> o 5,8%, czyli 27,73 Mt (Viki, 2024). Sektor ten od 2005 roku osiągnął już ponad 46% redukcję emisji dwutlenku węgla. W ostatnich dwudziestu latach zmniejszyła się również emisja SO<sub>2</sub>, z 0,4 do 0,07 kg S/t produktu i tlenków azotu z 0,9 do 0,62 kg NO<sub>x</sub>/t. Redukcje te wiążą się ze znacznymi inwestycjami tych zakładów w bardziej ekologiczną infrastrukturę. Wobec ambitnych celów dekarbonizacji wyznaczonych przez Komisję Europejską, inwestycje te będą musiały przyspieszyć w nadchodzących latach, pomimo stale trudnej sytuacji na rynku produktów z papieru i tektury.





Rys. 4.3. Główne ośrodki przemysłu celulozowo-papierniczego na tle lesistości w Polsce: 1- Szczecin, Apis Sp. z o.o., 2 - Kostrzyn nad Odrą, Arctic Paper Kostrzyn S.A., 3 - Świecie, Mondi Świecie S.A., 4 - Kwidzyn, MM Kwidzyn sp. z o.o., 5 - Ostrołęka, Stora Enso Poland S.A., 6 - Niedomice, Glucholaskie Zakłady Papiernicze Sp. z o.o., 7 - Klucze, Velvet Care Sp. z o.o., 8 - Tychy-Czulów, Tektura Opakowania Papier S.A.; źródło: opracowanie własne na podstawie (Muzeum Papiernictwa, 2024).

### 4.3. Elektrownie, elektrociepłownie oraz zakłady produkujące pellet

Pozostałości pozbawione (biomasę drzewną) wykorzystuje się do celów energetycznych. W przyjętej w lutym 2021 r. Polityce energetycznej Polski do 2040 r. (PEP2040) podkreślono kluczową rolę wykorzystania biomasy w obniżeniu emisyjności sektora energetycznego (M.P. 2021 poz. 264, 2021). Uznano ją za źródło energii o największym potencjale dla realizacji zobowiązań Polski w zakresie OZE w ciepłownictwie. Dodatkowym, pozytywnym aspektem energetycznego wykorzystania biomasy jest fakt, iż przyczynia się do lepszej gospodarki odpadami.

W Polsce głównymi źródłami biomasy drzewnej są leśnictwo i przemysł drzewno-papierniczy (Dudziec i in., 2023; Wieruszewski i in., 2022a, 2022b). Powstają w nich: drewno kawałkowe, drewno odpadowe w postaci wierzchołków drzew i gałęzi, odpady w postaci kory, trocin i karpiny (Fodrowska, 2021). W literaturze występuje pojęcie drewna energetycznego definiowanego jako surowiec drzewny, który ze względu na cechy jakościowo-wymiarowe posiada obniżoną wartość techniczną i użytkową uniemożliwiającą jego przemysłowe wykorzystanie, dlatego spalany jest w elektrowniach i elektrociepłowniach (Globenergia, 2024). Dostawcami biomasy do dużych przedsiębiorstw

energetycznych są firmy specjalizujące się w obrocie biomasą. W latach 2018-2020 w polskich lasach pozyskiwano rocznie około 7,5 mln m<sup>3</sup> drewna do produkcji energii z przeznaczeniem zarówno dla konsumentów indywidualnych, jak i przemysłu (Majchrzak i in., 2022). Obecnie wartość ta stanowi prawie 18% całkowitego pozyskania drewna (Wiśniewski, 2022; Woch i in., 2019). Ilość energii możliwa do pozyskania rocznie z odpadowego drewna pochodzącego z krajowych lasów (Ściubiak i in., 2023) wynosi około 87,8 PJ/rok, z czego największym potencjałem odznaczają się województwa północnej i zachodniej części Polski, posiadające najwyższą lesistość, czyli odpowiednio: zachodniopomorskie (10,1 PJ/rok), warmińsko-mazurskie (8,3 PJ/rok), wielkopolskie (7,7 PJ/rok), lubuskie (7,4 PJ/rok), dolnośląskie (7,3 PJ/rok), pomorskie (7,1 PJ/rok).

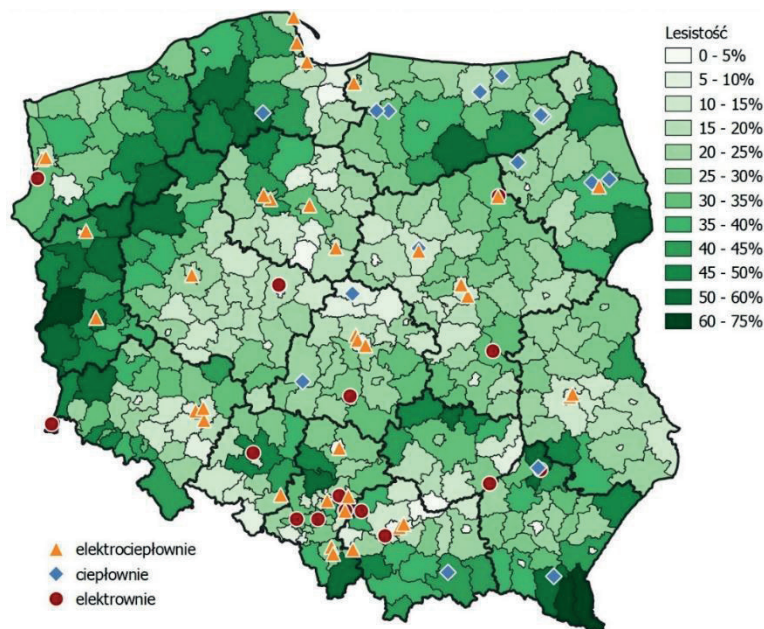
Pozostałości pozrębowe przetwarzane są do postaci zrębków, ze względu na strukturę gatunkową polskich lasów, głównie sosnowych i świerkowych. Jakość zrębków odgrywa główną rolę w wyborze odpowiedniej metody odzyskiwania energii, takiej jak:

- bezpośrednie spalanie (reakcja chemiczna przebiegająca w kotłach zazwyczaj między materiałem, a utleniaczem, w wyniku której wydzielane jest ciepło i światło);
- zgazowanie (proces polegający na zamianie paliwa stałego lub płynnego w paliwo gazowe);
- piroliza (proces termiczny polegający na rozkładzie drewna bez dostępu powietrza, w wysokich temperaturach).

Całkowita moc elektrowni na biomasę wzrosła od 2005 roku ponad siedmiokrotnie (Stolarski i in., 2020) z niecałych 190 MW do 1512 MW (Wiśniewski, 2022), a ilość biomasy drzewnej zużywanej w bioenergii wzrosła w tym samym czasie prawie 140-krotnie z 35 tys. m<sup>3</sup> do 4,9 mln m<sup>3</sup> rocznie (Sefeedpari i in., 2020). W 2022 roku, działały w Polsce 23 instalacje OZE o mocy zainstalowanej większej niż 5,0 MW, zasilane biomasą i spalające biomasę drzewną (Stolarski i in., 2020). Do największych instalacji tego typu należą zakłady w województwie świętokrzyskim (pow. staszowski – 230,0 MW – elektrownia Połaniec) i w województwie mazowieckim (m. st. Warszawa – 172,6 MW) (Ściubiak i in., 2023). Te największe instalacje zużywają rocznie ponad 0,5 mln ton zrębków leśnych (Wiśniewski, 2022).

Do zakładów przemysłowych wytwarzających ciepło i energię należą m.in. ciepłownie, (produkujące czynnik grzewczy o wysokiej temperaturze, najczęściej wody), elektrownie (wytwarzające energię elektryczną) oraz elektrociepłownie (wytwarzające w sposób skojarzony zarówno energię elektryczną jak i ciepło).

Rozmieszczenie zakładów energetycznych zasilanych m.in. biomasą (ciepłowni, elektrowni i elektrociepłowni) na mapie Polski pokrywa się z położeniem centrów miejskich (rys. 4.4) i nie jest bezpośrednio związana z lesistością. Najwięcej ciepłowni jest w północno-wschodniej części Polski, elektrociepłowni współpalających węgiel z biomasą na południu w województwach: śląskim, małopolskim i dolnośląskim, co jest powiązane z lokalizacją złóż węgla, a elektrowni w województwach: świętokrzyskim, wielkopolskim, mazowieckim i zachodniopomorskim (Elźbieciak i Zasuń, 2022). Przykładowo elektrownia Połaniec posiada siedem bloków energetycznych opalanych węglem przy współpalaniu biomasy oraz jeden tzw. "Zielony blok" opalany wyłącznie biomasą, pochodzącą w 80% ze zrębków drzewnych i 20% ze odpadów rolniczych. Do produkcji energii zużywa łącznie ponad 1,49 mln ton drewna rocznie.



Rys. 4.4. Mapa ciepłowni, elektrowni i elektrociepłowni w Polsce w 2022 roku na tle lesistości w Polsce; źródło: mapa wykonana na podstawie danych udostępnionych w internecie (Elźbieciak i Zasuń, 2022; Madejski, 2023).

Biomasa leśna i roślinna różnego pochodzenia przeznaczona jest także do produkcji pelletu. Pellet wykorzystywany jest przede wszystkim w ogrzewnictwie indywidualnym do ogrzewania domów, zakładów przemysłowych, budynków użyteczności publicznej oraz w ciepłownictwie (w kotłowniach na pellet i biomasę), z wyłączeniem dużych instalacji. Na jakość brykietów i pelletów wpływ ma m.in. surowiec (gatunek drewna i jego wilgotność) jaki wykorzystywany jest do produkcji. Ze względów środowiskowych i ekonomicznych, transport biomasy drzewnej w formie przetworzonej (pellet, brykiet) jest bardziej ekonomiczny niż w formie nieprzetworzonej (nieprzetworzonych odpadów), ze względu na większą gęstość objętościową i tym samym energię zgromadzoną w jednostce masy czy objętości.

W 2022 roku konsumpcja pelletu w UE przekroczyła 24,8 mln ton. Jak donosi raport „Wood Pellets Annual” (Flach i Bolla, 2023), głównymi użytkownikami pelletów drzewnych w UE są Włochy, Niemcy, Holandia, Dania, Francja, Szwecja, Austria i Belgia. Polska z produkcją 1,3 mln ton pelletu rocznie stanowi jeden z najsilniej rozwijających się rynków. Materiał do produkcji pelletów pochodzi m.in. z polskich lasów. W 2021 roku produkcja w krajach członkowskich nie była w stanie zabezpieczyć odpowiednich ilości paliwa, co spowodowało wzrost importu. W związku z embargiem nałożonym na Rosję i Białoruś, głównym eksporterem pellet stały się Stany Zjednoczone, a łączna ilość sprowadzonego na teren UE produktu wyniosła blisko 5,89 mln ton.

Na terenie Polski istnieje wiele zakładów produkujących certyfikowany pellet. Najwięcej firm funkcjonuje na terenie województw: śląskiego, opolskiego, lubelskiego, podlaskiego, lubuskiego, zachodniopomorskiego oraz pomorskiego (Polska Rada Pelletu, 2023).

#### 4.4. Przykładowe składnice drewna

Przykładowe składnice drewna są jednym z kluczowych elementów efektywności zakładów przetwórczych. Te znajdujące się przy tartakach są często pojmowane jako pierwszy dział tartaku, który służy do magazynowania i wstępnej fazy obróbki drewna tartacznego. Ich główne funkcje można przedstawić następująco (Jaszczyk, 2006):

- przyjęcie dostarczonego drewna,
- magazynowanie zapasu drewna zapewniającego ciągłość produkcji tartaku,
- wykonanie operacji mających na celu przygotowanie dostarczonego drewna do przerobu na materiały tarte,
- zapewnienie warunków umożliwiających utrzymanie składowanego drewna w niezmięnionej jakości.

Podstawową rolą przytartacznych składnic drewna jest dostarczanie do tartaku odpowiedniej ilości i jakości surowca we właściwym czasie. Pełnią również funkcję punktu rozdziału, stanowiąc bufor zapasów surowca niezbędny do uwzględnienia rozbieżności między prognozą sprzedaży, a rzeczywistym popytem (tj. błędem prognozy). Składnica przytartaczna łączy funkcje magazynu dystrybucyjnego z produkcyjnym. Magazyny dystrybucyjne przechowują różne ilości materiałów w zależności od zapotrzebowania klientów, natomiast magazyny produkcyjne przechowują zarówno surowce, półprodukty, jak i gotowe produkty związane z procesem produkcji lub montażu. Dlatego składnice drewna dążą zarówno do minimalizacji kosztów operacyjnych (dystrybucja), jak i maksymalizacji pojemności składowania (produkcja) (Trzcianowska, 2020).

Na składnicy surowiec drzewny i różne jego produkty są przechowywane przez określony czas. We współczesnych zautomatyzowanych składnicach utrzymuje się zazwyczaj małe zapasy drewna i dużą jego rotacyjność. Czas przechowywania drewna jest zależny od rodzaju surowca i jego przeznaczenia. Przyjmuje się, że przybliżony okres przechowywania dla poszczególnych sortymentów wynosi w Polsce: surowe dłużyce (drewno do dalszej manipulacji) do 5 dni (tj. 1-3% obrotu rocznego), kłody przemysłowe 5 - 10 dni, zrębki do 10 dni, użytkowe drewno stosowe do 14 dni, drewno opałowe - przez czas uzasadniony ekonomicznie (Suwała, 2000). Biorąc pod uwagę tylko drewno okrągłe, niejednorodność materiału stanowi istotny aspekt w jego przechowywaniu. Składnica może przyjmować, przechowywać i manipulować dłużyce i kłody o różnej długości oraz grubości, różnym pochodzeniu, różnych gatunków oraz o zmiennym poziomie wilgotności. Dlatego też składnice drewna odpowiadają za zarządzanie świeżością, jakością i ilością drewna, minimalizując jednocześnie utratę wartości drewna (Trzcianowska, 2020).

Przykładowe składnice drewna realizują operacje związane z przeładunkiem (rozładunek, transport wewnętrzny, załadunek) oraz w przypadku dużych składnic przytartacznych, procesem odbioru i manipulacji (pomiar, cięcie, sortowanie) (Trzcianowska i in., 2019). W Polsce obowiązuje zasada odbioru drewna w lesie, a więc na przykładowych składnicach drewna, z wyłączeniem dużych tartaków, ładunki drewna

są wyłącznie rozładowywane i składowane. Pojawiają się natomiast postulaty, żeby przenieść na nie również pomiary i manipulację surowca ze względu na problemy dotyczące rozliczenia prac wynikające z mnogości podmiotów realizujących pozyskanie drewna i jego transport (Malinowski, 2020).

Potrzeby optymalizacyjne operacji realizowanych na składnicach drewna dają szerokie możliwości nowym technologiom w celu usprawnienia zarządzania zasobami składnicy i magazynowanym surowcem. Równie ważne są innowacje dotyczące rozładunku i załadunku drewna. Technologia automatyzacji tych operacji jest obecnie opracowywana m.in. przez kanadyjskie centra badawcze FPInnovations i Uniwersytet Laval (Sharf i in., 2023). Projekt dotyczy prototypu autonomicznej ładowarki (bez operatora), której celem jest zwiększenie wydajności operacji, ale także przeciwdziałanie niedoborom pracowników w sektorze leśnym.

#### **4.5. Wyzwania dla zakładów przetwarzających surowiec drzewny w kontekście łańcucha dostaw**

Przed zakładami przetwórczymi drewna stoi wiele wyzwań natury ekonomicznej, ekologicznej i społecznej. Główne słabości funkcjonowania tych zakładów związane są z niedostępnością odpowiedniej ilości i jakości surowca do wytworzenia produktu końcowego, brakami w podstawowej i specjalistycznej kadrze pracowniczej, polityką ekologiczną Unii oraz często słabo wyposażonym parkiem maszynowym, zwłaszcza w zakładach funkcjonujących lokalnie i przecierających małe ilości drewna. Polityka ekologiczna Unii Europejskiej, w odniesieniu do swoich członków stawia ograniczenia w przerobie drewna, wymaganiach certyfikacyjnych (zwłaszcza *trackingu*) oraz w emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń. Wymienione wyzwania wpływają istotnie na łańcuch dostaw i obliczany dla produktu końcowego ślad węglowy.

Problemy z dostępnością surowca wynikają z ograniczenia pozyskiwania drewna w całej Europie, w tym także w Polsce. Wprowadzone na początku 2024 roku moratorium na pozyskiwanie drewna w polskich lasach (Majewski, 2024) wpływa negatywnie na zakłady przetwórstwa drzewnego w naszym kraju. Obecnie podaż jest znacznie niższa niż popyt, co sprawia, że w niektórych regionach, np. w północno-zachodniej części kraju, brakuje drewna do przerobu. Niesie to za sobą wzrost cen zakupu surowca w pozostałych regionach (Bagiński, 2022).

Analizując wpływ 10% zmniejszenia pozyskania drewna na przemysł drzewny, należy stwierdzić, że może ono w efekcie doprowadzić do likwidacji nawet blisko 5 tys. punktów przerobu. Natomiast ograniczenie pozyskania drewna o 40% dodatkowo spowoduje wydłużenie odległości transportowych surowców o ok. 65% oraz wzrost kosztów o ok. 40% (Balloun, 2021; Szypulska, 2024), co będzie skutkowało likwidacją nawet 90% podmiotów przerabiających drewno tartaczne z uwagi na duże ich rozdrobnienie.

Obecna sytuacja geopolityczna jeszcze dodatkowo pogłębia deficyt drewna w Polsce. Przed wojną w Ukrainie import drewna z krajów sąsiednich dopełniał podaż surowca na polskim rynku. Z kierunku wschodniego sprowadzano rocznie ok. 2 mln m<sup>3</sup> drewna rozdrobnionego, tzw. zrębków, które wykorzystywała polska energetyka oraz ok. 1 mln m<sup>3</sup> drewna do ich produkcji. Wojna w Ukrainie i sankcje wprowadzone na Rosję sprawiły, że eksport ze Wschodu został praktycznie zahamowany. Przerwano łańcuchy dostaw drewna



z Europy Wschodniej, zarówno jeśli chodzi o drewno nieprzetworzone, jak i półprodukty, które były sprowadzane z Rosji czy Białorusi. Dostawy drewna z Ukrainy zmalały o 75% i taki stan utrzyma się najprawdopodobniej w perspektywie najbliższych lat. Przykładowo do Polski w 2020 roku trafiło ok. 170 tys. m<sup>3</sup> tarcicy dębowej i 75 tys. m<sup>3</sup> tarcicy iglastej, a w 2021 roku już tylko odpowiednio 89 tys. m<sup>3</sup> i 72 tys. m<sup>3</sup> (Lenartowska, 2022).

Ograniczona dostępność surowca na rynku oraz wysokie ceny drewna hamują rozwój przedsiębiorstw, ich rentowność oraz utrudniają rekrutację i utrzymanie wykwalifikowanych pracowników ze względu na oferowane stawki. Dalsze limity pozyskania będą wiązały się ze zmniejszeniem zatrudnienia w sektorze leśno-drzewnym i wzrostem bezrobocia. Szacuje się, że zmniejszenie pozyskania o wspomniane zaledwie 10% może spowodować zwolnienia z pracy nawet 200 tys. osób zatrudnionych w sektorze leśno-drzewnym (Ballau, 2021). Należy podkreślić, że na obszarach wiejskich zakłady przetwórstwa drewna są często jednymi z największych pracodawców.

Wyzwaniem dla zakładów przetwórczych jest także nadążanie za zmieniającymi się normami i wymogami bezpieczeństwa związanymi z ochroną środowiska naturalnego czy wytwarzanymi produktami. Osiągnięcie neutralności klimatycznej w 2050 roku będzie wymagało od małych i średnich firm dużego zaangażowania i przyspieszenia działań związanych z ochroną środowiska. Obecnie największym wyzwaniem w tym zakresie jest brak powszechnej świadomości zmian związanych z transformacją energetyczną i obowiązkami sprawozdawczymi. Dyrektywa „*Corporate Sustainability Reporting Directive*” (CSRD) z 2022 roku nakłada obowiązek sprawozdawczy ujawniania śladu węglowego w raportach ESG na wszystkie duże oraz niektóre średnie i małe przedsiębiorstwa. Reszta przedsiębiorstw będzie musiała przygotowywać raporty już za trzy lata. Według danych z raportu firmy Colliers tylko 5% badanych przedsiębiorstw monitorowało i liczyło ślad węglowy (Ślusarz i Krysik, 2023).

Kolejnym wyzwaniem jest certyfikacja przewożonego do zakładów drewna. Rezygnacja kilku Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych z certyfikacji FSC (*Forest Stewardship Council*) wyraźnie osłabiła polskie zakłady przetwórstwa drewna na rynku europejskim. Oprócz FSC i certyfikatu PEFC (*Programme for Endorsement of Forest Certification*, oba z dopiskami odpowiednio CoC – *Chain of Custody* oraz FM – *Forest Management*) (Velvet, 2021), kolejną certyfikacją wymaganą przez Unię Europejską jest EUDR (*EU Deforestation Regulation*), która dotyczy identyfikowalności produktów z lasu do zakładów przetwórczych (*tracking* drewna). Celem tej certyfikacji jest ograniczenie nielegalnego pozyskania i handlu surowcem drzewnym, które wynikają z rosnącego popytu na drewno, papier i produkty pochodne przy ograniczonej podaży. Wprowadzenie identyfikowalności drewna i śledzenie jego drogi od pozyskania do produktu gotowego (*tracking*) pozwoli na zdobycie dokładniejszych informacji na temat łańcucha dostaw przemysłu drzewnego, a potencjalnie na jego optymalizację i łatwiejsze raportowanie śladu węglowego. Sam *tracking* jest dużym wyzwaniem dla zakładów przetwórczych, gdyż wcześniejsze ogniwa łańcucha dostaw nie dysponują odpowiednią technologią identyfikacji surowca. Dodatkowo zróżnicowany charakter procesu przetarcia drewna sprawia, że powszechne dyskretne oznaczenia, takie jak znaczniki RFID (*ang. Radio-frequency Identification*), nie nadają się do śledzenia pochodzenia każdego kawałka drewna (Jover i in., 2011). Jest to zatem wymóg, który poniesie za sobą kolejne duże nakłady finansowe firm przerabiających drewno.

Dla zakładów tartacznych ważnym wyzwaniem jest poprawa stanu posiadanych maszyn, technologii i narzędzi planowania produkcji. Obecnie w tartakach przeciera się ponad



15 mln m<sup>3</sup> drewna (FAO, 2022, 2020), ale w większości przestarzałym i dawno zamortyzowanym parkiem maszynowym. Infrastruktura, zwłaszcza małych tartaków, powstawała w latach 80-tych ubiegłego wieku. Maszyny były kupowane z Europy Zachodniej, często już silnie wyeksploatowane. Ze względu na potrzebę poprawy produktywności i wymogi ekologiczne konieczne są inwestycje w rozwój infrastruktury, a obecna sytuacja na rynku jest niestety spowalniaczem takich inwestycji.

Z kolei celulozownie i papiernie borykają się z problemem braku lokalnego surowca do wytwarzania mas celulozowych, a później papieru. Surowiec często dostarczany jest z odległych regionów i jest nim drewno sortymentu średniowymiarowego - papierówki oraz odpady z tartaków np. w postaci zrębków. W procesie produkcji bardzo ważna jest stała wielkość i wilgotność zrębków. Zrębki dostarczone z różnych źródeł często muszą być dodatkowo sortowane przed procesem, co podnosi koszty oraz zwiększa ślad węglowy obliczony dla cyklu życia gotowego produktu.

Wyzwaniami zakładów spalających biomasę leśną jest duża różnorodność dostarczanego materiału (wilgotność, skład, wielkość frakcji), konieczność posiadania dużej powierzchni składowania i trudności z transportem wynikające z małej gęstości nasypowej, trudności w utrzymaniu jakości paliwa na stałym poziomie związane z jego różnorodnością wymiarową, gatunkową itp. oraz duża zawartość związków alkaicznych. Do barier ekonomicznych zaliczyć można znaczne koszty pozyskiwania, przygotowywania i transportu, natomiast do barier technicznych te związane z koniecznością zastosowania odpowiednich technologii i rozwiązań technicznych dla indywidualnego użytkowania biomasy. Wyzwaniem dla małych zakładów jest konkurencja w zakupach surowca ze strony dotowanej za współspalanie drewna energetyki przemysłowej, a dla dużych zakładów niedostępność odpowiedniej jakości surowców energetycznych i wzrost ich cen, jak również wzrost cen zakupu praw do emisji CO<sub>2</sub>. Zakłady przetwórcze borykają się z niejasnymi przepisami prawa w zakresie uznania pozostałości poprodukcyjnych jako produktu ubocznego lub biomasy.

Według przedstawicieli różnych gałęzi sektora drzewnego w Polsce dużym wyzwaniem jest również niewystarczająca komunikacja pomiędzy osobami nadzorującymi pracę, a przedstawicielami PGL LP, co wpływa na nieefektywne planowanie dostaw drewna, znaczne odległości transportu surowca i różne lokalizacje jego ładunku. Aby ulepszyć funkcjonalność łańcucha dostaw w Polsce, powinno się wprowadzić szereg rozwiązań natury organizacyjnej, technologicznej i społecznej.

#### **4.6. Dobre praktyki w zakładach przetwórstwa drewna**

Nie ma jednej recepty na rozwiązanie problemu związanego z łańcuchem dostaw surowca do zakładów przetwórczych drewna, można jedynie zasugerować dobre praktyki w tym zakresie. Po pierwsze problemy z niedoborem drewna na rynku polskim istnieją od dawna. W ostatnich latach pogłębiają się na skutek ograniczenia pozyskiwania drewna w Polsce, limitu importu z krajów wschodnich czy eksportu drewna za granicę. Aby rozwiązać ten problem muszą współpracować ze sobą wszystkie organy branży leśnej w państwie takie jak instytucje i urzędy nadzorujące działalność leśną, PGL Lasy Państwowe, właściciele lasów prywatnych, organizacje branżowe i przedsiębiorcy. Wspólne działania powinny mieć na celu m.in. ograniczenie lub zahamowanie eksportu surowca drzewnego poza granice Unii

Europejskiej jak również wzmożone egzekwowanie przepisów dotyczących zaświadczeń fitosanitarnych. Część niedoboru można też będzie pokryć surowcem pochodzącym z lasów prywatnych, gdzie roczne możliwości pozyskania drewna mogą wzrosnąć z obecnych 4,6 mln m<sup>3</sup> grubizny netto, do około 7,6 mln m<sup>3</sup> w latach 2046–2050, a w optymistycznym scenariuszu nawet do 9,2 mln m<sup>3</sup> (Zajączkowski i Neroj, 2019).

W rozmowach dotyczących handlu drewnem pojawiają się postulaty o ważne zmiany w zasadach sprzedaży drewna, by te uwzględniły obniżenie wagi ceny do 60% przy restrykcyjnym weryfikowaniu oświadczeń kupujących dotyczących przetwarzania surowca w kraju. Cel minimalizacji odległości transportowych powinien wrócić jako jeden z głównych, poza cenowych kryteriów sprzedaży drewna. Kryterium to połączone z lepszą koordynacją dostaw drewna pozwoli zmniejszyć wielokilometrowe przejazdy samochodami wysokotonażowymi pomiędzy poszczególnymi miejscami załadunku, przekładające się na nieregularne dostawy surowca do zakładów przetwórczych, problemy ze składowaniem, zwiększenie kosztów i zanieczyszczenie środowiska naturalnego. Dobrym rozwiązaniem jest lokalny zakup drewna i transport surowca z odległości nie większej niż 120-150 km przy jak najmniejszej liczbie miejsc załadunkowych, jak również ograniczenie liczby sortymentów pozyskiwanych w lesie np. do dwóch długości dostosowanych do przerobu w zakładach przetwórczych. Obecnie jest około 20 rodzajów sortymentów (DGLP, 2019).

Z oceny aspektów środowiskowych najbardziej istotna jest emisja zanieczyszczeń emitowanych do powietrza, w tym pyłów, emisji z transportu, emisji z drewna i spalania trocin. Dodatkowo, w myśl idei „zero waste” każda kłoda, która wjeżdża na plac zakładu przetwórczego powinna być całkowicie wykorzystana. Pierwszym warunkiem jest tu odpowiednie składowanie w tartaku, aby zapobiec utracie jakości drewna w wyniku degradacji biologicznej lub chemicznej. Dodatkowo, odrębne strefy dla poszczególnych sortymentów usprawniają zaopatrzenie tartaku w odpowiedni surowiec, a także zarządzanie rotacją zapasów. Nieodłącznym elementem wyrobu surowca jest materiał poprodukcyjny, który zostaje całkowicie zagospodarowany. W troscie o środowisko zakłady przetwarzające drewno powinny być wyposażone w nowoczesne ekologiczne kotły na biomasę, które bezpośrednio wpływają na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> oraz innych szkodliwych substancji. W kotłach spalane byłyby pozostałości po obróbce drewna, m.in. zrębki i wióry. Dzięki temu zakłady powinny być samowystarczalne w kwestii ogrzewania suszarni oraz pozostałych budynków. Pozostałe sypkie produkty jak kora, trociny, popiół jak również zrębki, mogą być sprzedane lub wykorzystane w inny sposób.

W przypadku przyszłego obowiązku raportowania ilości śladu węglowego, powinny być dostępne powszechne szkolenia dla przedsiębiorców prowadzących działalność przetwórczą, aby mogli oni spełnić wymogi zgodne z rozporządzeniem CSRD w zakresie zrównoważonego rozwoju.

Zakłady przetwórcze powinny kontrolować wszystkie etapy cyklu produkcyjnego od zakupu i transportu surowca do zakładu poprzez przerób, suszenie oraz przechowywanie gotowego produktu. Uzyskując certyfikat FSC® (FSC® C005140) lub inne certyfikaty, zakłady wspierają działania proekologiczne, skupiające się na zrównoważonym użytkowaniu gruntów z pozytywnym wpływem na środowisko naturalne. Posiadanie certyfikatu na dany surowiec może przyczynić się do śledzenia przepływów materiału od dostawcy, przez producenta do końcowego odbiorcy gotowego produktu. Certyfikowany łańcuch dostaw obejmujący wszystkie elementy procesów zapewni, że na każdym etapie spełnione będą normy jakościowe i bezpieczeństwa produkcji, praw pracowniczych, lokalnej społeczności,

a drewno wykorzystane w procesie produkcyjnym zostało pozyskane z poszanowaniem środowiska naturalnego i nie pochodzi z terenów objętych ochroną, lecz z certyfikowanych lasów.

Pojawiające się technologie i nowe metody organizacji wprowadzone w kontekście Przemysłu 4.0, mogą poprawić efektywności procesów i zużycia zasobów. Przemysł 4.0 definiowany jest jako ten, który kryje w sobie integrację inteligentnych maszyn, systemów i sposobu wprowadzania zmian w procesach produkcyjnych dla osiągnięcia jeszcze lepszej wydajności i niższych kosztów. Oczekuje się zatem, że Przemysł 4.0 przyniesie wiele korzyści zarówno ekonomicznych, ekologicznych jak i społecznych (Oláh i in., 2020).

Dodatkowo ważne jest wykorzystanie w zakładach wielu elementów składowych systemów wspomagania decyzji DT (*ang. Digital Twins*) - o zdolnościach opisowych, predycyjnych i nakazowych, z możliwością optymalizacji i kontroli produkcji online oraz kontroli operacyjnej w tartakach (Chabanet i in., 2023). Producenci maszyn dostarczają symulatory oparte na rzeczywistych fragmentach oprogramowania obsługującego ich maszyny. Można oczekiwać, że taki system ograniczy utratę informacji pomiędzy różnymi etapami produkcji w zakładach i poprawi krótko- oraz średnioterminowe planowanie produkcji poprzez zmniejszenie niepewności, szczególnie co do specyfikacji surowca i oczekiwanej produkcji. Równie ważna jest koordynacja prac i wymiana informacji pomiędzy ogniwami łańcucha dostaw. Na przykład lepiej skoordynowane transporty drewna podniosą wydajność prac na przykładowym składzie drewna, co ma bezpośrednie przełożenie na wydajności i koszty operacyjne zakładu (Kogler i Rauch, 2020).

Systemy optymalizujące prace pozyskania i transportu drewna w połączeniu z systemami wspomagającymi procesy zarządzania zakładami przerobu drewna mogą stworzyć potężne narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji, umożliwiające koordynację i optymalizację zintegrowanych planów produkcyjnych w poszczególnych etapach łańcucha dostaw, mając na uwadze obliczanie śladu węglowego produktu gotowego.

Następnym krokiem są automatyzacja i robotyzacja logistyki składowania drewna i produkcji tartacznej, które pozwalają eliminować błędy, przyspieszyć pracę oraz zwiększyć jej bezpieczeństwo i ergonomię, ograniczyć straty materiału głównego i odpadów produkcyjnych. Niektóre tartaki, aby zmaksymalizować objętość wyjściową lub wartość produktu, już zautomatyzowały cięcie do tego stopnia, że o sposobie cięcia konkretnej kłody decyduje w czasie rzeczywistym program komputerowy (Chabanet i in., 2023; Maturana i in., 2010; Vanzetti i in., 2018).

## Podsumowanie rozdziału 4

Zakłady przetwórcze drewna są ostatnim etapem leśnego łańcucha dostaw i dlatego borykają się z wieloma wyzwaniem wynikającymi z funkcjonowania przedsiębiorstw na etapach wcześniejszych. Do głównych wyzwań stojących przed zakładami przetwarzającymi drewno, czyli tartakami, celulozowniami, papierniami, ciepłowniami, elektrowniami i elektrociepłowniami w Polsce, można zaliczyć problemy z niedostateczną ilością drewna do przerobu, w tym drewna certyfikowanego, niestabilność zasad sprzedaży drewna, zmniejszenie podaży drewna wynikające z polityki ekologicznej UE oraz wzrost cen zakupu praw do emisji CO<sub>2</sub>. Wymienione zakłady chcąc efektywnie pracować i osiągać zyski muszą dostosować się do istniejących warunków ekonomicznych, społecznych i środowiskowych.

Rozmieszczenie ich na terenie Polski związane jest głównie z profilem przedsiębiorstwa, dostępnością surowca oraz dostępnością do źródła wody.

Zakłady przetwórcze ze względu na specyfikę działania do produkcji wykorzystują znaczne ilości drewna, które zazwyczaj kupują od PGL LP, rzadziej od prywatnych właścicieli. Aby obniżyć koszty, drewno powinno być transportowane z jak najmniejszej odległości i powinno być dostarczane w sortymentach, najczęściej przerabianych przez zakłady. Zazwyczaj jednak drewno w różnej postaci przywożone jest i gromadzone w składnicach przyzakładowych, gdzie później podawane wstępnej obróbce oczekuje na przerób zależny od profilu przedsiębiorstwa. Składowanie drewna ma zagwarantować przedsiębiorstwu surowiec konieczny do ciągłego funkcjonowania. Braki wynikające z niedostatecznej ilości drewna do przerobu, zakłady rekompensują sobie poprzez poszukiwanie nowych dostawców często z zagranicy. Skutkuje to wzrostem kosztów transportu i podwyższeniem wartości śladu węglowego w gotowym produkcie. Aby nie doszło do zatrzymania funkcjonowania zakładu, niedobory konkretnych sortymentów prowadzą do korzystania z innych surowców drzewnych, niekoniecznie dostosowanych do profilu przedsiębiorstwa i nienajlepszych pod względem jakościowo-wymiarowym. Dużym problemem jest również ograniczona ilość dostępnego drewna certyfikowanego, co powoduje, że produkty wytwarzane w Polsce nie mogą konkurować z produktami zagranicznymi, ze względu na brak tychże certyfikatów. Szczególnie istotne jest to dla produktów z przemysłu tartacznego i celulozowo-papierniczego.

Pomimo istniejących problemów i wyzwań zakłady przetwórcze wykorzystują swoje szanse rozwojowe i efektywnie funkcjonują w europejskiej rzeczywistości, stanowiąc ostatni element łańcucha dostaw w leśnictwie.



## 5. WPŁYW ŁAŃCUCHA DOSTAW W LEŚNICTWIE NA ŚRODOWISKO NATURALNE

W niniejszym rozdziale opisano wpływ leśnego łańcucha dostaw na środowisko naturalne, szczególnie w kontekście bilansu węgla w ekosystemie leśnym. Poruszono w nim kwestie zmniejszania pokrywy leśnej i emisji gazów cieplarnianych wytwarzanych przez maszyny pracujące przy pozyskaniu, zrywce i transporcie drewna. Omówiono cele Polski dotyczące poziomu emisji gazów cieplarnianych w perspektywie najbliższych lat. Przedstawiono również negatywny wpływ na środowisko mniej związanych z bilansem węgla działań takich jak niszczenie pokrywy glebowej i uszkodzanie drzewostanu przez maszyny leśne.

Druga część rozdziału poświęcona jest dobrym praktykom, które mogą służyć redukcji negatywnego wpływu leśnego łańcucha dostaw na środowisko, takim jak: gospodarka obiegu zamkniętego, alternatywne źródła energii czy wreszcie dobre praktyki organizacyjne.

### 5.1. Wpływ łańcucha dostaw na bilans węgla w ekosystemie

#### 5.1.1. Zmniejszenie pokrywy leśnej

Negatywny wpływ pozyskania, zrywki i transportu drewna na środowisko przejawia się w wielu elementach składowych środowiska naturalnego lasu. Po pierwsze, pozyskiwanie drewna zmniejsza zasoby węgla pochłanianego i magazynowanego w lasach. Lasy w Polsce pochłaniają 27,6% wytwarzanych przez nas emisji gazów cieplarnianych, tj. 38,3 Mt eq CO<sub>2</sub> (Kozłowski i Szwaagrzyk, 2011; NFAP2019, 2019). To, czy sumarycznie więcej las emituje czy sekwestruje dwutlenku węgla z atmosfery, zależy od jego wieku. Najwięcej węgla drzewa pochłaniają w fazie intensywnego wzrostu i rozwoju, czyli ma to miejsce głównie w drzewostanach młodych i w średnim wieku, kiedy tempo wzrostu jest najszybsze (przyrost 1 m<sup>3</sup> drewna wiąże się ze średnią absorpcją 0,92 tony CO<sub>2</sub>) (Metz i in., 2007). Drzewa stare lub utrzymywane w przegęszczeniu w zasadzie nie przyrastają, co w praktyce oznacza, że wiążą niewiele węgla z atmosfery. Stare, zamierające lasy zdecydowanie więcej emitują dwutlenku węgla niż go pochłaniają. Po śmierci drzewa następuje powolny proces uwalniania węgla z drewna. Jego intensywność zależy od tempa rozkładu drewna, na który mają wpływ m.in. warunki wilgotnościowe i temperatura. Badacze (Paradis i in., 2019) oszacowali na 26 lat czas niezbędny dla drzewostanu po zrębie zupełnym, aby stać się pochłaniaczem węgla netto.

Opisując bilans węgla w lasach należy podkreślić, że ilość węgla w glebie i ściółce przekracza kilkakrotnie tą zmagazynowaną w nadziemnych częściach drzew (Weiner, 2020). W strefie klimatu umiarkowanego, w glebie lasów liściastych zmagazynowane jest średnio 228 t węgla/ha, a w lasach iglastych 204 t/ha (Jobbágy i Jackson, 2000). Na wielkość glebowej puli węgla znaczący wpływ mogą mieć zabiegi gospodarcze, zwłaszcza pozyskanie drewna oraz przygotowanie gleby pod odnowienia. Pozyskanie drewna może wpływać na produktywność obszarów leśnych poprzez usuwanie składników odżywczych i materii organicznej oraz naruszanie gleby, jednak badania w różnych regionach i kontynentach



udokumentowały bardzo zróżnicowane reakcje lasów, co utrudnia wyciągnięcie ogólnych wniosków (Vance i in., 2018).

Nie można również zapomnieć o wpływie lasu na bilans energetyczny Ziemi, który determinuje zmiany klimatyczne. Bilans ten jest wyrażany współczynnikiem odbicia lub albedo Ziemi. Jest to stosunek ilości światła lub promieniowania odbitego do padającego. Im wyższe albedo, tym więcej energii jest odbijane z powrotem w kosmos, poza atmosferę. Ciemne powierzchnie drzew pochłaniają promieniowanie słoneczne (ocieplenie klimatu), podczas gdy jaśniejsze powierzchnie śniegu i lodu odbijają je z powrotem w przestrzeń kosmiczną (ochładzanie klimatu). Pozyskanie drewna wpływa na czasowe zmiany albedo ze względu na powierzchnie zrębowe. Ciemniejsze od pokrywy leśnej powierzchnie gleby powodują zwiększoną absorpcję promieniowania słonecznego i tym samym ocieplenia klimatu. Natomiast faktem jest, że pokrywa śnieżna zalegająca na zrębach, w ilości znacznie większej niż w koronach drzew znacząco wpływa na ochładzanie klimatu. Zwiększone wykorzystanie pozostałości po wyрубie i zwiększone pozyskanie drewna okrągłego zmieniają albedo lasów, powodując na ogół efekt chłodzenia, który częściowo zrównoważy efekt ocieplenia wynikający ze wzrostu emisji CO<sub>2</sub> netto. Wpływ albedo na klimat może być jednak znacząco modyfikowany przez efekty lokalne (Birdsey i in., 2018).

Lasy odgrywają niejednoznaczną rolę w łagodzeniu zmiany klimatu, ponieważ posiadają znaczny potencjał sekwestracji dwutlenku węgla oraz stanowią źródło odnawialnych surowców energetycznych. Pozyskiwanie drewna zmniejsza zasoby węgla w lasach (ujemny bilans węgla w lesie), a tym samym zmniejsza jego zdolność do pełnienia roli rezerwuaru węgla (Erb i in., 2018). Z drugiej strony mniejsze pozyskanie, czyli dodatni bilans węgla w lasach, oznacza mniej drewna dla społeczeństwa na potrzeby usług energetycznych i materialnych, szczególnie w celu zastąpienia produktów z paliw kopalnianych (Pingoud i in., 2018).

### 5.1.2. Emisja gazów cieplarnianych związanych z pracami leśnymi

Jednym z najczęściej wymienianych źródeł zmian klimatycznych są emisje gazów cieplarnianych, czyli ślad węglowy. Operacje realizowane w leśnym łańcuchu dostaw powodują zwiększanie śladu węglowego przedsiębiorstw sektora leśno-drzewnego. Ślad węglowy przedsiębiorstwa możemy zdefiniować jako sumę emisji i magazynowania gazów cieplarnianych w granicach tego przedsiębiorstwa oraz w łańcuchu wartości, wyrażonej w równoważnej masie dwutlenku węgla (kg CO<sub>2</sub>e). Definicja śladu węglowego odnosi się do metodyki oceny cyklu życia produktu (*Life Cycle Assessment - LCA*) (*ISO 14040*, 2006) lub też Standardu Gazów Cieplarnianych (GHG Protocol, 2024). LCA, opracowana na podstawie badań zużycia energii na poziomie systemowym, stała się ustandaryzowanym protokołem badania efektywności środowiskowej produktu, procesu lub usługi w całym cyklu życia lub dowolnej jego części (Guinée i in., 2011). Analizy LCA mogą również dostarczyć przydatnych informacji na temat „gorących punktów” emisji w całym łańcuchach dostaw. Dlatego poza bezpośrednimi emisjami gazów cieplarnianych związanymi ze spalaniem paliw, ślad węglowy powinien również obejmować emisje, które pochodzą ze źródeł niekontrolowanych przez przedsiębiorstwo, a zatem dostawców, odbiorców i klientów (de la Fuente i in., 2017).

Kalkulacja śladu węglowego obejmuje zazwyczaj emisje siedmiu gazów cieplarnianych: dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), metanu ( $\text{CH}_4$ ), podtlenku azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ), fluorowęglowodorów (HFCs), perfluorowęglowodorów (PFCs), heksafluorku siarki ( $\text{SF}_6$ ) i trifluorku azotu ( $\text{NF}_3$ ). Gazy te w różnym stopniu przyczyniają się do globalnego ocieplenia. Przykładowo zgodnie z aktualnymi wytycznymi, jedna tona metanu wpływa na klimat w takim stopniu jak 29,8 tony dwutlenku węgla (IPCC, 2023). Uwzględnienie tych różnic i przedstawienie całkowitego wpływu na klimat z różnych źródeł jest możliwe dzięki przeliczeniu ilości każdego z emitowanych gazów cieplarnianych na równoważną masę dwutlenku węgla, tzw. ekwiwalentu ( $\text{kg CO}_2\text{e}$ ) i zsumowanie ich do jednej wartości. Na świecie używa się kilku standardów publikujących wartości równoważnej masy  $\text{CO}_2$ . Oprócz najbardziej znanego IPPC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), inne używane standardy to amerykańska EPA (*Environmental Protection Agency of the United States of America*) i brytyjska DEFRA (*UK Department for Environment, Food and Rural Affairs*).

W sektorze leśnym, emisje gazów cieplarnianych określa się najczęściej na podstawie ilości zużytego paliwa przez sprzęt i maszyny leśne według ich rodzaju, dodając odpowiednie współczynniki ekwiwalentu emisji  $\text{CO}_2$  obrazujące potencjał globalnego ocieplenia. Zużycie paliwa definiuje się jako ilość paliwa w litrach zużytego przez maszynę w ciągu jednej godziny jej pracy, a więc jednostką miary jest zazwyczaj l/h. Zużycie paliwa w harwesterach i forwarderach tradycyjnie mierzy się za pomocą przepływomierza masowego lub określa się poprzez pomiar ilości paliwa wprowadzonego podczas jego uzupełniania (Bacescu i in., 2022). Należy przy tym zaznaczyć, że wiarygodność tych danych warunkuje adekwatną analizę śladu węglowego.

Są również przeprowadzane badania, w których ślad węglowy określa się dokładniej, według zawartości węgla w paliwie. Najdokładniejszą metodą określenia zawartości węgla w paliwie jest analiza chemiczna paliw. W badaniach dotyczących sektora leśnego najczęściej podawaną zawartością węgla jest 0,732 kg/l (Prinz i in., 2018a).

### 5.1.3. Źródła emisji i ich wielkość

Chociaż emisje gazów cieplarnianych z działalności leśnej stanowią jedynie ułamek sekwestracji dwutlenku węgla powstałej w wyniku wzrostu drzew, od dawna istnieją możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych w ramach gospodarki leśnej (Sonne, 2006). Badacze ustalili, że emisje pochodzące z pozyskania, transportu i produkcji stanowią mniej niż 10% wszystkich emisji pochodzących z produktów drzewnych w Stanach Zjednoczonych (Hudiburg i in., 2019). Głównym źródłem emisji był rozkład produktów drzewnych w trakcie ich żywotności. Chociaż wydajność prac pozyskiwania wzrosła dzięki rozwojowi mechanizacji, są one w dalszym ciągu odpowiedzialne za większość emisji w łańcuchu wartości drewna ze względu na duże zużycie paliw kopalnych (Dias i Arroja, 2012).

Dostępnych jest obecnie wiele publikacji, w których analizowane są emisje gazów cieplarnianych w poszczególnych etapach leśnego łańcucha dostaw. Pragniemy przytoczyć tylko kilka przykładów, żeby zobrazować rząd wielkości emisji powstałych podczas pozyskania, zrywki i transportu drewna. Jak podano w literaturze (Berg i Karjalainen, 2003), całkowite emisje z zarejestrowanych działań leśnych w Szwecji i Finlandii wyniosły od 9,1 do 10,6  $\text{kg CO}_2/\text{m}^3$ . W badaniach, które obejmowały cały łańcuch dostaw, od pozyskania drewna po jego transport na składnicę drewna (Lijewski i in., 2017), zużycie paliwa na

jednostkę produktu wahało się od 1,02 do 1,48 l/m<sup>3</sup>, a emisja CO<sub>2</sub> od 2,8 do 4,0 kg/m<sup>3</sup>. Inni badacze (Abbas i Handler, 2018) podali, że podczas pozyskiwania i transportu drewna okrągłego w Nowej Zelandii, w zależności od odległości transportu, emituje się od 22,9 do 49,0 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub>/t. Kolejne dane (Kühmaier i in., 2022) pokazują, że w roku 2018 w Austrii, łącznie wyemitowano 492 tys. t ekwiwalentu CO<sub>2</sub> podczas pozyskania i transportu 19,2 mln m<sup>3</sup> drewna. Odpowiada to 25,63 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub> na m<sup>3</sup>.

Każdy łańcuch dostaw działa w innym kontekście operacyjnym, co determinuje który jego etap wytwarza najwięcej emisji. W szwedzkim łańcuchu dostaw najwięcej emisji gazów cieplarnianych wytwarza etap pozyskania drewna, podczas gdy w Finlandii dominuje w tym zakresie wtórny transport drewna (Berg i Karjalainen, 2003). W Nowej Zelandii natomiast ponad 60% emisji jest związane z pozyskaniem, a 40% przeznaczono na transport produktów do docelowych zakładów przetwórczych. W Stanie Tennessee (Stany Zjednoczone) również udział pozyskania w wytwarzaniu emisji jest większy niż transportu: 20,1 w porównaniu z 16,6 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub>/t (Abbas i Handler, 2018). Jak donoszą inne badania, zużycie paliwa przy pozyskaniu stanowiło 38% całkowitego paliwa zużytego w cyklu technologicznym (Lijewski i in., 2017), czyli było wyższe niż zużycie podczas zrywki (27%) i transportu (35%). Jednak z drugiej strony, wyniki (Kühmaier i in., 2022) pokazują, że transport drewna stanowi największy udział w emisji w łańcuchu dostaw (77%), dalej zrywka (14%), ścinka i obróbka (5%), a rozdrabnianie powoduje jedynie 4% emisji.

Zużycie paliwa przez maszyny leśne jest skorelowane z tymi samymi czynnikami, które wpływają na wydajność pracy. Spośród wszystkich czynników największy wpływ na zużycie paliwa na m<sup>3</sup> w procesie ścinki ma średni rozmiar pnia, intensywność usuwania i zabiegi leśne, rodzaj zagospodarowania lasów, natomiast w procesie zrywki jest to odległość transportu, intensywność usuwania i wielkość ładunku. Inne czynniki wpływające to: rodzaj gleby (gleba mineralna lub torfowisko), wykorzystanie gąsienic zamiast kół jezdnych, rodzaj sortymentu i wielkość maszyny. Na podstawie licznych publikacji, możemy więc wyodrębnić następujące główne czynniki wpływające na wytwarzanie emisji w pozyskaniu i zrywce drewna:

- stopień zmechanizowania operacji:  
Emisje gazów cieplarnianych podczas ścinki, okrzesywania i cięcia poprzecznego drewna są znacznie niższe w przypadku używania pilarki spalinowej w porównaniu z harvesterem (Kühmaier i in., 2022), pomimo znacznie niższej wydajności pilarki. Wykazano natomiast, że niski poziom zmechanizowania pozyskania przy użyciu pilarki i ciągnika nie jest alternatywą dla systemu w pełni zmechanizowanego (harvester i forwarder) w zakresie emisji gazów cieplarnianych (Labelle i Lemmer, 2019). Z tych ustaleń wynika, że system w pełni zmechanizowany wyemitował mniej CO<sub>2</sub> niż system złożony z pilarki i ciągnika (3,08 versus 4,42 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>).
- wielkość maszyn/rodzaj cięcia:  
Moc silników maszyn leśnych użytkowanych w systemie CTL odpowiada za większość różnic w godzinowym zużyciu paliwa zarówno przez harwestery, jak i forwardery. Średnie zużycie paliwa na m<sup>3</sup> jest dwukrotnie wyższe w przypadku harwesterów trzebieżowych niż w przypadku dużych harwesterów do rębni zupełnych (Eliasson i in., 2023). Zużycie paliwa dla forwarderów na m<sup>3</sup> było niższe w przypadku największych maszyn ze względu na ich większy średni ładunek oraz eksploatację w korzystniejszych lokalizacjach, gdzie odległość przejazdu w przeliczeniu na m<sup>3</sup> była krótsza, a ilość zebranego drewna z danej powierzchni była większa. Średnie zużycie paliwa na m<sup>3</sup>

wahało się od 1,4 do 3,4 l, w zależności od wielkości maszyny, wielkości kłód i odległości zrywki.

– użytkowanie maszyn:

Oprócz wymienionych czynników kluczowa jest rola operatora maszyny. Zależy ona od dwóch odrębnych umiejętności: zdolności do osiągnięcia wysokiej produktywności oraz technik zapewniających jak najniższe zużycie paliwa (Kärhä i in., 2024a). Ustawienia parametrów pracy maszyny mają również wpływ na zużycie paliwa, najnowsze maszyny są wspomagane różnymi trybami pracy, w tym trybem ECO pozwalającym na redukcję spalania paliwa i tym samym emisji. Ponadto montaż dodatkowych elementów umożliwiających pracę w trudnych warunkach, takich jak np. gaśnice powoduje często wyraźny wzrost zużycia paliwa, który został oszacowany na 1,82 l/h (Kärhä i in., 2024a).

Mimo, iż najwięcej miejsca w badaniach dotyczących emisji gazów cieplarnianych w sektorze leśnym poświęca się pozyskaniu i zrywce, nie można zapomnieć o transporcie surowca drzewnego z miejsca pozyskania do zakładu przetwórczego. Transport jest bardzo ważnym źródłem emisji gazów cieplarnianych i odpowiada za 28% wszystkich emisji w UE i 33% emisji samego CO<sub>2</sub> (Koleśnikow i in., 2024). Wielkość ładunku i przejechany dystans są podstawą miary wydajności energetycznej transportu. Z badań wynika (Eickman i Ratecki, 2003), że emisja dwutlenku węgla na tonokilometr w Niemczech wyniosła około 63% więcej dla ciągnika siodłowego niż dla pociągu z 20 wagonami. Dzięki wykorzystaniu bardziej ekologicznych źródeł energii, kolej charakteryzuje się najniższą emisją gazów cieplarnianych, która stanowi zaledwie jedną trzecią emisji wytwarzanych przez ciężarówkę do przewozu drewna okrągłego (9,39 ekwiwalentu CO<sub>2</sub> na m<sup>3</sup> względem 26,95 ekwiwalentu CO<sub>2</sub> na m<sup>3</sup>) (Kühmaier i in., 2022).

#### 5.1.4. Cele dotyczące poziomu emisji gazów cieplarnianych

W Europejskim Zielonym Ładzie i Europejskim Prawie Klimatycznym zapisany jest cel osiągnięcia przez UE zerowych emisji netto najpóźniej w roku 2050 oraz pośredni cel redukcji emisji netto o 55% wobec roku 1990 najpóźniej w roku 2030 (Dzienniki UE, 2019). Pakiet obejmuje inicjatywy z wielu sektorów gospodarki, które dzięki stosowaniu całościowego i międzysektorowego podejścia przyczyniają się do osiągnięcia nadrzędnego celu klimatycznego. Dla całego sektora transportu wyznaczono cel 90% redukcji emisji do roku 2050. Natomiast największy spadek emisji gazów cieplarnianych ma nastąpić w transporcie drogowym – w zależności od przyjętego scenariusza od 38% do 54% (Koleśnikow i in., 2024). Od 2027 r. powstanie odrębny system handlu emisjami dla transportu drogowego pod nazwą ETS II (Guillot, 2023), który znacznie wpłynie na organizację transportu drewna i jego pochodnych, zwłaszcza że cena europejskich uprawnień do emisji stale rośnie. Opłata ta zwiększa koszty dostaw drewna, jeśli w maszynach leśnych i transportowych wykorzystuje się paliwa kopalne lub jeśli wykorzystanie zasobów drewna nie jest zrównoważone.

W Polsce ramy transformacji energetycznej wyznacza dokument pt. „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku” - PEP2040 (M.P. 2021 poz. 264, 2021). Zawiera strategiczne założenia w zakresie doboru technologii służących budowie niskoemisyjnego systemu energetycznego. Ustawowym celem polityki energetycznej państwa jest

bezpieczeństwo energetyczne przy zapewnieniu konkurencyjności gospodarki, efektywności energetycznej i zmniejszenia oddziaływania sektora energii na środowisko. Cele szczegółowe PEP2040 obejmują cały łańcuch dostaw energii – od pozyskania surowców, przez wytwarzanie i dostawy energii, po sposób jej wykorzystania i sprzedaży. Według PEP2024, w długiej perspektywie rozwój alternatywnych źródeł energii, w tym technologii wodorowych przy jednoczesnym rozwoju łańcucha wartości gospodarki wodorowej będzie narzędziem dekarbonizacji transportu i przemysłu. Jednakże dekarbonizacja operacji w leśnym łańcuchu dostaw musi bazować na obecnych rozwiązaniach optymalizacji prac. Rozwijanie rynków paliw alternatywnych może ten cel jedynie dopełnić.

### 5.1.5. Degradacja pokrywy glebowej i uszkodzanie drzewostanów

Poza emisjami gazów cieplarnianych, negatywny wpływ na środowisko prac leśnych odzwierciedla się również w degradacji gleby i drzewostanu pozostającego po wykonaniu zrzębu. Negatywny wpływ na pokrywę glebową wynika głównie ze zrywki drewna, powodującej ugniatanie gleby, czy powstawanie głębokich kolein, co prowadzi do zmian warunków wodnych, powietrznych i cieplnych gleby (Picchio i in., 2020). Zmiany w glebie mogą zakłócić funkcjonowanie i produktywność ekosystemu leśnego. Wielkość deformacji gleby podczas zrywki uzależniona jest od rodzaju gleby i jej wilgotności, a także od czynników technologicznych, takich jak naciski jednostkowe wywierane przez maszynę oraz obecność i jakość mat ochronnych (Labelle i Jaeger, 2012; Połtorak i in., 2018).

Wyniki badań (Nazari i in., 2021) wskazują, że negatywne znaczenie ma przede wszystkim nie tyle masa pojazdów, co częstość przejazdów. Większość szlaków zrywkowych jest użytkowana intensywnie tylko co 10 lat, znacznie częściej użytkowane są drogi leśne. Częstotliwość tego użytkowania zależy od kategorii drogi, a dokładniej od liczby obsługiwanych przez nią oddziałów i wydzieleni leśnych (Affek i in., 2019). W przypadku coraz większej fragmentaryzacji działań gospodarczych, większa powierzchnia lasów będzie rozjeżdżana przez maszyny leśne, a w przypadku rębni częściowych problem ten się jeszcze pogłębi.

Mimo pozytywnego wpływu rębni częściowych na tworzenie zróżnicowanej struktury wiekowej i przestrzennej drzewostanów, poszczególne wydzielenia są wolne od cięć tylko przez stosunkowo krótki czas, a pozyskanie drewna jest rozproszone na całym obszarze nadleśnictwa. Ponieważ współczesne działania związane z pozyskiwaniem drewna są prowadzone równolegle w wielu oddziałach leśnych i na dużych przestrzeniach, to rozległe obszary lasów są regularnie penetrowane przez ciężki sprzęt leśny, tworząc nowe bądź „odświeżając” istniejące już drogi leśne i szlaki zrywkowe. Należy przy tym dodać, że proces regeneracji gleb leśnych jest długotrwały, co najmniej 20-30 lat zajmuje powrót jej właściwości fizycznych do stanu sprzed pozyskania (Cambi i in., 2015; DeArmond i in., 2023, 2019; Ezzati i in., 2012).

Negatywne oddziaływanie pozyskiwania oraz zrywki drewna polega nie tylko na powstawaniu uszkodzeń wierzchniej warstwy gleby, ale również na wywieraniu dużej presji na organizmy zamieszkujące las (Paschalis i Porter, 1994). Oprócz tego, stosowanie wysokowydajnych maszyn, chociażby ze względu na ich gabaryty, uszkodza też pozostające na zrzębie i przy szlakach zrywkowych drzewa, narusza ich systemy korzeniowe powodując utratę zdolności dalszego wzrostu oraz niszczy podrosty i naloty (Kubiak, 1998; Porter,

1997). Konsekwencjami uszkodzeń drzew są bezpośrednie uszkodzenie drewna mające znaczący wpływ na jego klasyfikację jakościowo-wymiarową oraz narażanie drzew na infekcje przez patogeny (Vasiliauskas, 2001). Ostatecznie może to skutkować powstaniem ubytków w pniu i zmniejszeniem wartości produktów leśnych (Grigorev i in., 2021).

Na wielkość uszkodzeń drzew mają wpływ następujące czynniki: technologia pozyskania, budowa i zagęszczenie drzewostanu, rozmieszczenie szlaków zrywkowych i pora roku (Alakukku i in., 2003). Najmniej uszkodzeń drzewostanu występuje przy zastosowaniu metody drewna krótkiego (Karaszewski i in., 2013) ze zrywką nasiębierną wykonywaną forwarderem (Stańczykiewicz, 2003). Bezpośrednio na liczbę uszkodzeń, poza parametrami drzewostanu i maszyn, wpływa praca człowieka i jego wykształcenie. W przypadku doświadczonego operatora poziom uszkodzeń zazwyczaj nie przekracza 1%, w przypadku pracownika o krótkim stażu, wynosi on już ponad 5% (Maciak i Popczyński, 2019). W Polsce akceptowalny poziom uszkodzeń pozostałego drzewostanu po częściowym pozyskaniu drewna wynosi 5%.

## **5.2. Dobre praktyki w celu przeciwdziałania negatywnemu wpływowi na środowisko**

### **5.2.1. Racjonalne pozyskiwanie i wykorzystywanie surowca**

W raporcie pt. „*Climate Change and Land*” (IPCC, 2023) wskazano najwyższy maksymalny techniczny potencjał łagodzenia skutków zmian klimatycznych w sektorze leśno-drzewnym w zalesianiu i odnawianiu powierzchni, ograniczaniu wylesiania oraz wytwarzaniu bioenergii połączonej ze składowaniem węgla w długotrwałych drewnianych produktach. W raporcie podkreślono także zwiększone zasoby węgla w lasach i gruntach jako jeden z najbardziej opłacalnych i wykonalnych środków usuwania dwutlenku węgla w celu wygenerowania ujemnych emisji wymaganych do ograniczenia globalnego ocieplenia poniżej 2°C. Ekosystem leśny powoduje również tak zwane biofizyczne skutki klimatyczne, tj. albedo i wtórne aerozole organiczne. Powszechnie wiadomo, że cząstki aerozolu są odpowiedzialne za największą niepewność w przewidywaniach zmian klimatycznych (IPCC, 2023).

Według analiz przeprowadzonych w Kanadzie (Giasson i in., 2023), zmniejszenie pozyskania prowadzi do zwiększenia sekwestracji węgla tylko w krótkiej lub w średniej perspektywie czasu (do 50 lat). Powyżej 50 lat, mniejsze pozyskanie doprowadzi do zmniejszenia pochłaniania, mimo, iż kumulatywna wartość węgla będzie większa. Według tych autorów dobrym rozwiązaniem prowadzącym do zwiększenia poziomu sekwestracji węgla może być realizacja pozyskania za pomocą rębni częściowych przy tej samej miąższości, wydłużona rotacja drzewostanów oraz zwiększenie wydajności tartaków i udziału długotrwałych produktów z drewna. Strategie oparte na ochronie zasobów leśnych są efektywne w krótkim horyzoncie czasowym, natomiast drzewostany chronione są bardziej wrażliwe na klęski żywiołowe takie jak pożary lasów, epidemie owadów, wichury powodujące powstawanie wiatrołomów i tym samym na uwolnienie zgromadzonego węgla. Dostarczają one również znacznie mniej surowca drzewnego, niezbędnego do zaspokojenia potrzeb regionalnych i krajowych. Inne analizy z Ameryki Północnej i Europy (Chen i in.,



2018; Gustavsson i in., 2017; Smyth i in., 2020) sugerują, w kontekście produkcji drewna używanego w budownictwie, lepszy wpływ na mitygację zmian klimatycznych strategii intensyfikacji produkcji z większym udziałem drzewostanów dojrzałych niż ochrony zasobów leśnych.

Innym ze sposobów ograniczenia emisji gazów cieplarnianych powstających w wyniku produkcji, używania produktów i paliw kopalnych jest zastąpienie ich produktami oraz paliwami drewnopochodnymi. Zwiększone wykorzystanie produktów i paliw drewnopochodnych może ograniczyć emisję gazów cieplarnianych poprzez efekt substytucyjny i ograniczyć wydzielanie CO<sub>2</sub> do atmosfery poprzez zwiększenie zasobów węgla w produktach długotrwałych (Seppälä i in., 2019). Dzięki rozwojowi technologii drewna może ono być dzisiaj używane nie tylko w tradycyjnym budownictwie jednorodzinnym, ale także do budowy wielopiętrowych budynków mieszkalnych i usługowych (Kozłowski, 2019). Zasadniczo większość produktów wykonanych z surowców kopalnych może być wykonanych z surowca drzewnego, począwszy od produkcji energii, materiałów budowlanych, mebli, papieru do wielu różnych produktów pochodzenia biologicznego, takich jak tekstylia na bazie drewna, materiały opakowaniowe, włókno węglowe, tworzywa sztuczne pochodzenia biologicznego i kompozyty (Tuomasjukka i in., 2021). Jednakże badania Booth (2018) wykazały, że w przeciwieństwie do neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla, powszechne wykorzystanie drewna do celów bioenergii skutkuje wzrostem netto CO<sub>2</sub> w atmosferze, w zależności od źródła paliwa i alternatywnego wykorzystania spalonego surowca. W ostatnich latach toczyło się wiele dyskusji na temat optymalizacji zasobów węgla w lasach i kompromisu pomiędzy wzrostem wykorzystania biomasy leśnej a ochroną różnorodności biologicznej (Johansson, 2018). Dlatego coraz ważniejsza jest optymalizacja i zwiększanie dostępności biomasy leśnej dzięki nowym, innowacyjnym praktykom w zakresie gospodarki leśnej, w tym rozwiązaniom cyfrowym i oprogramowaniu do zarządzania różnego rodzaju zasobami. Zmiany mające na celu zwiększone pozyskanie drewna i zwiększoną wydajność powodują jednak określone skutki gospodarcze, środowiskowe i społeczne, które należy wziąć pod uwagę przy kształtowaniu polityki ekologicznej (Tuomasjukka i in., 2021).

### **5.2.2. Alternatywne źródła zasilania maszyn**

Innym obszarem redukcji emisji gazów cieplarnianych w leśnym łańcuchu dostaw będzie, w bliskiej przyszłości, przechodzenie z paliw kopalnych na biopaliwa, paliwa wodorne, biometan i elektryczne źródła energii.

Biopaliwa są jednym z najważniejszych rodzajów paliw alternatywnych i odpowiadały w 2022 roku za 4,4% zużycia paliw w transporcie w Unii Europejskiej (Parlament Europejski, 2022). Do ich produkcji stosuje się coraz częściej biomasę leśną, która jest uznawana za najbardziej obiecujący zasób odnawialny do produkcji produktów, które mogą zastąpić paliwa kopalniane (Pang, 2019). Do głównych bezpośrednich zalet stosowania biopaliw zalicza się ich odnawialność, nietoksyczność, wyższą temperaturę zapłonu i wyższą biodegradowalność.

Coraz częściej podejmowane są próby wiązania przyszłości motoryzacji z wodorem. Wodór jako nośnik energii jest jedynym paliwem potencjalnie wolnym od emisji

węglowodorów, tlenu i dwutlenku węgla. Z uwagi na właściwości fizyczne wodoru, jego ekologiczny charakter (produktem jego spalania jest jedynie para wodna) i możliwości produkcyjne przedsiębiorstw w Polsce, kwestia ta cieszy się rosnącym zainteresowaniem. Ocenia się, że w horyzoncie czasowym do 10 lat zapotrzebowanie na wodór w sektorze transportu w Polsce wzrośnie ponad siedmiokrotnie (Zapałowska, 2022). Według PEP2040 przy odpowiednim rozwoju technologicznym do 2030 roku będzie możliwe wykorzystanie 2-4 GW mocy z instalacji OZE do produkcji zielonego wodoru.

Kolejnym paliwem, które zajmuje ważne miejsce w strategii energetycznej Polski, jest biometan. Wykorzystanie biometanu w transporcie ciężkim jest niezbędne do przeprowadzenia jego skutecznej dekarbonizacji, gdyż charakteryzuje się on niższym w porównaniu do innych paliw poziomem emisji gazów cieplarnianych. Kluczowym rozwiązaniem w kontekście osiągnięcia ujemnych emisji dwutlenku węgla jest technologia *Bioenergy with carbon capture and storage* (BECCS), zakładająca produkcję energii z biomasy przy jednoczesnym pochłanianiu i magazynowaniu jego emisji.

Kolejny duży potencjał tkwi w elektryfikacji operacji leśnego łańcucha dostaw. Ze względu na niewystarczające pojemności obecnych akumulatorów dla ciężkich maszyn leśnych, wiele uwagi poświęca się systemom hybrydowym. Są one dobrym przykładem kierunku rozwoju maszyn, które stanowią alternatywę dla pojazdów napędzanych wyłącznie energią elektryczną lub silnikiem wysokoprężnym. Systemy hybrydowe są w stanie magazynować nadwyżkę energii wytwarzanej przez silnik wysokoprężny w okresach niskiego obciążenia do wykorzystania w okresach szczytowego obciążenia (Einola, 2013). Zmniejsza się również negatywny wpływ na środowisko w zakresie wielkości wytwarzanych emisji i wymagana jest rzadsza konserwacja maszyn (Pandur i in., 2021).

Obecnie testuje się już ciężkie maszyny wyposażone w wydajne (hybrydowe, elektryczne) źródła zasilania (Lindroos i in., 2017): ładowarki, harwestery, forwardery i rębarki. Maszyny budowlane, takie jak ładowarki i koparki, wyposażone w hybrydowo-elektryczny układ napędowy o mniejszej kompleksowości mechanicznej, zużywają średnio od 25 do 40% mniej paliwa (Rong-Feng i in., 2017). Pierwszymi harwesterami hybrydowymi były maszyny wyprodukowane przez firmę Logset: 12H GTE Hybrid (do zrębów zupełnych) w 2016 roku i 8H GTE Hybrid (do trzebieży) w 2019 roku (Torbjörn, 2019, 2017). Według danych producenta, model 12H GTE Hybrid charakteryzuje się większą mocą silnika o 72% i niższym zużyciem paliwa o 20 – 30% w porównaniu do swojego poprzednika z silnikiem Diesla. Fińska firma Ponsse, wprowadziła w 2022 roku elektryczny model forwardera EV1 o ładowności 15 ton (Jakubek, 2022). Prototypowy forwarder ma w pełni elektryczny układ napędowy i hybrydową jednostkę sterującą. Forwardery z przekładnią elektryczno-hybrydową charakteryzują się niższym zużyciem paliwa od 20% do 50% w porównaniu do standardowej przekładni hydrostatyczno-mechanicznej.

Z drugiej strony, analizowane prototypy nie zapewniają jeszcze produktywności podobnej do maszyn z silnikami spalinowymi (Prinz, 2019). Zwykle mniejsze zużycie paliwa jest związane z mniejszą wydajnością maszyn, co zostało stwierdzone w przypadku pierwszej hybrydowej rębarki do drewna Kesla C 860 H (Prinz i in., 2018a). Mimo mniejszej produktywności, maszyny hybrydowe są często chwalone przez swoich użytkowników za większy komfort pracy, w tym znacznie mniejszy hałas generowany w czasie pracy maszyny, co może mieć znaczny wpływ na wybór tych maszyn w przyszłości.

Elektryfikacja również pełni ważną rolę w transporcie. Oznacza to przejście na flotę samochodów elektrycznych lub hybrydowych i zasilanie jej energią OZE, a także

odpowiednie szkolenie przewoźników oraz operatorów maszyn ciężkich w zakresie eko-operacji. Elektryfikacja transportu drogowego wiąże się nie tylko z koniecznością wymiany pojazdów, ale również rozbudową infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych zarówno na obszarach miejskich, jak i przy głównych trasach komunikacyjnych (Koleśnikow i in., 2024), co stanowi duże wyzwanie w realizacjach polityki ekologicznej w Polsce.

### 5.2.3. Dobre praktyki organizacyjne

W celu przeciwdziałania zmianom klimatycznym należy wcielić całe portfolio rozwiązań, gdyż oddzielne inicjatywy nie przynoszą spodziewanych skutków. Badacze (Smyth i in., 2020) wskazują na kombinację rozwiązań na poziomie regionalnym, ukierunkowanie pozyskanego drewna na produkty drzewne o dłuższej żywotności, eliminację spalania pozostałości pozrębowych (potencjał do wytwarzania bioenergii) i redukcję poziomu pozyskania drewna w regionach o niskim wskaźniku zakłóceń. Potencjał w mitygacji zmian klimatycznych tkwi również w optymalnym wykorzystaniu sortymentów drewna (minimalizacja marnotrawstwa drewna) i w ograniczeniu handlu zagranicznego drewnem.

Dobór metod pozyskiwania drewna powinien zapewniać ekonomiczność produkcji, jednocześnie zabezpieczając trwałość i różnorodność ekosystemów leśnych, a także spełniać wymogi bezpieczeństwa pracy. Na redukcję negatywnego wpływu na środowisko wpływa efektywne planowanie operacji, optymalne wykorzystanie sieci dróg i dobra logistyka (Cavalli i Grigolato, 2010). Krótsze odległości zrywki zmniejszają zużycie paliwa i emisje gazów cieplarnianych. Kolejnym czynnikiem redukującym zużycie paliwa może być akumulacja surowca drzewnego na składnicach drewna jako alternatywa bezpośrednich dostaw danego sortymentu/produktu do zakładu przetwórczego. Poprawia to roczne wykorzystanie floty dostawczej i zwiększa bezpieczeństwo dostaw surowca, zmniejszając w ten sposób potrzebę składowania większej jego ilości na placu zakładu (Prinz, 2019).

Do mitygacji negatywnego wpływu maszynowego pozyskania drewna może znacznie przyczynić się redukcja relokacji sprzętu leśnego. Koncentracja prac leśnych pozwala na redukcję odległości relokacji maszyn leśnych. Zorganizowanie wystarczająco dużych powierzchni pozyskania z wystarczającą ilością surowca, pozwala na zastosowanie wydajnych maszyn do pozyskania, a wystarczająca ilość surowca w danym miejscu skraca odległości przemieszczania maszyn i czas ich przemieszczania (Haavikko i in., 2022). W zależności od typu, relokacja ręberek może zająć od 10 do 12% czasu ich pracy, (Prinz, 2019), a dodatkowo trzeba doliczyć od 7 do 9% związane z czasem ustawienia parametrów pracy. Ten czas wpływa ujemnie na zużycie paliwa oraz wydajność systemu. Należy zatem dążyć do eliminacji relokacji maszyn.

Udowodniono również, że umiejętności i technika pracy operatora mają duży wpływ na emisję dwutlenku węgla (Cosola i in., 2016). Dlatego też bardzo ważne jest odpowiednie przeszkolenie pracowników dla prowadzenia przez nich najbardziej produktywnych technik operacyjnych, ale też dobrych praktyk ograniczania szkodliwego wpływu maszyn na środowisko (Ghaffariyan i in., 2018; Shepherd i in., 2023). Operatorzy, wykonujący zlecone prace leśne, powinni mieć świadomość konsekwencji wynikających ze skutków uszkodzeń drzew i gleby w drzewostanach. W wielu krajach, również w Polsce, funkcjonuje system

naliczania kar, za przekroczenie ustalonego poziomu uszkodzeń drzew lub nagród (premi) promujący lepszą jakość pracy w przypadku uzyskania poziomu uszkodzeń poniżej dopuszczalnej wartości (Sowa, 2013). Ważną rolę odgrywa także pozytywne nastawienie wykonawców i operatorów maszyn leśnych do efektywności paliwowej i energetycznej (Haavikko i in., 2022).

Wielu badaczy szans upatruje w narzędziach numerycznych określonych mianem *Forestry 4.0*. Z punktu widzenia zarządzania łańcuchem dostaw, cyfryzacja przyczynia się do ułatwienia komunikacji i nadzoru nad potokami ładunków surowca drzewnego. Dla przykładu, cyfryzacja pozyskania i pozycjonowania wraz z bezprzewodową komunikacją pomiędzy maszynami umożliwia spedytorowi wykorzystanie danych lokalizacyjnych zebranych przez harwester do zlokalizowania stosów kłód wzdłuż szlaków zrywkowych. Pozwala to na optymalizację tras forwardera oraz na przekazanie informacji o danym stosie przewoźnikom drewna. Powstały też różne narzędzia wspomagające wybór najlepszych tras dla maszyn leśnych. Przykładem może być *BestWay* (Flisberg i in., 2021), zaproponowane aby zminimalizować odległość zrywki, unikając jednocześnie stromego terenu i obszarów podmokłych. Inną technologię, identyfikację pozyskanego surowca za pomocą fal radiowych (RFID, ang. *Radio Frequency Identification*) lub innych bardziej nowoczesnych narzędzi można wykorzystać do znakowania kłód przez głowicę harwestera po ich przerynce, w połączeniu z informacjami dotyczącymi każdej kłody. Zalety identyfikacji poszczególnych kłód i *trackingu* mogą mieć znaczenie w kontekście kontroli nielegalnego pozyskiwania drewna w oparciu o przejrzyste łańcuch dostaw (Athanasiadis i in., 2013) i zasady zrównoważonego rozwoju lasów, co bezpośrednio wiąże się z wpływem na środowisko naturalne. Mimo, iż nowa technologia wspomaga zrównoważoną gospodarkę leśną, jej implementacja wymaga zmiany uwarunkowań technicznych i socjalno-ekonomicznych, takich jak otwartość na zmiany (Müller i in., 2019), co w polskim kontekście jest znacznym wyzwaniem.

Nowoczesne i ulepszone maszyny do pozyskania drewna mogą zmniejszyć zużycie paliwa, a co za tym idzie emisję gazów cieplarnianych. Napędy maszyn powinny być wyposażone w układ EOBD (ang. *European On Board Diagnostic*) i sensory rejestrujące parametry napędu w celu dokładnej analizy stanów eksploatacji maszyn, eliminacji bądź redukcji zużycia energii i emisji szkodliwych związków podczas czasu nieprodukcyjnego.

#### 5.2.4. Ekologiczne pozyskiwanie surowca drzewnego

Aby kontrolować spalanie paliwa maszyn wykorzystywanych przy pozyskaniu drewna, należy zminimalizować wszelką relokację przy nadmiernych obrotach silnika, zwłaszcza że zwiększa to zużycie paliwa w okresach nieprodukcyjnych (Makkonen, 2004). Ślad węglowy może być również zmniejszony przez skrócenie nieprodukcyjnego czasu (przestoje), optymalizację ładunku oraz optymalne dopompowanie opon maszyn (McCallum, 2009). Zgodnie z informacjami podawanymi w literaturze przestoje mogą zajmować od 21 do ponad 24% ogólnego czasu pracy (Bacescu i in., 2022), a zużycie paliwa w czasie przestojów np. dla forwardera może wynosić od 1,75 do 2,25 l/h (Nordfjell i in., 2003).

Kolejną dobrą praktyką jest dostosowanie wielkości maszyn do charakterystyki planowanych cięć. Maszyny leśne wyposażone w silniki o mniejszej mocy i wykazujące się mniejszą wydajnością pracy, powinny być kierowane do czyszczeń i trzebieży

drzewostanów, natomiast większe maszyny do powierzchni zrębowych, w których potrzebny jest mocniejszy sprzęt leśny ze względu na większą średnicę drzew. W przypadku stosowania harwesterów kompaktowych, które są dobrze przystosowane do trzebieży, redukcja zużycia paliwa wahała się od 12% do 24% (Tuomasjukka i in., 2018). To samo dotyczy zrywki drewna. Forwardery klasy kompaktowej mogą przewozić mniejsze ładunki, ale jednocześnie w mniejszym stopniu niszczą glebę i nie potrzebują szlaków zrywkowych, zmniejszając w ten sposób odległość zrywki (Lazdiņš i in., 2021).

Skupiając się na poziomie operacyjnym, wyższa wydajność maszyn wynikająca z optymalnych technik operacyjnych i ustawień maszyny ma wpływ na mniejsze zużycie paliwa i tym samym redukcję szkodliwych emisji. Dostępne wyniki badań (Prinz i in., 2018b) potwierdzają ten wpływ w systemie drewna krótkiego. Mimo iż miąższość wyrobionej grubizny pozostaje głównym czynnikiem wpływającym na wydajność maszyny, niektóre analizy wykazały, że zmniejszenie zużycia stałych elementów pracy niezależnie od wielkości pnia może prowadzić do znacznych oszczędności paliwa. Ważna jest również właściwa konserwacja maszyny, czyli terminowe smarowanie, czyszczenie chłodnic, ostrzenie noży okrzyszających, itp. (Kärhä i in., 2023a).

Choć trudne jest całkowite wyeliminowanie negatywnego wpływu działalności leśnej na glebę leśną, należy minimalizować ich niekorzystne skutki dla środowiska, ponieważ gleba odgrywa istotną rolę w odnowie drzew i decyduje o produktywności przyszłych drzewostanów (Grigorev i in., 2021). Ograniczenie szkód powstałych w trakcie zrywki można uzyskać poprzez odpowiedni dobór technologii i środków technicznych oraz solidne wykonywanie prac z zakresu pozyskania i transportu. Pośród wielu rodzajów zrywek mechanicznych, zdecydowanie najbardziej przyjazną środowisku i przyczyniającą się do powstawania najmniejszej liczby uszkodzeń jest zrywka nasiębierna wykonywana forwarderem, podczas gdy większej skali szkód należy się spodziewać w przypadku wykorzystywania skiderów linowych i chwytakowych (Picchio i in., 2020).

Środki planowania, które mogą pomóc zminimalizować szkody gleby leśnej, obejmują także uwzględnienie czynników sezonowych podczas planowania operacji, pozostawianie zielonych resztek drewna lub układanie mat na powierzchni gleby oraz zmniejszenie liczby przejazdów maszyn po szlakach zrywkowych (Grigorev i in., 2021). Odpowiednie planowanie szlaków zrywkowych zapewnia ułatwiony dostęp do drzewostanów i ogranicza rozjeżdżanie gleby po całym terenie (Stereńczak i Moskalik, 2014). Przemieszczanie się maszyn powinno być ograniczone do szlaków zrywkowych, a szerokość szlaków zrywkowych wynosząca od 4,8 do 5 m ma wpływ na mniejszą liczbę uszkodzeń drzewostanu (Wójcik, 2020). Konieczne jest także jak najszybsze wypracowanie i wprowadzenie mechanizmów skutecznej kontroli, które wymuszą postępowania zgodnie z zasadami zrównoważonego użytkowania lasu (Picchio i in., 2020). Ponieważ zwykle ocenę zaburzeń gleby wykonuje się po wykonaniu zrywki, gdy często jest już za późno na modyfikację działań, zalecany jest rozwój systemów opartych na systemach typu LiDAR lub innych technologii teledetekcyjnych skanujących otoczenie fizyczne (Schweier i in., 2019). Niemniej jednak stosowanie środków i technologii przyjaznych środowisku jest uzależnione od poprawy rentowności przedsięwzięcia leśnych – ZUL-i.

### 5.2.5. Ekologiczny transport surowca drzewnego

Logistyka transportu jest bardzo ważnym elementem wpływu sektora leśno-drzewnego na środowisko. Szereg rozwiązań promowanych jest w celu optymalizacji tras transportowych i przewożonego ładunku. Identyfikacja i eliminacja niepotrzebnego transportu mogą obniżyć całkowity koszt transportu i przyczynić się do zmniejszenia zużycia paliwa, emisji dwutlenku węgla i ryzyka wypadków. Dodatkowo optymalizacja istniejących lokalizacji dostaw może znacząco skrócić średnie odległości przewozu od 14% aż do 31% dla poszczególnych klientów (Kłapeć i in., 2017).

Często wymienia się *backhauling* (zapewnienie przewozów w drodze powrotnej) jako skuteczne rozwiązanie zwiększające efektywność transportu poprzez ograniczenie jazdy bez ładunku oraz całkowitej odległości transportu potrzebnej do dostarczenia ładunku do miejsca przeznaczenia (Palander i in., 2021). Badania przeprowadzone w Szwecji i Finlandii sugerują, że 20–46% całkowitego transportu drewna można zrealizować poprzez *backhauling* obniżając bezpośrednie koszty transportu o 2–5%, a liczbę pustych przejazdów o 24%, co z kolei ma niebagatelny wpływ na środowisko. Rozwiązanie to jednak wymusza wzmożoną współpracę między różnymi zakładami przetwórczymi i przewoźnikami. Współpraca przedsiębiorców w zakresie transportu drewna pomogłaby zredukować jego koszty nawet o 20% (Palander i Väättäinen, 2005). Takie rozwiązanie wymusza jednak dostosowanie taboru do różnego rodzaju ładunków oraz zwiększoną komunikację między zakładami przerobowymi a PGL LP. Pozwoliłoby to jednak na utworzenie jednego regionalnego albo kilku lokalnych spedytorów drewna (Kłoczek, 2016), co istotnie usprawniłoby cały system planowania transportu.

Na wydajność ekologiczną transportu surowca drzewnego wpływa w znaczący sposób optymalne zarządzanie flotą związane z redukcją masy ładunku drewna wstępnie suszonego na składnicy drewna. W rezultacie, lepsze zarządzanie wilgotnością surowca pozwala na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 1,6% na tonę metryczną ładunku. Kiedy jest to połączone z optymalizacją transportu w ramach sieci składnic manipulacyjnych, redukcja emisji może sięgnąć od 5,6% do 23,4% (Brotherton i in., 2020).

Dodatkowo w Polsce powinien nastąpić wzrost zainteresowania koleją jako jednym z najefektywniejszych rodzajów transportu pod względem zużycia energii i minimalizacji emisji gazów cieplarnianych. Rozwój kolei towarowej, szersze wykorzystanie transportu intermodalnego i przesuwanie większej części przewozów z dróg na tory może przyczynić się do redukcji emisji w transporcie. Zgodnie z celami pośrednimi Strategii zrównoważonej i inteligentnej mobilności (Komisja Europejska, 2020) postulowane jest zwiększenie kolejowego ruchu towarowego o 50% do 2030 wobec poziomu z 2015 i 2-krotnie do 2050. Dekarbonizacja kolei jest dokonywana przez jej elektryfikację – w tym przez wykorzystywanie w coraz większym stopniu energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Podejmowane są inwestycje w nowoczesne systemy zasilania, poprawiające efektywność energetyczną pojazdów. Równocześnie potrzebna jest modernizacja taboru i infrastruktury kolejowej, w tym rozwój systemów zarządzania ruchem.



## Podsumowanie rozdziału 5

Spoleczna percepcja negatywnego wpływu prac pozyskania, zrywki i transportu drewna w znacznej mierze opiera się na zjawisku zmniejszenia rezerwuaru węgla w lasach. Faktem jest, że pozyskanie drewna wpływa na bilans węgla na powierzchniach leśnych, natomiast trudno jest ustalić skalę tego zjawiska. Według badaczy długotrwała zdolność lasów do sekwestracji węgla nie jest znana, natomiast w przypadku nasilenia się naturalnych zaburzeń lasy są źródłem znaczącej emisji dwutlenku węgla (Anderegg i in., 2020). Szczególnie drzewostany niezagospodarowane, zamierające, charakteryzuje duży rezerwar węgla, który ułatwia rozprzestrzenianie się pożarów. Takie sytuacje mają miejsce coraz częściej w różnych częściach świata, jak np. ta z czerwca i lipca 2023 roku, kiedy to spłonęło ponad 4 mln ha lasów, w tym ponad 3 mln ha lasów niezagospodarowanych w prowincji Quebec w Kanadzie, co stanowi ekwiwalent 1/3 lasów w Polsce.

Z drugiej strony, pozyskanie i transport drewna dostarczają surowca drzewnego, niezbędnego w życiu codziennym. Drewno może zastąpić inne surowce wysokoemisyjne, takie jak beton i stal w sektorze budowlanym, czy też paliwa kopalne w sektorze energetyki. Domy i wielopiętrowe budynki mieszkalne czy też usługowe, zbudowane na drewnianych strukturach pozwalają na zmagazynowanie węgla przez długi czas. Pozostałości pożrebowe jako surowiec odnawialny, zastępują paliwa kopalne, takie jak węgiel kamienny czy ropę, co pozwala w pewnym zakresie ograniczyć emisje gazów cieplarnianych poprzez efekt substytucyjny. Niezwykle ważne jest jednak maksymalne wykorzystanie pozyskanego surowca w ramach gospodarki obiegu zamkniętego i niestosowanie wartościowych sortymentów na cele energetyczne. Zarządzenie pozyskanym surowcem ma równorzędny wpływ na stan środowiska naturalnego jak sposoby, technologie jego pozyskania.

Same operacje leśnego łańcucha dostaw, takie jak pozyskanie, zrywka czy transport, są źródłem emisji gazów cieplarnianych, związanych ze zużyciem paliwa, zwłaszcza oleju napędowego. Maszynowe pozyskanie drewna, zwiększające produktywność i bezpieczeństwo pracowników leśnych, zwiększa również niepożądane emisje. W dłuższym horyzoncie czasu, obiecującym rozwiązaniem na dekarbonizację tych operacji są alternatywne źródła energii. Zasilanie maszyn biopaliwami, wodorem, czy też bateriami elektrycznymi nie jest obecnie możliwe na dużą skalę, jednak w bliskiej przyszłości takie rozwiązania wyprą paliwa kopalne. Już teraz szereg producentów maszyn proponuje maszyny hybrydowe, takie jak harwestery czy też rębarki, które pracując równie wydajnie, pozwalają na zmniejszenie zużycia paliwa.

Należy jednak podkreślić, że także w krótkiej perspektywie czasu, możliwa jest znacząca redukcja negatywnego wpływu łańcucha dostaw w leśnictwie na środowisko, poprzez aplikację dobrych praktyk organizacyjnych, planowania pozyskania i jego wykonania, zrywki oraz transportu. W przypadku pozyskania, możemy znacząco zmniejszyć emisje poprzez lepsze planowanie cięć, minimalizację relokacji sprzętu i przestojów, dostosowanie niewielkości maszyn do charakterystyki cięć czy też stosowanie optymalnych technik operacyjnych i odpowiednich ustawień pracy maszyny. Równie ważne jest wyszkolenie operatorów maszyn, gdyż nieefektywność ich pracy wywołana nieodpowiednimi technikami pracy wpływa na globalne rezultaty zużycia paliwa i związanych z tym emisji. Ograniczenie szkód powstałych w trakcie zrywki można uzyskać poprzez odpowiedni dobór technologii i środków technicznych, uwzględnienie czynników sezonowych podczas planowania

operacji oraz mechanizmy skutecznej kontroli prac. Negatywny wpływ transportu może być ograniczany poprzez optymalizację lokalizacji dostaw (redukcję miejsc załadunku w lesie), efektywne zarządzanie flotą i ładunkiem (w tym „backhauling” oraz sieć składnic leśnych), czy też rozwój transportu kolejowego, pozwalającego na dużo bardziej efektywny energetycznie, w porównaniu do transportu drogowego, długodystansowy transport surowca drzewnego do zakładów przetwórczych. Nie przestaniemy pozyskiwać drewna, ale możemy znacznie usprawnić jego dystrybucję, żeby zmniejszyć negatywny wpływ leśnego łańcucha dostaw na środowisko.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona monografia została napisana w związku z realizacją projektu „Integracja łańcucha dostaw w leśnictwie jako instrument mitygacji skutków zmian klimatycznych”. W monografii wyróżniono cztery główne ogniwa łańcucha dostaw:

1. planowanie prac w leśnictwie,
2. organizację procesu pozyskania drewna,
3. transport surowca,
4. zakłady przetwórstwa drzewnego.

Ogniwa te stanowią rozdziały monografii. W każdym z tych rozdziałów przedstawiono stan obecny tych ogniw łańcucha dostaw oraz omówiono wyzwania i szanse, jakie stawiane są przed nimi. Dodatkowo w ostatnim rozdziale omówiono wpływ łańcucha dostaw na środowisko naturalne.

Organizacja łańcucha dostaw nie jest łatwym zadaniem, ponieważ dotyczy powiązania wielu czynników gospodarczych, środowiskowych i społecznych. Czynniki te wzajemnie się przenikają i dlatego nie mogą być rozpatrywane osobno. W dawnych czasach człowiek intensywnie eksploatował las. Dopiero później przekonał się, że takie postępowanie może doprowadzić do zachwiania równowagi w środowisku leśnym. Obecnie stawia się na zrównoważony rozwój, czyli potrzebę zintegrowanych działań w obszarze gospodarczym, społecznym i środowiskowym. W leśnictwie, które charakteryzuje się długim okresem planowania i jeszcze dłuższym okresem produkcji, trudnościami w określeniu dojrzałości produktu przed bezpośrednim jego pobraniem, wyzwaniem jest zintegrowanie wszystkich wspomnianych działań.

Obecnie w Polsce pozyskuje się ponad 40 mln m<sup>3</sup> drewna z lasów publicznych i nieoficjalnie ok. 4,5-5 mln m<sup>3</sup> drewna z lasów prywatnych. W ostatnich kilku latach, z roku na rok ilość pozyskanego drewna w lasach państwowych zmniejsza się, co jest głównie wynikiem polityki państwa dotyczącej leśnictwa oraz nacisku ze strony społeczeństwa. Śledząc zapisy dotyczące mitygacji i przeciwdziałania zmianom klimatu, można dojść do wniosku, że najlepszym rozwiązaniem jest ograniczenie rozmiaru pozyskania drewna. Ograniczenie pozyskania, a zwłaszcza użytków rębnych, w odpowiedzi na oczekiwania licznych grup społecznych, chcących przeciwdziałać zmianom klimatycznym, jest rozwiązaniem doraźnym. W dłuższej perspektywie czasu rozwiązanie to może przynieść skutki odwrotne do zamierzonych tj. doprowadzić do pogorszenia stanu lasu, większej podatności drzewostanu na klęski a w konsekwencji powiększyć ilość źródeł znacznej emisji CO<sub>2</sub>. Dotyczy to drzewostanów niezagospodarowanych, zamierających, w których

zaniechane zostały prace pozyskania drewna. Drzewostany te charakteryzuje duży rezerwuár węgla, który ułatwia rozprzestrzenianie się pożarów.

Pozyskiwanie drewna, wywóz z lasu i przetworzenie go na produkty „długotrwałe”, które zastąpią materiały mniej ekologiczne, pozwoli m. in. na składowanie węgla zgromadzonego w drewnie na wiele lat. Surowiec drzewny należy pozyskiwać, ale jednocześnie pilnować, żeby dystrybucja drewna i jego transport zostawiała jak najmniejszy ślad węglowy oraz żeby ograniczyć do minimum marnotrawstwo pozyskanego surowca.

Odpowiednia organizacja procesu pozyskania może prowadzić do zminimalizowania negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Pisząc o organizacji procesu należy rozumieć i brać pod uwagę nie tylko wszystkie jego główne etapy od ścinki do wywozu drewna z powierzchni leśnych, ale i wszelkie dodatkowe czynności związane z tym procesem, np. zawieranie umów na sprzedaż drewna. Dzięki takiemu szerokiemu podejściu i posiadanej rozległej wiedzy można optymalizować odległości i sposoby transportu surowca. Znaczne ograniczenie lub zaniechanie pozyskania w wielu miejscach prowadzi do deficytu surowca lokalnego i wzrostu odległości transportu, co w konsekwencji prowadzi do wydłużenia łańcucha dostaw i większych emisji gazów cieplarnianych.

Istotny wpływ na „efekt środowiskowy” całego łańcucha dostaw może mieć wybór lokalizacji pozyskania surowca. Rozproszenie miejsc pozyskania wymusza stosowanie dodatkowego przewozu, co generuje dodatkowe koszty. W części nadleśnictw plan pozyskania na dany rok gospodarczy uwzględnia tak zwaną koncentrację prac, czego efektem jest zmniejszenie odległości pomiędzy kolejnymi lokalizacjami surowca gotowego do wywiezienia. Ograniczenie nieproduktywnych przejazdów maszyn pomiędzy powierzchniami leśnymi wpłynie także na lepsze wykorzystanie maszyn wielooperacyjnych.

Żeby usprawnić łańcuch dostaw, trzeba również pochylić się nad przedsiębiorstwami, które prowadzą pozyskanie i transport drewna. Prace w procesie pozyskania drewna zlecane są zakładom usług leśnych, które nie zawsze są w stanie spełnić wymogi stawiane przez nadleśnictwa, zarówno pod względem sprzętowym jak i norm ochrony środowiska. Przyjęte obecnie przez administrację PGL LP zasady zawierania umów na wykonanie prac nie sprzyjają zwiększeniu zatrudnienia i inwestowaniu w nowoczesny sprzęt przez firmy leśne. Wpływ na to ma m.in. okres na jaki zawierana jest umowa z ZUL-em oraz wielkość pojedynczego zadania. W rezultacie dużym wyzwaniem właścicieli przedsiębiorstw leśnych jest posiadanie wydajnego parku maszynowego, na którego wymianę nie mogą sobie pozwolić w sytuacji, gdy często zmieniane są zasady przetargów. Większe firmy funkcjonujące na rynku leśnym, posiadające nowocześniejsze oraz wydajniejsze maszyny i urządzenia, są korzystniejsze dla zleceniodawców prac (nadleśnictw) z punktu widzenia wydajności pracy i większego jej bezpieczeństwa.

W innych krajach, posiadających znaczne bardziej zmechanizowane pozyskanie drewna, możliwe są subwencje na modernizację łańcucha dostaw w leśnictwie. Przykładem może być kanadyjska prowincja Quebec, która wcieliła Program modernizacji leśnych operacji. W ramach tego programu przedsiębiorcy leśni, przewoźnicy jak i zarządcy składnic mogli ubiegać się o subwencje na zakup nowoczesnych urządzeń oraz programów zwiększających wydajność pracy czy też zmniejszających jej koszty. Był to pierwszy taki program skierowany do tych ogniw łańcucha dostaw. O skali potrzeb świadczy fakt, że przeznaczone na ten program pieniądze (kilka milionów dolarów kanadyjskich) zostały przydzielone na poszczególne projekty modernizacji łańcucha dostaw w zaledwie kilka miesięcy. Inicjatywy tego typu wprowadzane przez rządowe instytucje (takie jak Agencja Restrukturyzacji

i Modernizacji Rolnictwa) mogłyby wesprzeć w znaczący sposób wydajność całego łańcucha dostaw w polskim leśnictwie.

Kolejnym ogniwem łańcucha dostaw umożliwiającym dostawy drewna do odbiorców jest jego wywóz z lasu. Realizowany jest on w 90% z zastosowaniem taboru kołowego i zaledwie w 10% przy użyciu taboru kolejowego. Prawidłowa organizacja procesu transportu drewna jest dużym wyzwaniem logistycznym, zwłaszcza w sytuacji, kiedy jeden ładunek transportowy rozrzucony jest na różnych, oddalonych od siebie powierzchniach leśnych. Koncentracja wolumenu surowca może zostać osiągnięta poprzez gromadzenie drewna z wielu powierzchni na składnicach leśnych. Ciekawe byłoby też wprowadzanie punktów lub zakładów przerobu/kondycjonowania surowca drzewnego. Mogą one przyczynić się do zoptymalizowania wartości wyrobionych sortymentów drzewnych oraz ułatwić taką organizację transportu surowca drzewnego, która zminimalizuje jego negatywne oddziaływanie na środowisko.

Negatywny wpływ transportu na środowisko może być ograniczany również przez efektywne zarządzanie flotą i ładunkiem, w tym wykorzystywaniem metody *backhauling*, czy też rozwój transportu kolejowego, pozwalającego na dużo bardziej efektywny energetycznie – w porównaniu do transportu drogowego – długodystansowy transport surowca drzewnego do zakładów przetwórczych. Jednak wysokie koszty oraz niska sprawność transportu kolejowego powodują, że znaczne ilości drewna są i będą nadal transportowane w Polsce na duże odległości z użyciem samochodów ciężarowych. W związku z tym istotne znaczenie ma także zużycie mniejszej ilości paliw oraz materiałów eksploatacyjnych szkodliwych dla środowiska, zwłaszcza w kontekście emisji gazów cieplarnianych. Na całym świecie prowadzonych jest wiele badań mających na celu zastąpienie w transporcie paliw kopalnych, bardziej przyjaznymi środowisku paliwami alternatywnymi (biopaliwa, wodór, zasilanie elektryczne). Paliwa te nie są obecnie stosowane na dużą skalę w sektorze leśno-drzewnym.

Drewno, bezpośrednio z lasu lub z nielicznych funkcjonujących w Polsce składnic jest transportowane do zakładów przetwórczych, przerabiających surowiec na produkt końcowy (np. tartaki, celulozownie, papiernie). Zakłady te, aby móc prawidłowo i nieprzerwanie funkcjonować muszą mieć zagwarantowany stały dostęp do odpowiedniej ilości świeżego drewna. Rozmieszczenie zakładów przerobu drewna, do których trafia surowiec z lasu, związane jest głównie z profilem przedsiębiorstwa, dostępnością surowca oraz dostępnością do źródła wody. Braki wynikające z niedostatecznej ilości drewna do przerobu, zakłady rekompensują poprzez poszukiwania nowych dostawców często z zagranicy. Skutkuje to wzrostem kosztów transportu, wydłużeniem łańcucha dostaw i podwyższeniem wartości śladu węglowego w gotowym produkcie.

Przedstawiony powyżej obraz łańcucha dostaw w leśnictwie zaczerpnięty z przeglądu dostępnej literatury naukowej i branżowej został dopełniony opinią praktyków łańcucha dostaw w leśnictwie. W ramach projektu w okresie od lipca do września 2024 zrealizowany został sondaż dotyczący największych wyzwań łańcucha dostaw w leśnictwie oraz szans jego usprawnienia. Odpowiedziało na niego 158 osób, w tym reprezentanci: PGL LP 65% respondentów, Zakładów Usług Leśnych 15%, zakładów przetwórczych drewna 14%, transportu drewna 2% oraz innych organizacji 4%. Mimo, iż dystrybucja ogniwi łańcucha dostaw w odpowiedziach sondażu wyklucza dokładne analizy, warto przytoczyć zaobserwowane trendy.

Respondenci potwierdzili główne bolączki obecnego łańcucha dostaw. Wskazano na skomplikowany system przetargów na realizację usług leśnych (39%), rozdrobnienie prac leśnych (36%), pracochłonny odbiór drewna i nieefektywne planowanie pozyskania drewna (po 35%). Uczestnicy sondażu największe możliwości usprawnienia łańcucha dostaw w leśnictwie upatrywali w optymalizacji systemu sprzedaży drewna w oparciu o czynniki pozacenowe np. odległości transportu (61%), rozwój nowych technologii (54%) i tworzenie składnic manipulacyjnych (50%). Oprócz częstych uwag dotyczących niewystarczającej podaży drewna w PGL LP wynikających z ostatnich ograniczeń, respondenci niejednokrotnie wykazywali brak współpracy przedstawicieli poszczególnych ogniw łańcucha dostaw w leśnictwie, problemy związane ze zbyt dużą liczbą sortymentów oraz możliwości usprawnienia transportu drewna.

Wyzwania komunikacji i wymiana informacji pomiędzy poszczególnymi ogniwami łańcucha zostały naświetlone przez każdą grupę respondentów. Po pierwsze zaznaczono brak kompleksowego systemu obejmującego planowanie, wyrób i wydanie drewna z każdej lokalizacji powiązane z logistyką jego transportu i odbiorcą finalnym. Obecnie ustalanie harmonogramu pozyskania drewna, jego odbioru i wydania odbywa się często przez telefon, co przy dużej liczbie sortymentów powoduje błędy i wydłuża proces pozyskania i odbioru surowca. Respondenci zwracają uwagę na konieczność kompleksowych rozwiązań cyfrowych z informacją dostępną dla każdego ogniwa łańcucha dostaw. Proponowany system mógłby zawierać także mechanizmy optymalizujące, które pozwoliłyby minimalizować odległości transportu surowca, pozwalać na większą elastyczność dotyczącą terminu i lokalizacji pozyskania/odbioru określonych sortymentów, a także lepiej śledzić surowiec drzewny w kontekście przepisów legislacyjnych (np. EUDR).

Często zamówienia nie obejmują całej masy drewna planowanego do pozyskania w danej lokalizacji, co wpływa na częstotliwość powrotu maszyn i pracowników na daną powierzchnię po kolejną porcję surowca. W wielu przypadkach ZUL-e mogą pozyskać na jednej powierzchni tylko jeden sortyment ze względu na możliwości zbytu surowca. Jest to działanie bardzo niepożądane zarówno ze względów ekologicznych jak i ekonomicznych. Tym bardziej, że przedsiębiorstwa te są często na skraju rentowności, co będzie się tylko pogłębiało w związku z obecnymi ograniczeniami pozyskania drewna w Polsce. Są to często firmy bardzo świadome potrzeby modernizacji (mechanizacji) swoich prac, również w związku z problemem dostępności wyszkolonych pracowników. Mimo to w obliczu obecnych niepewności pozyskiwanego wolumenu, firmy te nie będą inwestować w drogi sprzęt do pozyskiwania i zrywki, a co za tym idzie i w szkolenia pracowników.

Zarówno PGL LP jak i odbiorcy drewna (zakłady przetwórcze) zwracają uwagę na brak wzajemnej współpracy w zakresie terminów odbioru i transportu drewna. Gradacje owadów i inne kłęski żywiołowe powodują zwiększenie stanu surowca drzewnego w lesie, które należy jak najszybciej wywieźć. Zakłady produkcyjne często nie mogą zmienić cyklu produkcji, żeby przyjąć drewno pokłeskowe. Z drugiej strony zdarza się, że zakłady produkcyjne nie odbierają umówionego surowca na czas. Jest to o tyle skomplikowane, że z jednej powierzchni odbierane jest drewno dla wielu zakładów przetwórczych. Jeden spóźniający się odbiorca zaburza dostawy drewna wstrzymując odbiór drewna dla pozostałych. Jest to związane z tym, że drewna nie pozyskuje się „na zapas”, a pozostawione i przelegujące w lesie drewno deprecjonuje się i traci na wartości. Brak jest obecnie instrumentu mobilizującego odbiorców drewna do realizacji harmonogramu odbioru zamówionego i zakupionego drewna.

Kolejnym ważnym rozwiązaniem podkreślanym w odpowiedziach respondentów jest ograniczenie liczby zamawianych i wyrabianych sortymentów. Obecnie pogłębia się proces wyrabiania sortymentów pod konkretnych odbiorców, co prowadzi do coraz bardziej rozdrobnionej sortymentacji drewna okrągłego. Z drugiej strony, zakłady przetwórcze wnoszą o ujednoczenie standardowych wymiarów pozyskiwanego surowca dla danego sortymentu we wszystkich nadleśnictwach. Standardy te wraz z większą rotacją umów między sąsiednimi nadleśnictwami są identyfikowane przez przemysł drzewny jako ważne perspektywy usprawnienia dostaw drewna.

Z kolei dla przewoźników drewna dużymi wyzwaniem jest zbyt wiele miejsc odbioru drewna, zły stan dróg i organizacja wywozu drewna przez administrację PGL LP, niewywiązywanie się z harmonogramów i różnice w jakości zamówionego i sprzedanego drewna. Organizację wywozu drewna można by usprawnić na wiele sposobów, począwszy od wdrożenia aplikacji dla przewoźników, w której lokalizacja wszystkich dostępnych sortymentów pokazana byłaby na mapie, co usprawniłoby planowanie wywozu, aż po tworzenie sieci składnic drewna. Według respondentów znaczącym usprawnieniem mogłoby być również zwiększenie maksymalnej DMC do 48 ton dla ciężarówek transportujących drewno, bez zmiany regulacji odnośnie obciążeń na oś (zwiększyłaby się liczba osi pojazdu). Ciężarówka przewiozłaby jednorazowo o 27-31% więcej ładunku, przy ograniczeniu spalania na tonę ładunku o 22%.

Dużo głosów z poszczególnych ogniw łańcucha dostaw wskazuje na opisaną wcześniej potrzebę odtworzenia sieci składnic drewna odpowiednio wyposażonych w infrastrukturę umożliwiającą jego spedycję na duże odległości oraz w miarę możliwości z wykorzystaniem linii kolejowych. Składnice te pomogły by rozwiązać problem gromadzenia drewna z cięć sanitarnych, które stwarza zagrożenie dla lasu. Wpłynęłyby również na wypełnienie surowcem każdego pojazdu ciężarowego, który jeździ tylko z niewielkim ładunkiem ze względu na ograniczanie pozyskania w danej lokalizacji. Dodatkowo sortowanie na składnicy manipulacyjnej podniosłoby również wartość składowanego tam surowca poprzez wyższą klasyfikację dla najbardziej wartościowego drewna.

Podsumowując głosy płynące z badań naukowych jak i praktyki, niezbędne jest opracowanie narzędzia, które wskazałoby na możliwe rozwiązania organizacyjne, biorące pod uwagę zarówno efekty ekonomiczne jak i środowiskowe. Liczne projekty innowacyjne realizowane na całym świecie są obecnie mało realne do wdrożenia w polskich realiach pozyskiwania i sprzedaży drewna. Wynika to z wielu czynników m.in. stopnia mechanizacji prac, przyjętego w Polsce modelu hodowlano-urzędzeniowego, stosunkowo taniej siły roboczej czy dużego wpływu opinii publicznej na gospodarkę leśną kraju. Możemy się spodziewać, że w niedalekiej przyszłości również w Polsce nastąpi implementacja nowych technologii, jednak obecnie musimy skupić się na skutecznych rozwiązaniach, które w krótkiej perspektywie czasu mogą usprawnić obecnie funkcjonujący łańcuch dostaw w leśnictwie i zmniejszyć jego negatywny wpływ na środowisko. Można wśród nich na pewno wymienić koncentrację prac pozyskania drewna, reaktywację składnic drewna i wykorzystanie transportu kolejowego do przewozu surowca drzewnego w znacznie większym zakresie niż dotychczas.





## BIBLIOGRAFIA

- Abbas, D., Handler, R.M., 2018. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *Journal of Cleaner Production* 176, 512–520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>
- Affek, A., Gerlée, A., Sosnowska, A., Zachwatowicz, M., 2019. Oszacowanie skali wpływu pozyskiwania drewna na wybrane elementy środowiska we wschodniej części polskich Karpat. *Przegl. Geograf.* 91, 83–106. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2019.1.4>
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., van der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research, Experiences with the Impact and Prevention of Subsoil Compaction in the European Union* 73, 145–160. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7)
- Anderegg, W.R.L., Trugman, A.T., Badgley, G., Anderson, C.M., Bartuska, A., Ciais, P., Cullenward, D., Field, C.B., Freeman, J., Goetz, S.J., Hicke, J.A., Huntzinger, D., Jackson, R.B., Nickerson, J., Pacala, S., Randerson, J.T., 2020. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* 368, eaaz7005. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>
- Aniszewska, M., Brzózko, J., Skarzyński, J., 2011. Harwestery do pozyskiwania drewna stosowane w polskich lasach. Część 2. Głowice harwesterowe. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 2, 4–7.
- Antonić, S., Danilović, M., Stojnić, D., Dražić, S., 2023. Impact of Chainsaw Power on Fuel and Oil Consumption. *Sustainability* 15, 2795. <https://doi.org/10.3390/su15032795>
- Asikainen, A., Anttila, P., Verkerk, H., Díaz-Yáñez, O., Röser, D., 2011. Development of forest machinery and labour in the EU in 2010-2030, w: *Pushing the Boundaries with Research and Innovation in Forest Engineering*. Presented at the Austro2011/FORMEC'11, 44th International Symposium on Forestry Mechanisation, University of Natural Resources and Life Sciences, October 9-13, Graz, Austria, pp. 9–13.
- Assirelli, A., Civitarese, V., Fanigliulo, R., Pari, L., Pochi, D., Santangelo, E., Spinelli, R., 2013. Effect of piece size and tree part on chipper performance. *Biomass and Bioenergy* 54, 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.029>
- Athanasiadis, I.N., Anastasiadou, D., Koulinas, K., Kiourtsis, F., 2013. Identifying Smart Solutions for Fighting Illegal Logging and Timber Trade, w: Hřebíček, J., Schimak, G., Kubásek, M., Rizzoli, A.E. (Red.), *Environmental Software Systems. Fostering Information Sharing, Proceedings 10*. Presented at the 10th IFIP WG 5.11 International Symposium, ISESS 2013, Neusiedl am See, Austria, October 9-11, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 143–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41151-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41151-9_14)
- Athanasiadis, D., 2000. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Science of The Total Environment* 255, 135–143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)
- Bacescu, N.M., Cadei, A., Moskalik, T., Wiśniewski, M., Talbot, B., Grigolato, S., 2022. Efficiency Assessment of Fully Mechanized Harvesting System through the Use of Fleet Management System. *Sustainability* 14, 16751. <https://doi.org/10.3390/su142416751>
- Bagiński, K., 2022. Polakom brakuje drewna, choć władze tną lasy. Surowiec jedzie za granicę. [Dokument WWW]. URL <https://innpoland.pl/182983.polakom-brakuje-drewna-wladza-sprzedaje-za-granice> (dostęp 13.11.2024).
- Balloun, A. (Red.), 2021. *Analiza wpływu ograniczenia pozyskania drewna w Lasach Państwowych na przemysł drzewny*.
- Bembenek, M., 2022. Efektywność zmechanizowanego pozyskiwania drewna w zależności od składu gatunkowego i wieku drzewostanów przedrębnych.

- Berg, S., Karjalainen, T., 2003. Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 76, 271–284. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.3.271>
- Berg, S., Lindholm, E.-L., 2005. Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden. *Journal of Cleaner Production* 13, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.09.015>
- Birdsey, R., Duffy, P., Smyth, C., Kurz, W.A., Dugan, A.J., Houghton, R., 2018. Climate, economic, and environmental impacts of producing wood for bioenergy. *Environ. Res. Lett.* 13, 050201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab9d5>
- Blombäck, P., Poschen, P., Lövgren, M., 2003. Employment Trends and Prospects in the European Forest Sector: A Study Prepared for the European Forest Sector Outlook Study (EFSOS), Geneva Timber and Forest Discussion Papers. United Nations, New York and Geneva.
- Bodył, M., 2022. Rozmiar pozyskania maszynowego w Polsce. *Drwal. Pismo Przedsiębiorców Leśnych* 4, 24–28.
- Booth, M.S., 2018. Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy. *Environ. Res. Lett.* 13, 035001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaac88>
- Borecki, T., Pieniak, D., Stępień, E., Wójcik, R., 2017. Planning and regulation of pre-final cuttings in Poland – a proposal for change. *Folia Forestalia Polonica* 59, 265–271. <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0028>
- Borecki, T., Pieniak, D., Wójcik, R., 2012. Realizacja użytkowania przedrębnego w Lasach Państwowych w okresie 1999–2004. *Sylwan* 156, 848–854. <https://doi.org/10.26202/SYLVAN.2010077>
- Borecki, T., Pieniak, D., Wójcik, R., 2011. Aspekty prawne określania wielkości użytkowania przedrębnego. *Sylwan* 155, 75–83. <https://doi.org/10.26202/sylvan.2010011>
- Borecki, T., Stępień, E., Konieczny, A., Kędziora, W., Zielony, R., Wójcik, R., Nowakowska, J.A., Orzechowski, M., Drozdowski, S., Pieniak, D., Czarnecka, R., Zawadka, R., 2018. Urządzeniowe uwarunkowania regulacji użytkowania uwzględniającego równomierność pozyskania i poprawę stanu zasobów w układzie regionalnym. Warszawa.
- Borecki, T., Stępień, E., Wójcik, R., Orzechowski, M., 2016. Verification of the principles of accounting for the size of the allowable fellings in forest management planning. *Drewno* 59, 61–75. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.C34.07>
- Borz, S.A., Morocho Toaza, J.M., Forkuo, G.O., Marcu, M.V., 2022. Potential of Measure App in Estimating Log Biometrics: A Comparison with Conventional Log Measurement. *Forests* 13, 1028. <https://doi.org/10.3390/f13071028>
- Brach, J., 2024. Ekologizacja pojazdów samochodowych wchodzących w skład zestawów klas LHV i HCT-HCV – zasadnicze tendencje. *Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów* 193, 169–200. <https://doi.org/10.33119/SIP.2023.193.10>
- Brotherton, E., Gravel, M.-L., Lebel, L., 2020. Améliorer la performance d'un réseau d'approvisionnement forestier par une meilleure gestion de l'humidité dans les cours de transit, CIRRELT-2020-37. Université de Montreal, Université Laval, Montreal, Quebec, Canada.
- Brown, M., 2008. The impact of tare weight on transportation efficiency in Australian forest operations. CRC for Forestry, Harvesting and Operations Program, Research Bulletin 3, 1–5.
- Brown, M.W., 2021. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests* 12, 855. <https://doi.org/10.3390/f12070855>
- Brunberg, T., 2013. Bränsleförbrukningen hos skogsmaskiner 2012 (Fuel consumption in forest machines 2012) [Dokument WWW]. skogforsk.se Results 23-2013. URL <https://www.skogforsk.se:443/kunskapsbanken/kunskapsartiklar/2013/Bransleförbrukningen-hos-skogsmaskiner-201211/> (dostęp 23.09.2024).
- Brzeziecki, B., 2005. Struktura drzewostanu i jej znaczenie ekologiczno-hodowlane. Biblioteczka leśniczego.
- BULiGL, 2020. Wielkoobszarowa Inwentaryzacja Stanu Lasów wyniki III cyklu (lata 2015-2019). Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej, Sękocin Stary.

- Burchard-Dziubińska, M., Prandecki, K. (Red.), 2020. Zmiana klimatu: skutki dla polskiego społeczeństwa i gospodarki. Komitet Prognoz "Polska 2000 Plus". Polska Akademia Nauk, Warszawa.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., Marchi, E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
- Cavalli, R., Grigolato, S., 2010. Influence of characteristics and extension of a forest road network on the supply cost of forest woodchips. *Journal of Forest Research* 15, 202–209. <https://doi.org/10.1007/s10310-009-0170-4>
- Cazzaniga, N., Jonsson, K., Palermo, D., Camia, A., 2019. Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28, JRC115777. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/227292>
- CEPI, 2024. KEY STATISTICS 2023. European pulp & paper industry. Confederation of European Paper Industries, Brussels.
- Chabanet, S., Bril El-Haouzi, H., Morin, M., Gaudreault, J., Thomas, P., 2023. Toward digital twins for sawmill production planning and control: benefits, opportunities, and challenges. *International Journal of Production Research* 61, 2190–2213. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2068086>
- Chen, J., Ter-Mikaelian, M.T., Yang, H., Colombo, S.J., 2018. Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 91, 193–205. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx056>
- Chojnacki, A., Chmielewska, A., Konowrocki, Z., 2023. Innowacyjna metoda przewozu drewna i kontenerów, w: *Materiały Pokonferencyjne. Presented at the XXV Konferencja Naukowa – Pojazdy szynowe 2023, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*, pp. 9–26. [https://doi.org/10.37190/Pojazdy\\_Szynowe\\_2023](https://doi.org/10.37190/Pojazdy_Szynowe_2023)
- Cosola, G., Grigolato, S., Ackerman, P., Monterotti, S., Cavalli, R., 2016. Carbon Footprint of Forest Operations under Different Management Regimes. *Croatian Journal of Forest Engineering* 37, 201–217.
- Cremer, T., Berendt, F., Diez, F. de M., Wolfgramm, F., Blasko, L., 2020. Accuracy of Photo-Optical Measurement of Wood Piles. *Environmental Sciences Proceedings* 3, 90. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-08192>
- Czemko, B., 2024. Polski przemysł drzewny [Dokument WWW]. Poradnik biznesu. URL <https://www.poradnikbiznesu.info/przemysl-4-0/polski-przemysl-drzewny/> (dostęp 13.11.2024).
- de la Fuente, T., Athanassiadis, D., González-García, S., Nordfjell, T., 2017. Cradle-to-gate life cycle assessment of forest supply chains: Comparison of Canadian and Swedish case studies. *Journal of Cleaner Production* 143, 866–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.034>
- DeArmond, D., Emmert, F., Lima, A.J.N., Higuchi, N., 2019. Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research* 189, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.010>
- DeArmond, D., Ferraz, J.B.S., de Oliveira, L.R., Lima, A.J.N., Falcão, N.P. de S., Higuchi, N., 2023. Soil compaction in skid trails still affects topsoil recovery 28 years after logging in Central Amazonia. *Geoderma* 434, 116473. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116473>
- Devilin, G. (Red.), 2014. Managing timber transport. Good Practice Guide.
- Devlin, G.J., McDonnell, K., Ward, S., 2008. Timber haulage routing in Ireland: an analysis using GIS and GPS. *Journal of Transport Geography* 16, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2007.01.008>
- DGLP, 2024a. Zarządzenie nr 120 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 1 października 2024 roku w sprawie zasad sprzedaży drewna w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe na lata 2025-2026. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2024b. Decyzja nr 112 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 1 października 2024 r. w sprawie parametrów oraz regulaminów sprzedaży w Portalu Leśno-Drzewnym i aplikacji internetowej e-drewno. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.

- DGLP, 2023. Raport o stanie lasów w Polsce 2022. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2022. Wytyczne do zagospodarowania lasów o zwiększonej funkcji społecznej na gruntach w zarządzie Lasów Państwowych. Załącznik nr 1 do Zarządzenia DGLP nr 58 z dnia 5 lipca 2022. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2019. Załącznik nr 1 do Zarządzenia nr 51 DGLP z dnia 30.09.2019r. Warunki techniczne – Podział, terminologia i symbole stosowane w obrocie surowcem drzewnym. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2014. Zarządzenie nr 30 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 9 maja 2014 roku w sprawie kompensacji etetu użytków rębnych i przedrębnych w Lasach Państwowych. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2012. Zarządzenie nr 36 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z 20 kwietnia 2012. Instrukcja bezpieczeństwa i higieny pracy przy wykonywaniu podstawowych prac z zakresu gospodarki leśnej. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2011. Skorygowane zasady obrotu i ewidencji pozostałości drzewnych (drobnicy) na cele energetyczne - M2E. Zrębki energetyczne M2ZE i baloty M2BE. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- DGLP, 2007. Zarządzenie nr 9 z 20 lutego 2007 r. w sprawie zmian w „instrukcji zarządzania lasu”, stanowiącej załącznik do zarządzenia nr 43 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z 18 kwietnia 2003 r. w sprawie „instrukcji zarządzania lasu”. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- Dias, A.C., Arroja, L., 2012. Comparison of methodologies for estimating the carbon footprint – case study of office paper. *Journal of Cleaner Production* 24, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.005>
- Dornoff, J., Rodríguez, F., 2024. Euro 7: The new emission standard for light- and heavy-duty vehicles in the European Union [Dokument WWW]. International Council on Clean Transportation. URL <https://theicct.org/publication/euro-7-emission-standard-ldv-hdv-eu-mar24/> (dostęp 4.10.2024).
- Dudziec, P., Stachowicz, P., Stolarski, M.J., 2023. Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. *Renewable Energy* 202, 822–833. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.002>
- Dumetz, L., Gaudreault, J., El-Haouzi, H.B., Thomas, A., Lehoux, N., Marier, P., 2019. Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction. *Forest Products Journal* 69, 260–271. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-19-00002>
- Dumetz, L., Gaudreault, J., Thomas, A., Bril El-Haouzi, H., Lehoux, N., Marier, P., 2017. Planning and coordination for decentralised business units in a lumber production company, w: Paper or Preprint, Hal-01425811. HAL Open Science, Québec, Canada and Vandoeuvre, France, pp. 1–7.
- Dzienniki UE, 2023. Rezolucja ustawodawcza Parlamentu Europejskiego i Rady zmieniającej dyrektywę Rady 96/53/WE ustanawiającą dla niektórych pojazdów drogowych poruszających się na terytorium Wspólnoty maksymalne dopuszczalne wymiary w ruchu krajowym i międzynarodowym oraz maksymalne dopuszczalne obciążenia w ruchu międzynarodowym (COM(2023)0445 – C9-0306/2023 – 2023/0265(COD)).
- Dzienniki UE, 2019. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal.
- Dz.U. 2012 poz. 536, 2012. Rozporządzenie Ministra Środowiska oraz Ministra Gospodarki z dnia 2 maja 2012 r. w sprawie określenia gęstości drewna. Dz.U. 2012 poz. 536.
- Dz.U. 2014 poz. 222, 2014. Ustawa z dnia 24 stycznia 2014 r. o zmianie ustawy o lasach. Sejm RP, Warszawa.

- Dz.U. 2015 poz. 776, 2015. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 21 kwietnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2015 poz. 1076, 2015. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 2 lipca 2015 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2016 poz. 1075, 2016. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 8 lipca 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2017 poz. 2089, 2017. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 8 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2019 poz. 1787, 2019. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 13 września 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2019 poz. 2466, 2019. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 grudnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2021 poz. 1129, 2021. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 18 maja 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo zamówień publicznych. Dz.U. 2021 poz. 1129.
- Dz.U. 2022 poz. 2066, 2022. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 27 września 2022 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2022 poz. 2803, 2022. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 22 grudnia 2022 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia. Dz.U. 2022 poz. 2803.
- Dz.U. 2023 poz. 248, 2023. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 1 lutego 2023 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Dz.U. 2023 poz. 1688, 2023. Ustawa z dnia 7 lipca 2023 r. o zmianie ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym oraz niektórych innych ustaw. Sejm RP, Warszawa.
- EcoReporters, R., 2022. Drewno z recyklingu zamiast z polskich lasów [Dokument WWW]. EcoReporters. URL <https://ecoreporters.pl/2022/drewno-z-recyklingu-zamiast-z-polskich-lasow/> (dostęp 13.11.2024).
- Eickman, S., Ratecki, A., 2003. Measuring CO2 emissions. TTS Technika Transportu Szynowego 13, 44–48.
- Einola, K., 2013. Prestudy of a Power Management of a Cut-To-Length Forest Harvester with a Hydraulic Hybrid System, w: Linköping Electronic Conference Proceedings 92:8. Presented at the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, June 3-5, Linköping University Electronic Press, Linköping; Sweden, pp. 71–83. <https://doi.org/10.3384/ecp1392a8>
- Eliasson, L., 1998. Analyses of Single-Grip Harvester Productivity (Doctoral thesis). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, SLU, S-901 83 UMEA, Sweden.
- Eliasson, L., Kärhä, K., Arlinger, J., 2023. Fuel consumption in logging operations in Sweden. International Journal of Forest Engineering 34, 366–372. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2229707>
- Elźbieciak, T., Zasuń, R., 2022. Biomasa wpadła w wojenny kocioł [Dokument WWW]. wysokienapiecie.pl. URL <https://wysokienapiecie.pl/68176-biomasa-wpadla-w-wojenny-kociol/> (dostęp 17.10.2024).



- Erb, K.-H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzl, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., Luysaert, S., 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature* 553, 73–76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- Erber, G., Kühmaier, M., 2017. Research trends in European forest fuel supply chains: A review of the last ten years (2007–2017) - part one: Harvesting and storage. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38, 269–278.
- European Commission, 2011. WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system (No. COM/2011/0144 final). European Commission, Brussels.
- Ezzati, S., Najafi, A., Rab, M.A., Zenner, E.K., 2012. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran. *Silva Fennica* 46, 908. <https://doi.org/10.14214/sf.908>
- FAO, 2022. FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations [Dokument WWW]. Fao Statistical Databases. URL <https://www.fao.org/faostat/en/#definitions> (dostęp 9.08.2022).
- FAO, 2020. Global Forest Resources Assessment 2020, 1st ed. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- FCC, 2022. Kurs operatora harwestera i forwardera [Dokument WWW]. Forest Consulting Center. URL <https://www.forestcc.pl/kurs-operatora-harwestera-forwardera-wrzesien2022/> (dostęp 23.09.2024).
- firmylesne.pl, 2023. Mniej ZUL-i w Szczecinie [Dokument WWW]. Firmy Leśne. URL [http://firmylesne.pl/lista/lasy-panstwowe/pokaz/mniej\\_zuli\\_w\\_szczecinie,5535](http://firmylesne.pl/lista/lasy-panstwowe/pokaz/mniej_zuli_w_szczecinie,5535) (dostęp 1.10.2024).
- Flach, B., Bolla, S., 2023. European Union: Wood Pellets Annual | USDA Foreign Agricultural Service (No. E42023- 0034), Wood Pellets. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, European Union.
- Flisberg, P., Rönqvist, M., Willén, E., Frisk, M., Friberg, G., 2021. Spatial optimization of ground-based primary extraction routes using the BestWay decision support system. *Canadian Journal of Forest Research* 51, 675–691. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0238>
- Fodrowska, K., 2021. Biomasa w Polsce – wykorzystanie i rola [Dokument WWW]. enerad.pl. URL <https://enerad.pl/wiedza/biomasa-w-polsce-wykorzystanie-i-rola/> (dostęp 17.10.2024).
- Forest Research, 2022. International Forestry (Chapter 9), w: Forestry Statistics 2022, Forestry Statistics and Forestry Facts & Figures. The Research Agency of the Forestry Commission, Northern Research Station Roslin, Midlothian, EH25 9SY, UK, pp. 2–24.
- Gałęzia, T., 2016. Economic methods for the utilisation of logging residues. *Forest Research Papers* 77, 50–55. <https://doi.org/10.1515/ffp-2016-0006>
- Gendek, A., Aniszewska, M., Nurek, T., Moskalik, T., 2018a. State of training and equipment of chainsaw operators employed for timber harvesting in Polish forests. *Sylwan* 162, 118–126. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2017110>
- Gendek, A., Malat'ák, J., Velebil, J., 2018b. Effect of harvest method and composition of wood chips on their caloric value and ash content. *Sylwan* 162, 248–257. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2017125>
- Gendek, A., Nurek, T., 2016. Variability of energy woodchips and their economic effects. *Folia Forestalia Polonica, Series A* 58, 62–71. <https://doi.org/10.1515/ffp-2016-0007>
- Gendek, A., Nurek, T., Zychowicz, W., Moskalik, T., 2018c. Effects of Intentional Reduction in Moisture Content of Forest Wood Chips during Transport on Truckload Price. *BioResources* 13, 4310–4322. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.4310-4322>
- Gerasimov, Y., Karjalainen, T., 2013. Energy wood resources availability and delivery cost in Northwest Russia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28, 689–700. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.828098>

- Gerasimov, Y., Sokolov, A., 2014. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. *Applied Ergonomics* 45, 318–338. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>
- Ghaffariyan, M., Barrier, C., Brown, M., Kühmaier, M., Acuna, M., 2018. A short review of timber truck fuel consumption studies (No. ndustry Bulletin 21, Technology update), Technology update. Australian Forests Operations Research Alliance (AFORA), University of the Sunshine Coast.
- Ghaffariyan, M.R., Acuna, M., Brown, M., 2013. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: A case study in Western Australia. *Biomass and Bioenergy* 59, 486–493. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.029>
- GHG Protocol, 2024. GHG Protocol. Standards & Guidance [Dokument WWW]. Greenhouse Gas Protocol. URL <https://ghgprotocol.org/> (dostęp 23.10.2024).
- Giasson, L.-A., Thiffault, E., Lebel, L., Carle, J.-F., 2023. Carbon balance of forest management and wood production in the boreal forest of Quebec (Canada). *Front. For. Glob. Change* 6, 1242218. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1242218>
- Globenergia, 2024. Jakie drewno będzie można wykorzystać energetycznie? [Dokument WWW]. GLOBENERGIA. URL <https://globenergia.pl/jakie-drewno-bedzie-mozna-wykorzystac-energetycznie/> (dostęp 17.10.2024).
- Główny Urząd Statystyczny, 2024. Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2024. Urząd Statystyczny w Białymstoku, Podlaski Ośrodek Badań Regionalnych, Warszawa, Białystok, Polska.
- Główny Urząd Statystyczny, 2023. Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2023. Urząd Statystyczny w Białymstoku, Podlaski Ośrodek Badań Regionalnych, Warszawa, Białystok, Polska.
- Goltsev, V., Trishkin, M., Tolonen, T., 2011. Efficiency of forest chip transportation from Russian Karelia to Finland. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 189, 1–42.
- Google, 2024. Mapa wypadków podczas pracy w lesie, kradzieży i pożarów sprzętu leśnego od 2018 r. do teraz. [Dokument WWW]. Google My Maps. URL <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1ZWwXhITnID4tPaQTRly3vx7N8j3V2kJW&hl=pl> (dostęp 1.03.2025).
- Greulich, F., 2002. Transportation networks in forest harvesting: early development of the theory, w: Yoshimura (Red.), *Proceedings of International Seminar on New Roles of Plantation Forestry Requiring Appropriate Tending and Harvesting Operations*. Presented at the The Japan Forest Engineering Society, IUFRO, September 29 - October 5, 2002, Tokyo, Japan, pp. 57–67.
- Grigorev, I., Kunickaya, O., Tikhonov, E., Hertz, E., Khakhina, A., Burmistrova, O., Sukhomlinova, N., Zhuk, A., 2021. Methodology for Assessing and Managing the Environmental Performance of Skidding and Feller Buncher Tractors. *Forests* 12, 1723. <https://doi.org/10.3390/f12121723>
- Gronalt, M., Rauch, P., 2018. Analyzing railroad terminal performance in the timber industry supply chain – a simulation study. *International Journal of Forest Engineering* 29, 162–170. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1488913>
- Grzywiński, W., Jelonek, T., Tomczak, A., 2019. Obciążenie fizyczne na stanowiskach leśniczego i podleśniczego. *Sylwan* 163, 811–819.
- Guillot, J.D., 2023. Redukcja emisji gazów cieplarnianych: cele i przepisy Unii Europejskiej.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2011. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environ. Sci. Technol.* 45, 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Gustavsson, L., Haus, S., Lundblad, M., Lundström, A., Ortiz, C.A., Sathre, R., Truong, N.L., Wikberg, P.-E., 2017. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 612–624. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.056>
- Haavikko, H., Kärhä, K., Poikela, A., Korvenranta, M., Palander, T., 2022. Fuel Consumption, Greenhouse Gas Emissions, and Energy Efficiency of Wood-Harvesting Operations: A Case Study of Stora Enso in Finland. *Croatian journal of forest engineering* 43, 79–97. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1101>

- Heinimann, H.R., 2004. Harvesting | forest operations under mountainous conditions, w: Burley, J. (Red.), *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier, Oxford, UK, pp. 279–285.
- Heinrich, R., Arzberger, U., 2004. Harvesting | forest operations under mountainous conditions, w: Burley, J. (Red.), *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier, Oxford, UK, pp. 247–252.
- Hirsch, P., 2011. Minimizing Empty Truck Loads in Round Timber Transport with Tabu Search Strategies. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management* 4, 15–41. <https://doi.org/10.4018/jisscm.2011040102>
- Hirsch, P., Gronalt, M., 2013. The timber transport order smoothing problem as part of the three-stage planning approach for round timber transport. *Journal of Applied Operational Research* 5, 70–81.
- Holzskurier, 2020. 10 największych tartaków w Europie po transakcji Klausnera. PIGPD - Polska Izba Gospodarcza Przemysłu Drzewnego. URL <https://pigpd.pl/10-najwiekszych-tartakow-w-europie-po-transakcji-klausnera/> (dostęp 13.11.2024).
- Hościło, A., Mirończuk, A., Lewandowska, A., 2016. Określenie rzeczywistej powierzchni lasów w Polsce na podstawie dostępnych danych przestrzennych. *Sylwan* 160, 627–634. <https://doi.org/10.26202/SYLAN.2016067>
- Hudiburg, T.W., Law, B.E., Moomaw, W.R., Harmon, M.E., Stenzel, J.E., 2019. Meeting GHG reduction targets requires accounting for all forest sector emissions. *Environmental Research Letters* 14, 095005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab28bb>
- hyundai-hm, 2024. 10 million kilometres for the environment. And it goes on! Hyundai Hydrogen Mobility. URL <https://hyundaihm.com/10-millionen-kilometer-fuer-die-umwelt-und-es-geht-weiter/> (dostęp 4.10.2024).
- IPCC, 2023. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2nd ed, 2006. . International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jagodziński, A.M., Pietras, M., Dyderski, M.K., 2020. Migracje drzew i grzybów mykoryzowych w wyniku przesuwania się stref klimatycznych, w: *Zmiana Klimatu - Skutki Dla Polskiego Społeczeństwa i Gospodarki*. Komitet Prognoz „Polska 2000 Plus” przy Prezydium PAN, Warszawa, pp. 75–96.
- Jakubek, A., 2022. Elektromobilność w lesie? Ponnse przedstawiło forwarder EV1 [Dokument WWW]. profitechnika.pl. URL <https://profitechnika.pl/aktualnosci/elektromobilnosc-w-lesie-ponnse-predstawilo-forwarder-ev1-2353753> (dostęp 29.11.2024).
- Janák, K., 2007. Differences in round wood measurements using electronic 2D and 3D systems and standard manual method. *Drvna industrija* 58, 127–133.
- Jaszczak, R., Adamowicz, K., Wajchman-Świtalska, S., Miotke, M., 2018. Wybrane aspekty tworzenia planów urzędzenia lasu w Polsce. *Sylwan* 162, 795–807. <https://doi.org/10.26202/SYLAN.2018089>
- Jaszczyk, L., 2006. *Dostawa i odbiór drewna okrągłego. Poradnik dla ucznia*. Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom.
- Jaworski, B., 2024. Szwedzki przemysł drzewny w liczbach – Szczecin i Police – PARTNER [Dokument WWW]. partner.szczecin.pl. URL <https://partner.szczecin.pl/szwedzki-przemysl-drzewny-w-liczbach/> (dostęp 13.11.2024).
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10, 423–436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- Jodłowski, K., Moskalik, T., Tomusiak, R., Sarzyński, W., 2016. Logistic analysis of wood chips procurement chain from forest to power industry plants., w: Gendek, A., Moskalik, T. (Red.), *From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering*. Proceedings and Abstracts of the 49th Symposium on Forest Mechanization. P.W. Polimax S.c., Warsaw, Poland, p. 306.

- Johansson, J., 2018. Collaborative governance for sustainable forestry in the emerging bio-based economy in Europe. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Environmental change issues 2018 32, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.01.009>
- Jover, J., Thomas, A., Bombardier, V., 2011. Marquage du bois dans la masse : intérêts et perspectives. Presented at the 9eim Congrès International de Génie Industriel, HAL Open Science, Oct 2011, St Sauveur, Canada, pp. 1–9.
- Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K., Ashton, S., 2009. Regional energy wood logistics - optimizing local fuel supply. *Silva Fennica* 43, 113–128.
- Karaszewski, Z., Giefing, D.F., Mederski, P.S., Bembek, M., Dobek, A., Stergiadou, A., 2013. Stand damage when harvesting timber using a tractor for extraction. *Forest Research Papers* 74, 27–33. <https://doi.org/10.2478/frp-2013-0004>
- Kärhä, K., Eliasson, L., Kühmaier, M., Spinelli, R., 2024a. Fuel Consumption and CO2 Emissions in Fully Mechanized Cut-to-Length (CTL) Harvesting Operations of Industrial Roundwood: A Review. *Current Forestry Reports* 10, 255–272. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00219-3>
- Kärhä, K., Haavikko, H., Kääriäinen, H., Palander, T., Eliasson, L., Roininen, K., 2023a. Fossil-fuel consumption and CO2eq emissions of cut-to-length industrial roundwood logging operations in Finland. *European Journal of Forest Research* 142, 547–563. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01541-4>
- Kärhä, K., Kortelainen, E., Karjalainen, A., Haavikko, H., Palander, T., 2023b. Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland. *International Journal of Forest Engineering* 34, 284–293. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>
- Kärhä, K., Nurmela, S., Karvonen, H., Kivinen, V.-P., Melkas, T., Nieminen, M., 2019. Estimating the accuracy and time consumption of a mobile machine vision application in measuring timber stacks. *Computers and Electronics in Agriculture* 158, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.040>
- Kärhä, K., Seuri, M., Bradley, A., Röser, D., Pinto, W., Dian, W., Pandur, Z., Dvořák, J., Torbjørn Jørgensen, M., Muiste, P., Irdla, M., Ginet, C., Mac Donagh, P.M., Purfürst, T., Dietz, H.-U., Spinelli, R., Suzuki, Y., Shirasawa, H., Lazdiňš, A., Visser, R., Harvey, C., Skjølaas, D., Moskalik, T., Acuna, M., Trzciński, G., Borz, S.A., Muşat, E.C., Triplat, M., Oberholzer, F., Talbot, B., Tolosana, E., von Hofsten, H., Akay, A.O., Bakay, B., Kanzian, C., Conrad Iv, J.L., Olivera, A., Petković, V., Gonçalves Robert, R.C., Suppi Costa, L.H., Coelho Da Cruz, R., Krumov, T., 2024b. Overview of Global Long-Distance Road Transportation of Industrial Roundwood. *Croatian journal of forest engineering* 45, 217–236. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2286>
- Kłapeć, B., Tracz, W., Janeczko, K., 2017. Optymalizacja przewozów drewna nabywanego w jednostkach Lasów Państwowych. *Sylwan* 161, 842–850. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2017080>
- Klocek, A., 2016. Optymalizacja przewozu drewna z miejsca jego załadunku do miejsca rozładunku. *Przemysł Drzewny* 4, 68–74.
- Klvac, R., Kolařík, J., Volná, M., Drápela, K., 2013. Fuel Consumption in Timber Haulage. *Croatian Journal of Forest Engineering* 34, 229–240.
- Kocel, J., 2013. Firmy leśne w Polsce. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Kogler, C., Rauch, P., 2020. Contingency Plans for the Wood Supply Chain Based on Bottleneck and Queuing Time Analyses of a Discrete Event Simulation. *Forests* 11, 396. <https://doi.org/10.3390/f11040396>
- Koleśnikow, M., Balkiewicz-Żerek, A., Dziwulski, M., Krzysztofik, P., Rozkrut, M., Senderowicz, A., Sędzimir, K., 2024. Dekarbonizacja transportu, w: *Kwartalnik Branżowy, Analizy Sektorowe*. PKO BP, Warszawa, p. 10.
- Koleśnikow, M., Balkiewicz-Żerek, A., Dziwulski, M., Krzysztofik, P., Rozkrut, M., Senderowicz, A., Sędzimir, K., 2023. PKD 17. Produkcja papieru i wyrobów z papieru, w: *Kwartalnik Branżowy, Analizy Sektorowe*. PKO BP, Warszawa, p. 10.

- Komisja Europejska, 2020. KOMUNIKAT KOMISJI DO PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO, RADY, EUROPEJSKIEGO KOMITETU EKONOMICZNO-SPOŁECZNEGO I KOMITETU REGIONÓW Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości. Dokument nr 52020DC0789.
- Kons, K., Bergström, D., Fulvio, F.D., 2015. Effects of sieve size and assortment on wood fuel quality during chipping operations. *International Journal of Forest Engineering* 26, 114–123. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1069173>
- Koss, W., 2024. Sprawozdanie finansowo-gospodarcze za 2023 rok. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- Kozłowski, J., 2019. How to best utilise forests for carbon dioxide sequestration? *Kwartalnik NAUKA* 4, 47–56. <https://doi.org/10.24425/nauka.2019.131141>
- Kozłowski, J., Szwagrzyk, J., 2011. Rola lasów w obiegu węgla w przyrodzie, perspektywa globalna i regionalna na najbliższe dziesięciolecie.
- Kubiak, M., 1998. Transport leśny, II. ed. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.
- Kühmaier, M., Erber, G., 2018. Research trends in European forest fuel supply chains: A review of the last ten years (2007–2016) – part two: Comminution, transport & logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering* 39, 139–152.
- Kühmaier, M., Kral, I., Kanzian, C., 2022. Greenhouse Gas Emissions of the Forest Supply Chain in Austria in the Year 2018. *Sustainability* 14, 792. <https://doi.org/10.3390/su14020792>
- Labelle, E.R., Jaeger, D., 2012. Quantifying the Use of Brush Mats in Reducing Forwarder Peak Loads and Surface Contact Pressures. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33, 249.
- Labelle, E.R., Lemmer, K., 2019. Selected Environmental Impacts of Forest Harvesting Operations with Varying Degree of Mechanization. *Croatian journal of forest engineering* 40, 239–257. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.537>
- Laitila, J., Nuutinen, Y., 2015. Efficiency of Integrated Grinding and Screening of Stump Wood for Fuel at Roadside Landing with a Low-Speed Double-Shaft Grinder and a Star Screen. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36, 19–32.
- Lazdiņš, A., Kaleja, S., Zimelis, A., Spalva, G., Bārdulis, A., 2021. Productivity and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions of compact class Vimek 404 T5 harvester in thinning of young birch stands in afforested cropland, w: Proceedings of the International Scientific Conference. Presented at the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural, Latvia University of Life Sciences and Technologies, 26.-28.05.2021, Jēgļava, Latvia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27643.64806>
- Lenartowska, A., 2022. Wpływ wojny w Ukrainie na rynek drzewny. *Magazyn Biomasa*. URL <https://magazynbiomasa.pl/wplyw-wojny-w-ukrainie-na-rynek-drzewny-analiza-pigpd/> (dostęp 13.11.2024).
- Liimatainen, H., Pöllänen, M., Nykänen, L., 2020. Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland. *European Transport Research Review* 12, 14. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00403-z>
- Lijewski, P., Merkisz, J., Fuć, P., Ziółkowski, A., Rymaniak, Ł., Kusiak, W., 2017. Fuel consumption and exhaust emissions in the process of mechanized timber extraction and transport. *European Journal of Forest Research* 136, 153–160. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-1015-2>
- Lind, H., 2024. Volvo to launch hydrogen-powered trucks [Dokument WWW]. Volvo Trucks. URL <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/may/Volvo-to-launch-hydrogen-powered-trucks.html> (dostęp 4.10.2024).
- Lindroos, O., La Hera, P., Häggström, C., 2017. Drivers of Advances in Mechanized Timber Harvesting – a Selective Review of Technological Innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32, 243–258.
- Löwe, R., Sedmíková, M., Natov, P., Jankovský, M., Hejčmanová, P., Dvořák, J., 2019. Differences in Timber Volume Estimates Using Various Algorithms Available in the Control and Information Systems of Harvesters. *Forests* 10, 388. <https://doi.org/10.3390/f10050388>
- Lückge, F., Weber, H., 1997. Ökonomische und ökologische Optimierung von Rundholztransporten – dargestellt am Beispiel der Holzvermarktung der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz im



- Forstwirtschaftsjahr 1994. Ökonomische und ökologische Optimierung von Rundholztransporten – dargestellt am Beispiel der Holzvermarktung der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz im Forstwirtschaftsjahr 1994 1, 1–4.
- Lundbäck, M., Häggström, C., Nordfjell, T., 2021. Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering* 32, 202–215. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617>
- Maciak, A., Popczynski, B., 2019. Wpływ sposobu zrywki i doświadczenia wykonawcy na wielkość uszkodzeń drzew na powierzchniach trzebieżowych Nadleśnictwa Chojnów. *Sylvan* 163, 25–34.
- Madejski, P., 2023. Elektrownie i elektrociepłownie [Dokument WWW]. Paweł Madejski. Badania, Edukacja, Rozwój. URL <http://galaxy.agh.edu.pl/~madejski/elektrownie-i-elektrociepłownie/> (dostęp 28.11.2024).
- Magnuski, K., Ważyński, B., 1998. Znaczenie ładu przestrzennego w gospodarstwie leśnym. *Sylvan* 142, 17–22.
- Majchrzak, M., Szczypa, P., Adamowicz, K., 2022. Supply of Wood Biomass in Poland in Terms of Extraordinary Threat and Energy Transition. *Energies* 15, 5381. <https://doi.org/10.3390/en15155381>
- Majewski, S., 2024. (Nie) koniec moratorium MKiŚ na wycinki. Przyszłość lasów oczami przyrodników, przemysłu i nauki [Dokument WWW]. Teraz-Środowisko. URL <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/koniec-moratorium-mkis-na-wycinki-przyszlosc-lasow-oczami-prirodnikov-przemyslu-i-nauki-15728.html> (dostęp 13.11.2024).
- Makkonen, I., 2004. Saving fuel in mechanized forestry operations (IR-2004-08). Forest Engineering Research Institute of Canada, Pointe-Claire, QC, Canada.
- Malinowski, Z., 2020. Efektywność przerobu wielkowymiarowego drewna sosny w aspekcie normalizacji drewna okrągłego i tarcicy (Rozprawa doktorska). Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań, Polska.
- Manzone, M., Balsari, P., 2015. The energy consumption and economic costs of different vehicles used in transporting woodchips. *Fuel* 139, 511–515. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.003>
- Marciniak, P., 2011. Potrzeby szkoleniowe w zakresie kształcenia operatorów maszyn wielooperacyjnych przy pozyskaniu surowca drzewnego. *Zarządzanie Ochroną Przyrody w Lasach* 5, 268–285.
- Marciniec, T., Szkoda, M., 2013. Analiza łańcucha dostaw surowca drzewnego. *Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe* 14, 1497–1506.
- Marshall, H.D., 2005. Meeting the Needs of Tomorrows' Forests—New Developments in Forest Engineering (Doctoral thesis). Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- Martin, A., Owende, P.M.O., O'Mahony, M., Ward, S.M., 1999. Estimation of the Serviceability of Forest Access Roads. *International Journal of Forest Engineering* 10, 55–61.
- Martinić, I., Landekić, M., Šporčić, M., Lovrić, M., 2011. Forestry at the EU's Doorstep - How Much are We Ready in the Area of Occupational Safety in Forestry? *Croatian Journal of Forest Engineering* 32, 431–441.
- Maturana, S., Pizani, E., Vera, J., 2010. Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering* 59, 667–674. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.07.016>
- McCallum, D., 2009. Carbon Footprint (No. v. 6.0). Nelson Forest Ltd., Wellington, New Zeland.
- McConnell, T.E., 2019. Unit Costs and Trends within Louisiana's Logging Contract Rate. *Forest Products Journal* 70, 50–59. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-19-00036>
- McDonald, T.P., Haridass, K., Valenzuela, J., 2010. Mileage savings from optimization of coordinated trucking, w: Mitchell, D., Gallagher, T. (Red.), *Proceedings of 2010 COFE*. Presented at the 33rd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering, Southern Research Station, June 6-9, 2010, Auburn, AL., pp. 1–11.
- Mederski, P., Jędrzejewska, M., Borzyszkowski, W., Krzewina, W., 2021. Accuracy of selected photo-optical methods for logs diameters measuring of stacked wood, w: *Proceedings of the Innovative*



- Methods of Wood Measuring in Forestry and the Wood Industry. Poznań University of Life Sciences, Poznań, Poland, p. 25.
- Mederski, P.S., Karaszewski, Z., Rosińska, M., Bembenek, M., 2016. Dynamika zmian liczby harwesterów w Polsce oraz czynniki determinujące ich występowanie. *Sylwan* 160, 795–804. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2016030>
- Mederski, P.S., Naskrent, B., Tomczak, A., Tomczak, K., 2024. Accuracy of Photo-Optical Timber Measurement Using a Stereo Camera Technology. *Croatian journal of forest engineering* 45, 157–167. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2268>
- Medved, M., 1998. Nezgode in tveganje pri poklicnem in nepoklicnem delu v gozdu. *Gozdarski Vestnik* 56, 379–389.
- Mendel, T., Kuptz, D., Hartmann, H., 2016. Fuel quality changes and dry matter losses during the storage of wood chips - Part 2: Container trials to examine the effects of fuel screening. From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering. 49th Symposium on Forest Mechanization, 4-7 September 2016, Warsaw, Poland. Proceedings and Abstracts 139–143.
- Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R., Meyer, L. (Red.), 2007. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Miętkiewicz, R., 2020. Use of unmanned flying systems in activities of voluntary fire service for safety of local community. Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Wydawnictwo Naukowe Wydziału Nauk Politycznych i Dziennikarstwa, Poznań.
- Moskalik, T., 2024. Postęp techniczno-technologiczny w leśnictwie., w: Borecki, T. (Red.), *Cywilizacyjna Rola Lasów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, pp. 177–188.
- Moskalik, T., 2006. Logistyka transportu drewna. Presented at the Forum Leśne - Człowiek Las Drewno, Międzynarodowe Targi Poznańskie, Poznań, Polska.
- Moskalik, T., 2004. Model maszynowego pozyskiwania drewna w zrównoważonym leśnictwie polskim. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Moskalik, T., Borz, S.A., Dvořák, J., Ferencik, M., Glushkov, S., Muiste, P., Lazdiņš, A., Styranivsky, O., 2017. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: a Review. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38, 231–241.
- Moskalik, T., Gendek, A., 2019. Production of Chips from Logging Residues and Their Quality for Energy: A Review of European Literature. *Forests* 10, 262. <https://doi.org/10.3390/f10030262>
- Moskalik, T., Sadowski, J., Zastocki, D., 2016. Some technological and economic aspects of logging residues bundling. *Sylwan* 160, 31–39.
- Moskalik, T., Tymendorf, Ł., van der Saar, J., Trzciniński, G., 2022. Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. *Sensors* 22, 6028. <https://doi.org/10.3390/s22166028>
- M.P. 2021 poz. 264, 2021. Polityka energetyczna Polski do 2040 r.
- Müller, F., Jaeger, D., Hanewinkel, M., 2019. Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture* 162, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.002>
- Muzeum Papiernictwa, 2024. Papiernie w Polsce [Dokument WWW]. [papiernie.pl](http://papiernie.pl). URL <https://papiernie.pl/> (dostęp 28.11.2024).
- Mydlarz, K., Wieruszewski, M., 2020. Problems of Sustainable Transport of Large-Sized Roundwood. *Sustainability* 12, 2038. <https://doi.org/10.3390/su12052038>
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M.A., Bilyera, N., Zamanian, K., 2021. Impacts of Logging-Associated Compaction on Forest Soils: A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change* 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074>
- NFAP2019, 2019. Krajowy Plan Rozliczeń Dla Leśnictwa.

- Nordfjell, T., Athanassiadis, D., Talbot, B., 2003. Fuel Consumption In Forwarders. *International Journal of Forest Engineering* 14, 11–20. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702474>
- Nordfjell, T., Bacher, M., Eriksson, L., Kadlec, J., Stampfer, K., Suadicani, K., Suwala, M., Talbot, B., 2004. Operational Factors Influencing the Efficiency in Conversion, w: Spiecker, H., Hansen, J., Klimo, E., Skovsgaard, J.P., Sterba, H., Von Teuffel, K. (Red.), *Norway Spruce Conversion: Options and Consequences*, European Forest Institute Research Reports, Volume: 18. Brill, Leiden - Boston, pp. 197–223. [https://doi.org/10.1163/9789047412908\\_011](https://doi.org/10.1163/9789047412908_011)
- Nurek, T., 2007. Metoda oceny efektywności maszynowego pozyskania drewna w warunkach lasów polskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M.A., Haddad, H., Kitukutha, N., 2020. Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability* 12, 4674. <https://doi.org/10.3390/su12114674>
- Orlikowska, K., 2022. Nieszybko zmaleją popyt na drewno i jego cena. *Gazeta Przemysłu Drzewnego*. URL <https://gpd24.pl/wiadomosci/nieszybko-zmaleja-popyt-na-drewno-i-jego-cena/> (dostęp 13.11.2024).
- Owusu-Ababio, S., Schmitt, R., 2015. Analysis of Data on Heavier Truck Weights: Case Study of Logging Trucks. *Transportation Research Record* 2478, 82–92. <https://doi.org/10.3141/2478-10>
- Öztürk, T., Şentürk, N., 2009. Analysis of pavement construction on a sample forest road section in Sariyer region. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi. Seri A* 59, 55–70.
- Pagnussat, M.B., Silva Lopes, E.D., Robert, R.C.G., 2021. Machine availability and productivity during timber harvester machine operator training. *Canadian Journal of Forest Research* 51, 433–438. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0164>
- Palander, T., 2024. Modeling Techno-Economic Wood Procurement from Renewable Forests for the Sustainable Energy Supply of a CHP Plant. *Sustainability* 16, 170. <https://doi.org/10.3390/su16010170>
- Palander, T., 2023. Data-Driven Internal Carbon Pricing Mechanism for Improving Wood Procurement in Integrated Energy and Material Production. *Energies* 16, 3473. <https://doi.org/10.3390/en16083473>
- Palander, T., Borz, S.A., Kärhä, K., 2021. Impacts of Road Infrastructure on the Environmental Efficiency of High Capacity Transportation in Harvesting of Renewable Wood Energy. *Energies* 14, 453. <https://doi.org/10.3390/en14020453>
- Palander, T., Haavikko, H., Kärhä, K., 2018. Towards sustainable wood procurement in forest industry – The energy efficiency of larger and heavier vehicles in Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96, 100–118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.043>
- Palander, T., Haavikko, H., Kortelainen, E., Kärhä, K., 2020. Comparison of Energy Efficiency Indicators of Road Transportation for Modeling Environmental Sustainability in “Green” Circular Industry. *Sustainability* 12, 2740. <https://doi.org/10.3390/su12072740>
- Palander, T., Väätäinen, J., 2005. Impacts of interenterprise collaboration and backhauling on wood procurement in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20, 177–183. <https://doi.org/10.1080/02827580510008301>
- Pandur, Z., Šušnjar, M., Bačić, M., 2021. Battery Technology: Use in Forestry. *Croatian journal of forest engineering* 42, 135–148. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.798>
- Pang, S., 2019. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. *Biotechnology Advances, Biorefining: an indispensable solution for bioresource utilization and sustainable development* 37, 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.004>
- Paradis, L., Thiffault, E., Achim, A., 2019. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research* 92, 264–277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz004>
- Parlament Europejski, 2022. Alternatywne paliwa do samochodów: jak zwiększyć ich wykorzystanie? [Dokument WWW]. Tematy | Parlament Europejski. URL <https://www.europarl.europa.eu/>

- topics/pl/article/20221013STO43019/alternatywne-paliwa-do-samochodow-jak-zwiekszyt-ich-wykorzystanie (dostęp 9.01.2025).
- Paschalis, P., Porter, B., 1994. Próba oceny uszkodzeń drzew w wyniku prac zrywkowych w sosnowych drzewostanach przedrębnych. *Sylvan* 138, 17–21.
- Paschalis-Jakubowicz, P., 2020. Polityka leśna a przyszłość lasów i leśnictwa. *Sylvan* 164, 539–548. <https://doi.org/10.26202/SYLVAN.2020053>
- Pásztor, Z., Polgár, R., 2016. Photo Analytical Method for Solid Wood Content Determination of Wood Stacks. *Journal of Advanced Agricultural Technologies* 3, 54–57. <https://doi.org/10.18178/joaat.3.1.54-57>
- Peng, L., Searchinger, T.D., Zions, J., Waite, R., 2023. The carbon costs of global wood harvests. *Nature* 620, 110–115. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06187-1>
- PGL LP, 2024. Instrukcja Urządzenia Lasu. Część I. Instrukcja sporządzania projektu planu urządzenia lasu dla nadleśnictwa. Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Warszawa.
- PGL LP, 2012. Zasady Hodowli Lasu. Załącznik nr 1 do Zarządzenia DGLP nr 108 z dnia 05 grudnia 2023 r. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.
- Picchio, R., Mederski, P.S., Tavankar, F., 2020. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports* 6, 115–128. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>
- Pilarek, Z., Gornowicz, R., Galazka, S., 2007. Biomass of pine saw timber stands growing on the fresh mixed coniferous site. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 06, 79–85.
- Pingoud, K., Ekholm, T., Sievänen, R., Huuskonen, S., Hynynen, J., 2018. Trade-offs between forest carbon stocks and harvests in a steady state – A multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management* 210, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.076>
- Płotkowski, L., Zajac, S., Wysocka-Fijorek, E., Gruchała, A., Piekutin, J., Parzych, S., 2016. Economic optimization of the rotation age of stands. *Folia Forestalia Polonica* 58, 188–197. <https://doi.org/10.1515/ffp-2016-0022>
- PN-D-95000:2002 - Surowiec drzewny - Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie, 2002. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Polska Rada Pelletu, 2023. O pellecie. Polska Rada Pelletu. URL <http://polskaradapelletu.org/o-pellecie/> (dostęp 13.11.2024).
- Poltorak, B.J., Labelle, E.R., Jaeger, D., 2018. Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats. *Soil and Tillage Research* 179, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.005>
- Popovici, R., 2013. Estimating Chainsaw Operating Costs Based on Fuel, Lubricants and Spare Parts. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering* 6, 63–68.
- Porter, B., 2012. Analiza efektywności wywozu drewna. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 1, 16–17.
- Porter, B., 1997. Techniczne, ekonomiczne i przyrodnicze aspekty zrywki drewna w sosnowych drzewostanach przedrębnych. Fundacja “Rozwój SGGW,” Warszawa, Polska.
- Poudžiunas, M., Rönqvist, M., Fjeld, D., 2004. The Potential of Improvement for Tactical Planning of Roundwood Transport in Lithuanian State Forest Enterprises. *Baltic Forestry* 10, 79–88.
- Poznański, R., 2005. Wieki rębności i wieloaspektowa ocena ich stosowności. *Sylvan* 149, 24–33.
- Poznański, R., 1987. Empiryczny i teoretyczny wzorzec wiekowej struktury gospodarstw zrębowych. *Sylvan* 131, 41–48.
- Prinz, R., 2019. Improving performance and energy efficiency of biomass supply through machine alteration and organisational redesign. *Dissertationes Forestales* 2019, 1–63. <https://doi.org/10.14214/df.276>

- Prinz, R., Laitila, J., Eliasson, L., Routa, J., Järviö, N., Asikainen, A., 2018a. Hybrid solutions as a measure to increase energy efficiency – study of a prototype of a hybrid technology chipper. *International Journal of Forest Engineering* 29, 151–161. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1505350>
- Prinz, R., Spinelli, R., Magagnotti, N., Routa, J., Asikainen, A., 2018b. Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Cleaner Production* 197, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.210>
- Rix, J.G., 2014. *Transportation Optimization in Tactical and Operational Wood Procurement Planning* (Doctoral thesis). École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Rogaczewski, R., Zimmewicz, S., Zimny, A. (Red.), 2017. *Transport i logistyka w przedsiębiorstwie, mieście i regionie. Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Naukowe SOPHIA, Katowice.
- Rong-Feng, S., Xiaozhen, Z., Chengjun, Z., 2017. Study on Drive System of Hybrid Tree Harvester. *The Scientific World Journal* 2017, 8636204. <https://doi.org/10.1155/2017/8636204>
- Rosa, W., Smykała, J., 1985. *Etat użytków przedrębnych – jego znaczenie i metody określania*. *Las Polski* 17–18.
- Röser, D., Sikanen, L., Asikainen, A., Parikka, H., Väättäinen, K., 2011. Productivity and cost of mechanized energy wood harvesting in Northern Scotland. *Biomass and Bioenergy*, ‘Biofuels and Bioenergy: Challenges and Opportunities’ Proceedings of a joint workshop of IEA Bioenergy Tasks 29, 31 and 39, August 2006, Vancouver, British Columbia, Canada 35, 4570–4580. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.028>
- Różański, H., Jabłoński, K., 2009. Economic effectiveness of logging residue bundling and chipping. *Acta Scientiarum Polonorum - Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 8, 47–51.
- Rutkowski, B., 1988. Gospodarka leśna 1975-1984 i jej rezultaty w obiekcie doświadczalnym Szczawiczne w świetle zamierzonego wprowadzenia naturalnego kierunku hodowli lasu. *Acta Agraria et Silvestria. Series Silvestris* 27, 133–143.
- Rutkowski, B., 1972. Proces decyzyjny w zarządzaniu lasu. *Sylwan* 116, 33–41.
- Rynek Papierniczy, 2024. *Przemysł celulozowo-papierniczy w Europie w roku 2023 [Dokument WWW]*. RynekPapierniczy.pl. URL <https://www.rynekpapierniczy.pl/artukul/przemysl-celulozowo-papierniczy-w-europie-w-roku-2023-4516> (dostęp 13.11.2024).
- Scania Group, 2024. *The silent 70-tonne Scania timber truck [Dokument WWW]*. SCANIA Corporate website. URL <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2024/The-silent-70-tonne-Scania-timber-truck.html> (dostęp 4.10.2024).
- Schweier, J., Magagnotti, N., Labelle, E.R., Athanassiadis, D., 2019. Sustainability Impact Assessment of Forest Operations: a Review. *Current Forestry Reports* 5, 101–113. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00091-6>
- Ściubiak, Ł., Irslinger, R., Jamrozek, P., Litwinowicz-Krakus, A., Pudło, A., Regulski, B., Majerowski, T., Traczyk, S., Pronobis, M., Kalisz, S., Majcher, J., Wasylów, J., Sołtys, J., 2023. *Raport Biomasa w Polsce*. Biomass Media Group Sp. z o.o., Poznań.
- Sefeedpari, P., Pudelko, R., Jędrejek, A., Kozak, M., Borzęcka, M., 2020. To What Extent Is Manure Produced, Distributed, and Potentially Available for Bioenergy? A Step toward Stimulating Circular Bio-Economy in Poland. *Energies* 13, 6266. <https://doi.org/10.3390/en13236266>
- Seppälä, J., Heinonen, T., Pukkala, T., Kilpeläinen, A., Mattila, T., Myllyviita, T., Asikainen, A., Peltola, H., 2019. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management* 247, 580–587. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.031>
- Serwański, Z., 2010. *Pracuj bezpiecznie: Poradnik dla rolników*. Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa.
- Shaffer, R.M., Stuart, W.B., 2005. *A Checklist for Efficient Log Trucking*. Publications, Virginia Cooperative Extension 420–094, 1–5.
- Sharf, I., Fernando, H., Gingras, J.-F., 2023. Log-Loading automation with FPI crane testbed, w: *Book of Abstract, Improving Acces to Sustainable Forest Materials in a Resource-Constrained World*.

- Presented at the 55th International Symposium on Forestry Mechanization (FORMEC), 7th Forest Engineering Conference (FEC), University of Florence, Florence, Italy, p. 134.
- Shepherd, D., Smith, S., Visser, R., 2023. Carbon Footprint of Forest Harvesting Operations in New Zealand (Programme: Harvesting & Logistic No. Report No. H060). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Siekański, P., Magda, K., Malowany, K., Rutkiewicz, J., Styk, A., Krzesłowski, J., Kowaluk, T., Zagórski, A., 2019. On-Line Laser Triangulation Scanner for Wood Logs Surface Geometry Measurement. *Sensors* 19, 1074. <https://doi.org/10.3390/s19051074>
- Sieniawski, W., 2012. Waloryzacja dostaw drewna do wybranych segmentów przemysłu drzewnego (Praca doktorska). Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa, Polska.
- Sieniawski, W., Trzcziński, G., 2010. Analysis of large-size and medium-size wood supply, w: Belbo, H. (Red.), *Forest Operations Research in the Nordic Baltic Region*. Presented at the The 2010 Nordic-Baltic conference on forest operations, October 20-22, Honne, Norway, pp. 56–57.
- Sinnett, J., 2016. More Productive Truck Configurations and Designs – Recent Developments in Canadian Forest Transport.
- Śládek, P., Neruda, J., 2007. Analysis of volume differences in measuring timber in forestry and wood industry, w: *Meeting the Needs of Tomorrow's Forests—New Developments in Forest Engineering*. Presented at the Austro2007/FORMEC'07, International Symposium on Forestry Mechanisation, October 7-11, Wien, Austria, pp. 1–11.
- Ślusarz, A., Krysiak, P., 2023. Ślad węglowy MSP w kontekście unijnych dyrektyw oraz wymagań rynkowych [Dokument WWW]. Portal nowoczesnego przedsiębiorcy [zafirmowani.pl](https://www.zafirmowani.pl). URL <https://www.zafirmowani.pl/artykuly-i-wideo/prowadzenie-dzialalnosci/slاد-weglowy-msp/> (dostęp 18.10.2024).
- Smyth, C.E., Xu, Z., Lemprière, T.C., Kurz, W.A., 2020. Climate change mitigation in British Columbia's forest sector: GHG reductions, costs, and environmental impacts. *Carbon Balance and Management* 15, 21. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00155-2>
- Sonne, E., 2006. Greenhouse Gas Emissions from Forestry Operations. *Journal of Environmental Quality* 35, 1439–1450. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0159>
- Sowa, J., 2013. Potrzeba zrozumienia. *Drwal. Pismo Przedsiębiorców Leśnych* 4, 10–12.
- Spinelli, R., Cavallo, E., Eliasson, L., Facello, A., Magagnotti, N., 2015. The effect of drum design on chipper performance. *Renewable Energy* 81, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.008>
- Spinelli, R., Magagnotti, N., Picchi, G., 2011. Annual use, economic life and residual value of cut-to-length harvesting machines. *Journal of Forest Economics* 17, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.03.003>
- Stańczykiewicz, A., 2003. Wpływ wybranych technologii pozyskiwania drewna na rodzaj i wielkość szkód w drzewostanie. Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Kraków.
- Stańczykiewicz, A., Szewczyk, G., Brzoza, B., 2023. Efektywność pozyskiwania drewna harvesterem w młodszych trzebieżowych drzewostanach sosnowych w zależności od technologii pracy. *Forest Research Papers / Leśne prace badawcze* 83, 16–24. <https://doi.org/10.48538/lpb-2023-0002>
- Stańczykiewicz, A., Szewczyk, G., Tylek, P., 2021. Accuracy and time consuming of medium and large-size wood, w: *Proceedings of the Innovative Methods of Wood Measuring in Forestry and the Wood Industry*. Poznań University of Life Sciences, Poznań, Poland, p. 25.
- Stępień, E., 2005. Rola etatu jako regulatora rozmiaru użytkowania lasu. *Sykwant* 149, 45–54.
- Stępień, E., Klusek, J., Orzechowski, M., 1999. Ład czasowy w przebudowie wybranych drzewostanów Nadleśnictwa Kozienice [LKP Puszczy Kozienickiej]. *Sykwant* 143, 5–14.
- Stereńczak, K., Moskaliak, T., 2014. Use of LIDAR-based digital terrain model and single tree segmentation data for optimal forest skid trail network. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 8, 661. <https://doi.org/10.3832/ifer1355-007>
- Stolarski, M.J., Warmański, K., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E., Akincza, M., 2020. Bioenergy technologies and biomass potential vary in Northern European countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133, 110238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110238>



- Sukhanov, Y., Seliverstov, A., Gerasimov, Y., 2013a. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Northwest Russia. *Advanced Materials Research* 740, 799–804. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.740.799>
- Sukhanov, Y., Sokolov, A., Gerasimov, Y., 2013b. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Karelia. *Resources and Technology* 10, 1–23. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2013.1941>
- Suwała, M., 2000. *Poradnik użytkownika lasu dla leśników praktyków*. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Svenson, G., 2011. The impact of road characteristics on fuel consumption for timber trucks, w: Ackerman, P., Ham, H., Gleasure, E. (Red.), *Proceedings of the 4th Forest Engineering Conference: Innovation in Forest Engineering – Adapting to Structural Change*. Stellenbosch University, Matieland, South Africa.
- Szada-Borzyszkowski, W., Szada-Borzyszkowska, M., 2018. Usprawnienie przewozu drewna z lasu do magazynu. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 19, 101–104. <https://doi.org/10.24136/atest.2018.293>
- Szewczyk, K., 2021. Zmiany w otoczeniu firm sektora usług leśnych. *Sylwan* 165, 245–255. <https://doi.org/10.26202/SYLWAN.2020078>
- Szyc, K., Borecki, T., Stępień, E., Kędziora, W., Konieczny, A., Orzechowski, M., Wójcik, R., 2020. Modelowanie wielkości użytkowania rębnego drzewostanów w zależności od przyjętych metod prognozowania rozwoju lasu. *Sylwan* 164, 280–291. <https://doi.org/10.26202/SYLWAN.2019085>
- Szyc, K., Sot, T., Zawodnik, N., Żak, K., Wójcik, R., 2023. Implementation of non-productive services of forests in the Kozienice Forest District: an economic consequence assessment. *Sylwan* 167, 211–220. <https://doi.org/10.26202/SYLWAN.2023005>
- Szypulska, A., 2024. 3 scenariusze w przypadku zmniejszenia pozyskania drewna [Dokument WWW]. Edukacja i aktualności dla branży meblarskiej BIZNES.meble.pl. URL <https://biznes.meble.pl/edukacja/3-scenariusze-w-przypadku-zmniejszenia-pozyskania-drewna/> (dostęp 18.10.2024).
- Tahvanainen, T., Anttila, P., 2011. Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. *Biomass and Bioenergy*, Proceedings of a workshop of IEA Bioenergy Task 31 on ‘Sustainable forestry systems for bioenergy: Integration, Innovation and Information’ 35, 3360–3375. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.014>
- Torbjörn, J., 2019. Logset launches new hybrid harvester [Dokument WWW]. *NordicWoodJournal*. URL <https://www.woodbusiness.ca/logset-launches-new-hybrid-harvester/> (dostęp 29.11.2024).
- Torbjörn, J., 2017. Logset 12H GTE hybrid-electric harvester [Dokument WWW]. *NordicWoodJournal*. URL <https://nordicwoodjournal.com/editorial/equipments/logset-12h-gte-electric-hybrid-harvester/> (dostęp 9.01.2025).
- Trzcianowska, M., 2020. *Développement d’une méthodologie systématique de conception des cours à bois* (Doctoral thesis). Université Laval, Québec, Canada.
- Trzcianowska, M., Beaudoin, D., LeBel, L., 2019. Current Practices in Log Yard Design and Operations in the Province of Quebec, Canada. *Forest Products Journal* 69, 248–259. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-19-00018>
- Trzcinski, G., Moskalik, T., Wojtan, R., 2018. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests* 9, 164. <https://doi.org/10.3390/f9040164>
- Trzcinski, G., Moskalik, T., Wojtan, R., Tymendorf, L., 2017. Zmienność ładunków i masy całkowitej zestawów wywozowych przy transporcie drewna. *Sylwan* 161, 1026–1034.
- Trzcinski, G., Tymendorf, L., 2022. Axle load on roundwood truck transport set in relation to load, set type, season and gross vehicle weight. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty* 65. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.419.08>
- Tuomasjukka, D., den Herder, M., Kunttu, J., Serrano León, H., Orazio, C., Wallius, V., Rois, M., Prinz, R., Routa, J., 2021. Sustainability Assessment of current and recommended methods: TECH4EFFECT project report, Natural resources and bioeconomy studies 48/2021. Natural Resources Institute Finland (Luke), Helsinki, Finland.



- Tuomasjukka, D., Martire, S., Lindner, M., Athanassiadis, D., Kühmaier, M., Tumajer, J., Vis, M., Spinelli, R., Dees, M., Prinz, R., Routa, J., Asikainen, A., 2018. Sustainability impacts of increased forest biomass feedstock supply – a comparative assessment of technological solutions. *International Journal of Forest Engineering* 29, 99–116. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1459372>
- Tymendorf, Ł., Trzcziński, G., 2020. Przejazdy po drogach leśnych i publicznych przy dostawach wielkowymiarowego drewna sosnowego do tartaku. *Sylwan* 164, 651–662. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020045>
- Väätäinen, K., Anttila, P., Eliasson, L., Enström, J., Laitila, J., Prinz, R., Routa, J., 2021. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden. *Croat. j. for. eng. (Online)* 42, 39–61. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.803>
- Vance, E.D., Prisley, S.P., Schilling, E.B., Tatum, V.L., Wigley, T.B., Lucier, A.A., Van Deusen, P.C., 2018. Environmental implications of harvesting lower-value biomass in forests. *Forest Ecology and Management* 407, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.023>
- Vanzetti, N., Broz, D., Corsano, G., Montagna, J.M., 2018. An optimization approach for multiperiod production planning in a sawmill. *Forest Policy and Economics* 97, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.09.001>
- Vasiliaskas, R., 2001. Damage to trees due to forestry operations and its pathological significance in temperate forests: a literature review. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 74, 319–336. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.4.319>
- Velvet, 2021. Certyfikat FSC CoC, PEFC CoC — co to jest? Velvet. URL <https://velvet.pl/certyfikat-fsc-coc-pefc-coc-co-to-jest/> (dostęp 13.11.2024).
- Venäläinen, P., 2015. Puutavaran HCT-yhdistelmien tutkimus [Dokument WWW]. [ammattilehti.fi](http://ammattilehti.fi). URL <https://www.ammattilehti.fi/%C2%A7%C2%A7%C2%A7/uitiset.html?a300=27809> (dostęp 3.10.2024).
- Viki, F., 2024. Wyzwania i odporność przemysłu celulozowo-papierniczego w 2023 roku [Dokument WWW]. Producent Opakowań Tekturowych Viki Family Warszawa. URL <https://viki.com.pl/wyzwania-i-odpornosc-przemyslu-celulozowo-papierniczego-w-2023-roku/> (dostęp 13.11.2024).
- Vinnova, 2024. TREE - TRansition to Efficient Electrified forestry transport [Dokument WWW]. Sweden's innovation agency - Vinnova.se. URL <https://www.vinnova.se/en/p/tree---transition-to-efficient-electrified-forestry-transport> (dostęp 4.10.2024).
- Weber, D., 2024. La filière Bois [Dokument WWW]. Conseil national de l'industrie - conseil-national-industrie.gouv.fr. URL <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/comites-strategiques-de-filiere/la-filiere-bois> (dostęp 17.10.2024).
- Weiner, J., 2020. *Życie i ewolucja biosfery*, 3rd ed. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Wibig, J., 2020. Współczesne zmiany klimatu – obserwacje, przyczyny, prognozy, w: Prandecki, K., Burchard-Dziubińska, M. (Red.), *Zmiana Klimatu - Skutki Dla Polskiego Społeczeństwa i Gospodarki*. Komitet Prognoz „Polska 2000 Plus” przy Prezydium PAN, Warszawa, pp. 13–46.
- Wieruszewski, M., Górna, A., Mydlarz, K., Adamowicz, K., 2022a. Wood Biomass Resources in Poland Depending on Forest Structure and Industrial Processing of Wood Raw Material. *Energies* 15, 4897. <https://doi.org/10.3390/en15134897>
- Wieruszewski, M., Górna, A., Stanula, Z., Adamowicz, K., 2022b. Energy Use of Woody Biomass in Poland: Its Resources and Harvesting Form. *Energies* 15, 6812. <https://doi.org/10.3390/en15186812>
- Wieruszewski, M., Trociński, A., Kawalerczyk, J., Mydlarz, K., 2020. Logistyka dostaw surowca sosnowego. *Sylwan* 164, 637–642.
- Wiśniewski, G., 2022. Produkcja energii elektrycznej z OZE - podsumowanie roku 2021 [Dokument WWW]. Energetyka, Rynek energii - cire.pl - energetyka zaczyna dzień od CIRE. URL <https://www.cire.pl/artykuly/opinie/produkcja-energii-elektrycznej-z-oze---podsumowanie-roku-2021-> (dostęp 17.10.2024).

- Wnorowska, M., 2023. TOP25 największych przedsiębiorstw tartacznych. Czy w Polsce wygrywa ten, kto przeciera najwięcej, czy ten, kto zrezygnował z przetarcia? *Przemysł Drzewny. Research&Development* 4, 21–32.
- Woch, F., Hernik, J., Sankowski, E., Pióro, P., Pazdan, M., Noszczyk, T., 2019. Evaluating the Potential Use of Forest Biomass for Renewable Energy: A Case Study with Elements of a Systems Approach. *Polish Journal of Environmental Studies* 29, 885–891. <https://doi.org/10.15244/pjoes/100670>
- Wójcik, K., 2020. Rozmiar uszkodzeń drzew pozostających podczas nasiębniernej zrywki w drzewostanie sosnowym przy wykorzystaniu posztucznej metody szacowania. *Sylvan* 164, 216–225. <https://doi.org/10.26202/sylvan.2019090>
- Wójcik, R., 2013. Obrębowa metoda szacowania użytków trzebieżowych w planowaniu rocznym, *Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.*
- Wolfsmayr, U.J., Merenda, R., Rauch, P., Longo, F., Gronalt, M., 2015. Evaluating primary forest fuel rail terminals with discrete event simulation: A case study from Austria. *Annals of Forest Research* 59, 145–164. <https://doi.org/10.15287/afr.2015.428>
- Wolfsmayr, U.J., Rauch, P., 2014. The primary forest fuel supply chain: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 60, 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.025>
- Wołk, 1989. *Opracowanie normatywów czasu w przemyśle. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.*
- Woodrooffe, J., 2016. Opportunity Cost for Society Related to U.S. Truck Size and Weight Regulation: Freight Efficiency. *Transportation Research Record* 2547, 25–31. <https://doi.org/10.3141/2547-04>
- Zajączkowski, S., 2013. Prognozy pozyskania drewna w Polsce w perspektywie 20 lat oraz możliwości ich wykorzystania do szacowania zasobów drewna na cele energetyczne., w: Gołos, P., Kaliszewski, A. (Red.), *Biomasa leśna na cele energetyczne. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary*, pp. 21–32.
- Zajączkowski, S., 1993. Regulacja użytkowania przedrębego w powiązaniu z użytkowaniem rębnym. *Sylvan* 137, 21–26.
- Zajączkowski, S., Neroj, B., 2019. Prognoza rozwoju zasobów drzewnych w lasach polskich oraz potencjalne możliwości ich użytkowania.
- Zapałowska, A., 2022. Innowacyjne praktyki zrównoważonego rozwoju w logistyce. *Polish Journal for Sustainable Development* 26, 77–85.
- Zhang, F., Johnson, D.M., Wang, J., Yu, C., 2016. Cost, energy use and GHG emissions for forest biomass harvesting operations. *Energy* 114, 1053–1062. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.086>
- ZSL w Lesku, 2021. Symulator harwestera i forwardera [Dokument WWW]. Zespół Szkół Leśnych w Lesku. Szkoła dla leśników. URL <https://zsllesko.pl/symulator-harwestera-i-forwardera/> (dostęp 11.10.2024).
- Zychowicz, W., 2012. Metoda projektowania procesów pozyskania drewna oparta na potokach sortymentów, *Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, Polska.*
- Zychowicz, W., 2001a. Koszty eksploatacji samochodów do wywozu drewna. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej* 10, 19–22.
- Zychowicz, W., 2001b. Możliwości funkcjonowania składnic drewna w obecnych warunkach gospodarczych. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej* 2, 20–23.
- Zychowicz, W., 1996. Metoda określania racjonalnej sieci dróg i składnic leśnych w wybranym obszarze leśnym (Praca doktorska). Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa, Polska.
- Zychowicz, W., Moskalik, T., Gendek, A., Nurek, T., Kikulski, J., 2016. Logistic analysis of wood chips procurement chain from forest to power industry plants., w: Gendek, A., Moskalik, T. (Eds.), *From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering. Proceedings and Abstracts of the 49th Symposium on Forest Mechanization. P.W. Polimax S.c., Warsaw, Poland*, pp. 169–170.

- Zychowicz, W., Szuchnik, R., 2006. Analysis of effectiveness of long timber loading and unloading with the use of logging truck crane. *Annals of Warsaw Agricultural University. Agriculture (Agriculture and Engineering)* 49, 41–50.
- Zychowicz, W., Więsik, J., 2015. Wywóz drewna (Rozdział 10), w: Więsik, J. (Red.), *Urządzenia techniczne w produkcji leśnej. Tom 2: Maszyny i urządzenia do pozyskiwania i transportowania drewna*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, pp. 493–549.

**WIR**  
WYDAWNICTWO

ISBN 978-83-64377-69-3