

ROZPRAWY NAUKOWE

519

Marek Wieruszewski

KLASYFIKACJA JAKOŚCIOWO-WYTRZYMAŁOŚCIOWA  
DREWNA SOSNY ZWYCZAJNEJ  
Z POLSKI ZACHODNIEJ  
W WYBRANYCH BADANIACH NIENISZCZĄCYCH



Poznań 2019

**KOMITET REDAKCYJNY**

**Anna Golcz, Stanisław Grześ, Jolanta Komisarek, Andrzej Krauss, Andrzej Mazur,  
Sebastian Nowaczewski, Julita Reguła, Arkadiusz Sadowski,  
Jacek Wójtowski (przewodniczący), Anna Zielińska-Krybus**

Redaktor Działu

**dr hab. inż. Andrzej Krauss, prof. UPP**

Recenzent

**dr hab. inż. Paweł Kozakiewicz, prof. SGGW**  
**Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie**

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu  
Poznań 2019, Poland



Książka jest dostępna na licencji Creative Commons – Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC-ND 4.0)

Praca współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju,  
w ramach programu „Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo” BIOSTRATEG,  
na podstawie umowy nr BIOSTRATEG3/344303/14/NCBR/2018

ISSN 1896-1894

ISBN 978-83-7160-937-4

e-ISBN 978-83-67112-74-1

<https://doi.org/10.17306/978-83-67112-74-1>

<https://wydawnictwo.up.poznan.pl/book.html?isbn=978-83-67112-74-1>

Opracowanie redakcyjne

Stanisław Wójtowicz

Skład i łamanie

Exemplum

**WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO W POZNANIU**

ul. Witosza 45, 61-693 Poznań

tel.: 61 848 78 08, e-mail: [wydawnictwo@up.poznan.pl](mailto:wydawnictwo@up.poznan.pl)

<https://wydawnictwo.up.poznan.pl/>

Ark. wyd. 12,0

Wersja elektroniczna dostępna na stronie <https://wydawnictwo.up.poznan.pl/books.html?dostepnosc=open%20access> oraz w serwisie <https://www.ibuk.pl/>

## KLASYFIKACJA JAKOŚCIOWO-WYTRZYMAŁOŚCIOWA DREWNA SOSNY ZWYCZAJNEJ Z POLSKI ZACHODNIEJ W WYBRANYCH BADANIACH NIENISZCZĄCYCH

### ABSTRAKT

**Wstęp i geneza pracy.** Wzrastający popyt na surowiec drzewny wywołuje potrzebę zagospodarowania drewna o niższych parametrach jakościowych poprzez eliminację wad anatomicznych w procesie rozkroju. Nadzędnym parametrem określającym użyteczność drewna jest jego klasyfikacja jakościowo-wytrzymałościowa pozwalająca na projektowanie konstrukcji drewnianych z zastosowaniem drewna litego i klejonego w oparciu o potwierdzoną charakterystykę materiałową. Praca dotyczy wybranych właściwości jakościowo-wytrzymałościowych iglastego surowca drzewnego w aspekcie możliwości jego wykorzystania dla potrzeb konstrukcyjnych w budownictwie. Ocena jakości materiałów tartych i warstwowo klejonych drzewnych wyrobów konstrukcyjnych zależy od wytrzymałości surowca, której podstawowym wskaźnikiem jest moduł sprężystości. Stanowi on podstawę do porównawczej oceny wartości technicznej drewna. Wskaźnik ten pozwala na określenie jakości technicznej pozyskiwanych przemysłowo litych i klejonych wyrobów konstrukcyjnych z tarcicy sosny zwyczajnej krajowego pochodzenia, przeznaczonej do zastosowań w konstrukcjach drewnianych.

Praca obejmuje swoim zakresem porównanie właściwości wytrzymałościowych, określanych wybraną metodą nieniszcząca, i jakościowych surowca sosnowego pochodzącego z wydzielonych krain przyrodniczo-leśnych Polski Zachodniej. Na podstawie badań możliwe jest określenie wpływu jakości surowca drzewnego na właściwości elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do konkretnych zastosowań w budownictwie. Korelacja pomiędzy badanymi cechami lub jej brak mogą być pomocne przy klasyfikacji jakościowej oraz określeniu grup zastosowania tarcicy bocznej przeznaczonej dla budownictwa.

**Cel i metodyka badań.** Poznawczym celem pracy jest określenie zmienności jakościowej sosnowej tarcicy uzyskanej z drewna pochodzącego z polskiej bazy surowcowej. Badania dotyczą drewna dojrzałego technicznie wykorzystywanego do produkcji elementów dla budownictwa.

Zakres prac badawczych objął porównanie właściwości wytrzymałościowych i jakościowych surowca sosnowego krajowego pochodzącego z terenów Polski Zachodniej (Kraina Bałtycka, Wielkopolsko-Pomorska, Śląska) z uwzględnieniem pięciu powierzchni badawczych. Za podstawową tezę badań przyjęto zgodność jakościowo-wytrzymałościową tarcicy bocznej z sortymentami strefy centralnej (tarcicy głównej). Założono wystąpienie korelacji pomiędzy pochodzeniem materiału doświadczalnego ze stref na długości i grubości dłużyc a wytrzymałością otrzymanych materiałów tartych.

Istotną częścią pracy była także ocena przydatności wybranych testów służących do określenia wytrzymałości tych sortymentów. Elementy weryfikacji nieniszczących surowca determinują jakościowo wytrzymałościowe sortowanie przy procesie produkcji

elementów tartych z drewna sosnowego. Badania pozwalają również na dokonanie oceny jakości tarcicy bocznej stosowanej w materiałach warstwowych. Dobór materiału badawczego przeprowadzono przy uwzględnieniu czynników technologicznych zgodnych z zasadami przerobu drewna na materiały stosowane w budownictwie. Opracowano wstępną charakterystykę parametrów jakościowych surowca sosnowego, pochodzącego z wybranych rejonów Polski. Uwzględniono metody badania jakości drewna okrągłego oparte na ocenie wady budowy i wady kształtu. Surowiec drzewny w kolejnych etapach przerobów doświadczalnych został przetarty, zgodnie z najczęściej uwzględnionymi szeregami wymiarowymi pozyskiwanych sortymentów tartych stosowanych w budownictwie szkieletowym. Uwzględniono właściwości wytrzymałościowe materiałów przeznaczonych dla potrzeb budownictwa. Za podstawowe kryterium oceny surowca przyjęto jego moduł sprężystości. W celu weryfikacji jakości drewna sosnowego wprowadzono metody nieniszczące, uwzględniające badania statyczne i dynamiczne (soniczne) modułu sprężystości.

**Wyniki badań i ich analiza.** Wyniki przeprowadzonych badań i ich analiza – związana z określeniem jakości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) dla wybranej rejonizacji Polski Zachodniej w przypadku siedliska lasu mieszanego świeżego i drzewostanów w wieku rębny – pozwoliły potwierdzić liniową zależność działu strefy twardej w funkcji od średnicy badanych kłód sosnowych. Pomimo względnie dużego zróżnicowania szerokości przyrostów rocznych badanego drewna sosny można je zaliczyć do materiału wąskostoistego, o średnim udziale drewna późnego na poziomie 36%.

W trakcie pomiarów wskaźników wytrzymałościowych uzyskano wyniki świadczące o dojrzałości technicznej drewna sosny zwyczajnej. W wyniku badań modułu sprężystości podłużnej przy zginaniu stwierdzono, że najniższe wartości badanego parametru uzyskano dla elementów promieniowych, a w szczególności elementów zawierających rdzeń. Porównywalne tendencje wykazano we wszystkich badanych siedliskach. Badania elementów pozyskanych z tarcicy głównej potwierdziły zdecydowanie najwyższe wskazania wytrzymałościowe uzyskane w grupie próbek stycznych. Wysokie wartości modułu uzyskano także dla tarcicy bocznej. Uśredniając, wartości modułu uzyskane z tarcicy głównej cechowały się znacznym rozrzutem. Na podstawie badanych cech sprężystych drewna sosny pochodzącej z wyznaczonych powierzchni na terenie Polski można stwierdzić, że drewno obstawy bocznej cechuje się mniejszą lub porównywalną zmiennością jakościową w stosunku do badanej tarcicy strefy centralnej.

W badaniach dokonano oceny charakterystyki modułu sprężystości wzdłużnej, odniesionej do gęstości drewna. W analizowanych przypadkach, zarówno elementów klejonych z tarcicy bocznej, jak i tarcicy głównej, potwierdzono dodatnią korelację badanych parametrów.

Przeprowadzone w oparciu o klasyfikację wytrzymałościową tarcicy konstrukcyjnej badania właściwości mechanicznych polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej z wybranych krain przyrodniczo-leśnych pozwoliły na dokonanie jej klasyfikacji na klasy wytrzymałościowe. Wyniki badań właściwości sprężystych materiału doświadczalnego świadczą o dużym zróżnicowaniu jakości surowca. Ogólna weryfikacja prezentowanych

wyników potwierdza niższe wskazania wytrzymałościowe (moduł sprężystości) dla surowca strefy środkowej. Wykazano jednocześnie wysokie walory techniczne tarcicy obstawy bocznej. W odniesieniu do wyników uzyskiwanych w dwóch odrębnych metodycznie badaniach modułu sprężystości elementów wielkowymiarowych litych można zauważyć zawyżenie wartości „sonicznego” modułu w odniesieniu do modułu sprężystości uzyskanego w badaniu statycznym. Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe drewna sosny zwyczajnej z polskiej bazy surowcowej. Uzyskane z tarcicy bocznej elementy klejone charakteryzują się porównywalnymi właściwościami do elementów z drewna litego strefy centralnej.

**Słowa kluczowe:** drewno sosnowe, tarcica główna, tarcica boczna, drewno konstrukcyjne, drewno klejone, klasyfikacja użytkowa

## QUALITY AND STRENGTH CLASSIFICATION FOR PINE WOOD FROM THE WESTERN POLISH IN SELECTED NON-DESTRUCTIVE TESTS

### ABSTRACT

**Introduction and origin of work.** In view of the increasing demand for timber it is highly advisable to manage wood with inferior quality parameters by appropriate elimination of anatomical defects in the cutting process. The overriding parameter determining the usability of wood is provided by its qualitative endurance classification facilitating design of wooden structures using solid and glued wood based on the confirmed material characteristics. The research concerns selected quality and strength properties of softwood timber in terms of its potential use as construction wood. The quality evaluation of sawn wood and layered glued construction timber depends on the strength of the raw material, where the basic indicator is the elastic modulus. It provides the basis for a comparative assessment of the technical value of wood. This index is used to determine the technical quality of industrially obtained solid and glued construction products from Scots pine timber, intended for use in wooden structures.

The dissertation covers the scope of research, a comparison of strength properties determined by a selected non-destructive method and quality parameters of pine timber originating from the classified Natural and Forest Regions of Western Poland. On the basis of research the impact of timber quality on properties of structural elements intended for specific applications in the construction industry. The correlation between tested parameters or its absence may be helpful in the qualitative classification and designing of the use of side boards intended for construction uses.

**Purpose and methodology of research.** The pure science objective of the research is to determine qualitative variability of pine wood from timber originating from the Polish raw material base. The research concerns mature wood used in the production technology of elements for construction purposes. The scope of the research work included a comparison of strength and quality properties of domestic pine timber from various areas of Western Poland (the Baltic Forest, Greater Poland and Pomerania Forest, and the Silesia Forest regions), including five research areas. The basic assumption of the research was the compliance of quality and strength properties of side boards with the central zone assortments. A correlation was assumed to exist between the origin of experimental material from log zones (side vs. core) and strength of sawn material. An important part of the research was also connected with the assessment of the suitability of selected tests to determine strength properties of these assortments. Data from timber origin verification determine quality and stress grading during the production process of sawn pine wood elements. The tests also allow to assess quality of side timber used in layered materials.

The experimental material was selected taking into account technological factors consistent with the principles of wood processing for building materials. A preliminary

characteristic of quality parameters of pine timber from selected regions of Poland was prepared. Quality testing methods for roundwood based on the assessment of structural defects and shape defects were considered. Timber in the subsequent stages of experimental processing was sawn in accordance with the most frequently used dimensional series of assortments for frame buildings. Strength properties of materials intended for construction purposes were considered. The modulus of elasticity was assumed to be the basic criterion for timber evaluation. In order to verify the quality of pine wood, non-destructive methods were applied, including static and dynamic (sonic) tests of the elastic modulus.

**Research results and their analysis.** The results of the conducted research and analysis concerning quality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood for the selected region of Western Poland, in the case of a fresh mixed forest habitat and mature wood stands, confirmed the dependence of the heartwood zone on the function of pine wood diameter tested. Despite the relatively large variation in the width of annual growth in tested pine wood, it may be classified as close-grained wood with an average share of late wood at 36%. Measurement of strength parameters showed results confirming technical maturity of Scots pine wood. Testing of the longitudinal elasticity modulus in bending indicated that the lowest values of the tested parameter were obtained for radial elements, particularly pith elements. Comparable trends were demonstrated in all surveyed forest habitats. Examination of elements obtained from central wood confirmed the highest strength values in the group of tangential samples. High modulus values were also recorded for side wood. By averaging the values of the modulus obtained from log centre a significant dispersion of values was observed. On the basis of the tested elastic properties of pine wood originating from designated areas in Poland, it can be stated that wood of the side zone is characterized by lower or comparable qualitative variability in relation to the examined central wood. The tests assessed characteristics of the longitudinal elasticity module in relation to wood density. In the analyzed cases positive correlations of the tested parameters were confirmed. On the basis of strength classification of structural timber mechanical properties of Polish pine wood from selected natural and forestry areas facilitated its classification into strength classes. Testing results for elastic properties of the experimental material indicate high variability in timber quality. The general verification of the presented results confirms lower strength properties (elastic modulus) for the material from the log centre. At the same time, the technical advantages of side timber have been demonstrated. When comparing the results obtained in two methodically separate tests of the elastic modulus in large dimensional solid elements, one can notice an overestimation of the "sonic" value of the modulus in relation to the modulus of elasticity obtained in the static test. The results indicate very good strength properties of Scots pine wood from the Polish raw material base. Glued elements obtained from side timber are characterized by comparable properties to the solid wood elements of the central zone.

**Keywords:** pine wood, sawn timber, construction timber, glued laminated timber, structural elements, grading





## SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów .....	11
<b>1. Wstęp</b> .....	13
<b>2. Cel i zakres pracy</b> .....	15
<b>3. Przegląd literatury</b> .....	17
3.1. Występowanie i cechy sosny zwyczajnej ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) .....	17
3.2. Przyrodniczo-leśna regionalizacja Polski.....	18
3.3. Rejonizacja jakościowa drewna sosny w Polsce .....	20
3.4. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne drewna sosny .....	21
3.5. Czynniki wpływające na mechaniczne właściwości drewna sosny .....	23
3.6. Wymagania normowe dla drewna konstrukcyjnego litego klejonego warstwowo .....	26
3.7. Badania jakości drewna .....	31
3.8. Znaczenie wykorzystania drewna sosny .....	35
<b>4. Materiał i metodyka badań</b> .....	39
4.1. Dobór materiału badawczego i miejsce realizacji badań .....	39
4.2. Tarcica i półfabrykaty sosnowe .....	40
4.3. Technologia pozyskania i klejenia próbek do badań.....	43
4.4. Obliczanie wydajności materiałowej .....	46
4.5. Analiza technologiczna pozyskania tarcicy na elementy konstrukcyjne lite i klejone z różnych stref na przekroju poprzecznym drewna okrągłego .....	47
4.6. Oznaczenie właściwości fizycznych drewna sosny .....	47
4.6.1. Oznaczenie udziału części twardej drewna .....	47
4.6.2. Oznaczenie gęstości drewna .....	48
4.6.3. Oznaczenie wilgotności bezwzględnej drewna .....	49
4.6.4. Oznaczenie wybranych cech na przekrojach poprzecznych kłód .....	49
4.7. Oznaczenie właściwości mechanicznych drewna sosny .....	50
4.7.1. Oznaczenie modułu sprężystości przy zginaniu elementów wielkowiezmiarowych .....	50
4.7.2. Oznaczenie właściwości mechanicznych próbek laboratoryjnych.....	52
4.8. Klasyfikacja wytrzymałościowa klejonych elementów konstrukcyjnych wykonanych z drewna sosny zwyczajnej .....	53
4.9. Badania metodą ultradźwiękową .....	56
4.10. Statystyczne opracowanie wyników .....	57
<b>5. Wyniki i analiza badań</b> .....	61
5.1. Udział części twardej w surowcu przeznaczonym do badań .....	61
5.2. Wydajność materiałowa .....	63
5.2.1. Wydajność materiałowa przetarcia .....	63
5.2.2. Wydajność materiałowa przerobu wtórnego .....	64

5.3.	Właściwości fizyczne drewna sosny .....	64
5.3.1.	Wilgotność bezwzględna drewna .....	64
5.3.2.	Słistość i udział drewna późnego w przyrostach rocznych .....	65
5.3.3.	Gęstość drewna .....	78
5.4.	Właściwości mechaniczne próbek wielkowymiarowych .....	81
5.4.1.	Moduł sprężystości przy zginaniu .....	81
5.4.2.	Zależność modułu sprężystości od gęstości drewna .....	91
5.5.	Właściwości mechaniczne próbek laboratoryjnych .....	97
5.6.	Klasy wytrzymałości .....	106
5.7.	Prędkość propagacji fal ultradźwiękowych i soniczny moduł sprężystości w drewnie sosny .....	112
<b>6.</b>	<b>Wnioski</b> .....	<b>123</b>
<b>7.</b>	<b>Literatura</b> .....	<b>127</b>

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

$a$	– odległość od napory do najbliższej podpory (mm),
$a_i$	– odległość od środka ciężkości analizowanego przekroju złożonego (mm),
$A$	– pole przekroju elementu ( $\text{mm}^2$ ),
$b$	– szerokość przekroju (mm),
$B$	– szerokość elementu (mm),
$C$	– prędkość dźwięku (m/s),
$C_l$	– prędkość propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej (m/s),
$d_{tw}, d_k$	– średnica twardzieli i średnica kłody (m),
$E_d$	– moduł sprężystości drewna ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_{gw}$	– moduł sprężystości przy wilgotności „w” ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_{g12}$	– moduł sprężystości przy wilgotności „12%” ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_L$	– dynamiczny moduł sprężystości drewna ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_{m,g}$	– globalny moduł sprężystości ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_m$	– moduł sprężystości przy zginaniu ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_n$	– moduł sprężystości n-tego przekroju ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_{90}$	– moduł sprężystości w poprzek włókien ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_0$	– moduł sprężystości wzdłuż włókien ( $\text{N/mm}^2$ ),
$E_{c,0,mean}$	– średnia wartość modułu sprężystości drewna przy ściskaniu wzdłuż włókien ( $\text{N/mm}^2$ ),
$f_{c/0}$	– wytrzymałość wzdłuż włókien ( $\text{N/mm}^2$ ),
$f_{c/90}$	– wytrzymałość w poprzek włókien ( $\text{N/mm}^2$ ),
$f_{m,d}$	– obliczeniowa wytrzymałość drewna na zginanie ( $\text{N/mm}^2$ ),
$f_{m,k}$	– charakterystyczna wytrzymałość drewna na zginanie ( $\text{N/mm}^2$ ),
$f_m$	– wytrzymałość na zginanie ( $\text{N/mm}^2$ )
$F$	– obciążenie (N),
$(F_2 - F_1)$	– przyrost siły w zakresie pracy sprężystej elementu zginanego (N),
$h$	– wysokość przekroju (mm),
$I_i$	– moment bezwładności przekroju ( $\text{mm}^4$ ),
$k$	– zredukowany współczynnik Poissona
$k_n$	– współczynnik przeliczeniowy n-tej warstwy,
$l$	– długość elementu, rozpiętość (mm),
$m$	– masa drewna (kg),
$m_o$	– masa drewna suchego (g),
$m_w$	– masa drewna wilgotnego (g),
$M$	– moment zginający (Nmm),

$M_{max}$	– maksymalny moment zginający (Nmm),
$n_i$	– liczba różnych materiałów w obrębie przekroju,
$n$	– liczebność próby,
$N$	– liczba słoików zawartych w długości odcinka pomiarowego,
$R$	– współczynnik korelacji,
$R^2$	– współczynnik determinacji,
$S$	– odchylenie standardowe,
$S^2$	– wariancja,
$Sp$	– przeciętna szerokość przyrostu rocznego (mm),
$T$	– temperatura (°C),
$U_{Vtw}$	– udział twardzieli (%),
$V$	– odchylenie standardowe (%),
$V_d$	– objętość drewna (m <sup>3</sup> ),
$V_k$	– miąższość kłody (m <sup>3</sup> ),
$V_p$	– miąższość półfabrykatów (m <sup>3</sup> ),
$V_t$	– miąższość tarcicy po przetarciu (m <sup>3</sup> ),
$V_{tg}, V_{tb}$	– miąższość tarcicy głównej i bocznej po przetarciu (m <sup>3</sup> ),
$V_{tw}$	– miąższość strefy twardzielowej (m <sup>3</sup> ),
$w_o$	– wilgotność bezwzględna (%),
$(w_2 - w_1)$	– przyrost ugięcia odpowiadający przyrostowi siły (mm),
$W_{it}$	– wskaźnik wydajności ilościowej tarcicy (%),
$W_{ip}$	– wydajność półfabrykatów (%),
$\bar{X}$	– średnia arytmetyczna próby losowej lub zmiennych niezależnych,
$x_i$	– pojedynczy wynik próby losowej, zmienna niezależna ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),
$y$	– odległość od osi obojętnej do rozpatrywanego punktu przekroju (mm),
$y_i$	– zmienna zależna ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),
$\bar{y}$	– średnia arytmetyczna zmiennych zależnych,
$\bar{y}_i$	– wartość średniej zmiennej zależnej wyznaczonej na podstawie równania regresji,
$\alpha$	– współczynnik przeliczeniowy, $\alpha = 0,02$ ,
$\rho$	– gęstość drewna (kg/m <sup>3</sup> ),
$\rho_w$	– gęstość drewna wilgotnego (kg/m <sup>3</sup> ),
$\sigma$	– naprężenia normalne (N/mm <sup>2</sup> ).

## 1. WSTĘP

Drewno jest surowcem w pełni odnawialnym. Aby mogło konkurować z innymi ogólnie dostępnymi materiałami, musi sprostać wysokim wymaganiom jakościowym i wytrzymałościowym. Oryginalne spojrzenie na przeroby przemysłowe o charakterze ekologicznym, określającym nieograniczone możliwości drewna jako materiału budowlanego, reprezentuje obecny kierunek rozwoju drzewnictwa. Wzrastający popyt na ten materiał wywołuje potrzebę zagospodarowania również drewna o niższych parametrach jakościowych. Efekt poprawy właściwości można uzyskać poprzez odpowiednią modyfikację procesów technologicznych przerobu, jak i eliminację wad anatomicznych w procesie rozkroju i spajania odcinków bez wad (zastosowanie połączeń wieloklinowych do łączenia elementów składowych), przy zastosowaniu odpowiednich żywic klejowych (Cziesielski, 1974; Colling, 1990; Colling i Ehlbeck, 1992; Radović i Rothkopf, 2003; Brandner i Schickhofer, 2008, 2010, 2012; Bejder i in., 2010, 2011, 2012; Augustin i in., 2010; Makowski i Noskowiak, 2009; Ceccotti, 2010; Falk, 2011; Espinoza, 2016).

Nadrzędnym parametrem użyteczności drewna jest jego klasyfikacja jakościowo-wytrzymałościowa pozwalająca na projektowanie konstrukcji drewnianych z zastosowaniem drewna litego i klejonego w oparciu o potwierdzoną charakterystykę materiałową (Küch, 1943; Sterr, 1963; Dzbeński, 1995; Blass i Romani, 2001; Czuczelo, 2005; Ruszczyk, 2007).

Praca dotyczy wybranych właściwości jakościowo-wytrzymałościowych iglastego surowca drzewnego w aspekcie możliwości jego wykorzystania dla potrzeb konstrukcyjnych w budownictwie. Według wymagań normatywnych obowiązujących dla tarcicy konstrukcyjnej wyróżnia się obecnie klasy jakości wytrzymałościowej, definiowane według PN-EN 338:2011 „Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości”. Norma ta określa dwanaście klas tarcicy konstrukcyjnej oznaczanych symbolami od C14 do C50, gdzie symbol liczbowy odpowiada wytrzymałości drewna na zginanie w N/mm<sup>2</sup> (MPa). Zgodnie z PN-EN 338 i PN-EN 1995-1 dokonywane są przeliczenia wytrzymałościowe odpowiadające zastosowaniom drewna w konstrukcjach budowlanych, w których dobór materiałowy jest wynikiem dotychczasowych badań (Freas, 1949; Kollmann, 1951; Iwanow, 1956; Kollmann i Cöte, 1968; Hansen, 1971; Dziarnowski i Michniewicz, 1974; Sherwood i Stroh, 1989; Buczkowski, 2000, 2010; Szukała i Szumiński, 2003; Baszeń, 2004; Dzbeński i in., 2005; Pajchrowski i in., 2009; Krzosek, 1998a, 2002, 2009; Krzosek i Grześkiewicz, 2008; Kotwica, 2008; Kozakiewicz i Krzosek, 2013; Kránitz, 2014).

Dla drewna klejonego warstwowo (PN-EN 14080:2013 „Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo i drewno lite klejone warstwowo – Wymagania”) w zależności od wykazanej wytrzymałości na zginanie wyróżnia się tylko cztery podstawowe

dla obliczeń konstrukcyjnych klasy wytrzymałościowe oznaczone: C24, C30, C35 i C40. Drewno klejone warstwowo jest materiałem konstrukcyjnym utworzonym poprzez scalenie w formie klejenia (spojenia) warstw tarcicy równoległe do przebiegu włókien (Czechowicz, 1960; Zenkteler, 1968, 1996; Nishkian i in., 1977; Rhude, 1996).

Ocena jakości materiałów tartych i warstwowo klejonych drzewnych wyrobów konstrukcyjnych oparta jest na wytrzymałości tych materiałów. Zależność pomiędzy naprężeniem, czyli siłą przypadającą na powierzchnię, i odkształceniem (wydłużeniem względnym) są podstawą oceny jakości materiału. Podstawowym wskaźnikiem jest tu moduł sprężystości (moduł Younga) E, czyli współczynnik proporcjonalności między odkształceniem jednostkowym a wywołującym je naprężeniem. Moduł dla elementów klejonych przy zginaniu w płaszczyznach, prostopadłej oraz równoległej do spoin klejowych, określa sprężyste właściwości materiałów i stanowi podstawę do porównawczej oceny wartości technicznej drewna (Dzbeński, 1994, 1995; Krzosek, 2002, 2009; Roszyk, 2016; Chmielowski i in., 2018; Laskowska i in., 2018).

Ważnym zagadnieniem jest określenie jakości pozyskiwanych przemysłowo elementów litych i konstrukcyjnych wyrobów klejonych z tarcicy sosnowej krajowego pochodzenia przeznaczonych do zastosowań w konstrukcjach drewnianych. Praca obejmuje zakresem badań porównanie właściwości wytrzymałościowych, określanych wybraną metodą nieniszczącą, i jakościowych sosnowego surowca drzewnego pochodzącego z wydzielonych krain przyrodniczo-leśnych Polski Zachodniej. Badania tego typu były również przedmiotem innych prac (Gumiński, 1948; Mroczkiewicz, 1952; Matuszkiewicz, 1994, 2001, 2008; Andrzejewski i Weigle, 2003; Zajączkowski, 2005; Zielony, 2014). W prowadzonych badaniach uwzględniono zarówno lokalizację pozyskania materiału badawczego, jak i pochodzenie surowca na długość i grubość (strefy przekroju poprzecznego) surowca drzewnego przekładające się na jego właściwości (Kisiel, 1967; Kobyliński, 1967b; Laurow, 1973; Raczkowska i Raczkowski, 1978; Paschalis, 1980; Niedzielska i Muszyński, 1986; Splawa-Neymans, 1994; Tomczak i in., 2009).

Na postawie badań możliwe jest określenie wpływu zarówno jakości surowca drzewnego, jak i rodzaju zastosowanych technologii dla pozyskania drewna klejonego warstwowo, oraz ustalenie wpływu tych czynników na właściwości elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do konkretnych zastosowań w budownictwie. Korelacja pomiędzy badanymi cechami lub jej brak mogą być pomocne przy klasyfikacji jakościowej oraz projektowaniu zastosowania tarcicy bocznej przeznaczonej do wytworzenia drewna klejonego dla budownictwa.

## 2. CEL I ZAKRES PRACY

Poznaczącym celem pracy jest określenie zmienności jakościowej sosnowej tarcicy uzyskanej z drewna pochodzącego z krajowej bazy surowcowej. Aspektem użytkowym podjętych badań jest określenie właściwości jakościowych oraz przydatności uzyskiwanej z przerobu drewna okrągłego tarcicy głównej i bocznej jako materiału powszechnie stosowanego dla celów konstrukcyjnych. Badania dotyczą drewna dojrzałego technicznie wykorzystywanego do produkcji elementów dla budownictwa. Głównym warunkiem uzyskania surowca o pełnej dojrzałości technicznej, który był uwzględniony w badaniach, był wiek drzewostanu (Buchholz, 1975; Pazdrowski, 1988) określony jako przedział V i VI klasy wieku (surowiec sosnowy 80-120 letni).

Podobnie jak w innych pracach (Mroczkiewicz, 1952; Dziewanowski, 1967; Larson, 1967; Noskowiak i Szumiński, 2005; Krzosek, 2009; Krzosek i Grześkiewicz, 2008; Zielony 2014) materiał doświadczalny pozyskany został z wytypowanych krain przyrodniczo-leśnych na terenie Polski. Parametry techniczne wymagane w świetle obowiązujących norm zostały określone przez nieniszczące sortowanie wytrzymałościowe materiału wielkowymiarowego oraz określenie podstawowych właściwości fizycznych pozwalających na precyzyjną ocenę doboru surowca w strukturze drewna litego oraz zastosowania tarcicy bocznej na elementy klejone warstwowo. Badania wytrzymałościowe zweryfikowane zostały poprzez badania propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien.

Zakres prac badawczych objął porównanie właściwości wytrzymałościowych i jakościowych surowca sosnowego krajowego pochodzenia z terenów Polski Zachodniej (Kraina Bałtycka, Wielkopolsko-Pomorska, Śląska) z uwzględnieniem pięciu powierzchni badawczych.

Za podstawową tezę badań przyjęto zgodność jakościowo-wytrzymałościową tarcicy bocznej z sortymentami strefy centralnej (tarcicy głównej). Założono hipotezę zmiany wytrzymałości tarcicy w zależności od pochodzenia materiału doświadczalnego, zarówno ze stref na długości dłużyc, jak i grubości drewna okrągłego.

Do realizacji założonego celu zbadano i opracowano następujące zagadnienia:

- charakterystykę surowca wielkowymiarowego pochodzącego z wybranych krain przyrodniczo-leśnych, typu siedliskowego, wieku drzewostanów,
- strukturę jakościowo-wymiarową potencjalnego surowca do przerobów realnych,
- strukturę jakościowo-wymiarową pozyskiwanych elementów wielkowymiarowych,
- podstawowe właściwości fizyczne surowca,
- charakterystykę jakościową surowca poprzez: ocenę parametrów makrostrukturalnych, propagację fali ultradźwiękowej wzdłuż włókien surowca różnej proveniencji,

- właściwości wytrzymałościowe dla uzyskanych elementów konstrukcyjnych litych oraz tarcicy bocznej w postaci elementów klejonych warstwowo.

Podstawą prowadzonych badań jest weryfikacja wyników dotyczących właściwości wytrzymałościowych potwierdzających przydatność pozyskiwanych dla celów produkcyjnych materiałów tartych obstawy bocznej, w tym również „ulepszonych” poprzez eliminację wad anatomicznych i zastosowanie połączeń wieloklinowych. Badania przyczyniają się do poszerzenia wiedzy w zakresie jakości krajowego drewna sosnowego oraz określenie jego przydatności dla budownictwa z zastosowaniem racjonalnych metod przerobu tarcicy pochodzącej z surowca różnych baz surowcowych w Polsce.

Aspektem poznawczym pracy jest określenie przydatności technicznej badanych sortymentów tartych z drewna sosny, do zastosowań konstrukcyjnych ze względu na ich pochodzenie na przekroju i długości dłużyc modelowych. Zastosowane w pracy materiały tarte znajdują się w grupie sortymentów przeznaczonych do produkcji wyrobów o niższym poziomie wymagań wytrzymałościowych. Istotną częścią pracy była także ocena przydatności poszczególnych testów stosowanych do określenia jakości wytrzymałościowej tych sortymentów. Problematyka doboru metod badań nie jest ujednoczona, dając duży wybór badaczowi, co w wielu przypadkach nie pozwala na porównywanie wyników doświadczeń. Uzyskane rezultaty pracy mogą znaleźć zastosowanie w praktyce przemysłowej przy doborze surowca odpowiedniego pochodzenia. Warunki weryfikacji pochodzenia surowca są determinantą jakościowo-wytrzymałościową przy procesie produkcji elementów wielkowymiarowych z drewna, a także podczas oceny jakości uzyskanych połączeń w materiałach warstwowych.

W pracy wykorzystano publikacje autora oraz opracowania realizowane w ramach projektów badawczych finansowanych przez MNiSzW: „Badania klasyfikacji jakościowo-wytrzymałościowej litych i klejonych elementów konstrukcyjnych z krajowego drewna sosnowego różnych baz surowcowych” o numerze N N309 026639, „Przydatność drewna sosny z Borów Tucholskich do produkcji elementów konstrukcyjnych dla budownictwa szkieletowego” o numerze N N309 109040, oraz projektu „Poprawa efektywności procesowej i materiałowej w przemyśle tartacznym” finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w ramach programu „Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo” BIOSTRATEG, na podstawie umowy nr BIOSTRATEG3/344303/14/NCBR/2018.



### 3. PRZEGLĄD LITERATURY

#### 3.1. Występowanie i cechy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) to gatunek zimozielonego drzewa iglastego z rodziny sosnowatych (*Pinaceae*). Rozprzestrzeniony jest w całej Europie, zwłaszcza w jej północnej i północno-wschodniej części, aż do granic Syberii i Azji. Gatunek ten jest dobrze przystosowany do różnych warunków środowiskowych. Sosny nie spotyka się na terenach o klimacie oceanicznym i w najbardziej południowych częściach Europy. Na północy dociera na krańce Półwyspu Skandynawskiego, na Syberii sięga koła podbiegunowego. Na wschodzie sosna dochodzi do Morza Ochockiego (Zajączkowski, 1949; Czubiński, 1950; Kędziński i Chojnack, 1952; Pravdin, 1964; Critchfield i Little, 1966; Geographic, 1966; Obmiński, 1970; Encyklopedia leśna, 1980; Tyszkiewicz, 1980; Cierniewski, 1981; Giertych i Oleksyn, 1981; Cierniewski i Giertych, 1982; Boiński, 1985; Giertych, 1986; Zaręba, 1986; Przybylski, 1993; Schlichting i Pigliucci, 1998; Urbaniak, 1998; United States Department of Agriculture, 1999; Urbaniak i Karliński, 2001; Ziarnek, 2005; Sikorska, 2006).

Jako źródło drewna sosna zwyczajna wprowadzana była także poza zasięgiem naturalnego występowania – w Nowej Zelandii oraz na terenach Ameryki Północnej. Dzięki swojej dużej tolerancji ekologicznej przedarła się ze sztucznych upraw leśnych do naturalnych ekosystemów. W pewnej części stanów USA (w regionie Wielkich Jezior i Nowej Anglii) została naturalizowana, a w innych, m.in. w Ontario i Wisconsin, uznano ją za gatunek inwazyjny, groźny dla rodzimych gatunków (Encyklopedia Leśna, 1980; Barnes i in., 1997).

Na terenie Polski sosna rozprzestrzeniła się w czasie interglacjałów jako składnik borów mieszanych z udziałem brzozy i świerka. W okresie zlodowaceń wycofała się z większej części obszaru Polski. Na początku holocenu (najmłodsza epoka geologiczna), w następstwie gwałtownego ocieplenia, sosna szybko opanowała ponownie ten teren, tworząc bory mieszane i często bory sosnowe (Polskie Towarzystwo Leśne, 1980). Sosna zwyczajna jest najczęściej występującym drzewem polskich lasów. Rośnie przede wszystkim na Nizinie Polskiej, ale występuje także w lasach pozostałych krain geograficznych (Barzdajn i in., 1992, 1993, 1996; Białobok i in., 1993; Witkowska, 2002; Androsiuk i in., 2011). Obecnie gatunek ten zajmuje 69,0% w stosunku do wszystkich podstawowych rodzajów występujących w Polsce (Lasy Państwowe, 2017). Zazwyczaj siedliska borów sosnowych są tak mało żyzne, że inne gatunki drzew stanowią jedynie domieszkę dla innych rodzajów o niezbyt wygórowanych wymaganiach siedliskowych (Assmann, 1968; Białobok i in., 1993; Röhe, 1996; Urbaniak, 1998; Sikorska, 2006).

Populacje górskie sosny są oceniane jako bardzo słabe technicznie. Wyniki średnie lub poniżej średnich możemy przypisać populacjom południowo-wschodnim i północno-zachodnim. Dobre pod względem jakości technicznej surowca populacje pochodzą z północno-wschodniej części kraju (oraz szczególnie z nizin południowo-zachodniej

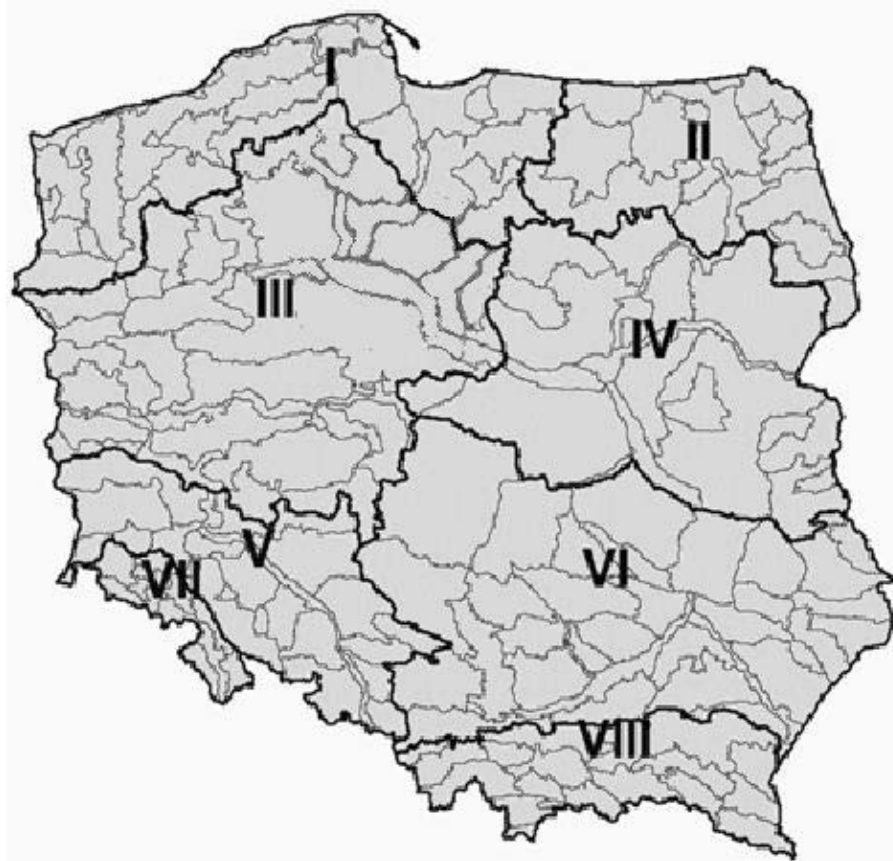
części Polski. Populacje: Ruciane, Rychtal, Karsko i Gąbin mają drewno o najwyższym ciężarze właściwym (Kowalski, 1985). Pokrój sosny zwyczajnej charakteryzuje się luźną zwiężłą koroną. Jednak w zależności od warunków bytowania rosnące samotnie sosny mają rozłożyste, dosyć gęste korony. Z kolei rosnąc w zwarciu, w skupiskach leśnych drzewa tracą dolne gałęzie i wykształcają prosty pień o wysokiej koronie zwany strzałą. Jako typową sosnę zwyczajną, nazywaną także często pospolitą, przyjmuje się drzewo osiągające wysokość 35-40 m i średnicę do 100 cm. Rzadziej, zwłaszcza na siedliskach korzystniejszych, średnica sosny może przekroczyć 100 cm. Korona w okresie młodości przyjmuje kształt stożka, z gałęziami wyrastającymi w okółkach, w późniejszym wieku przekształca się w formę parasolową o nieregularnym układzie konarów. Pień jest przeważnie do dwóch trzecich wysokości wolny od gałęzi. Konary wyrastają w pozornych okółkach, będących w rzeczywistości ciasnymi spiralami. Drzewa występujące na terenach nizinnych mają grubsze konary i korony lekko zaokrąglone. Te występujące na obszarach wyżynnych cechują się cieńszymi konarami i bardziej stożkowatym pokrojem. Kora sosny jest czerwono-brązowa, cienka i gładka w górnej części pnia, a z wiekiem w części dolnej gruba, spękana o kolorze ciemnobrązowym.

Sosna należy do gatunków twardzielowych, której twardziel po ścięciu drzewa praktycznie nie różni się od bielu. Później stopniowo ciemnieje, przyjmując kolor czerwono-żółty do czerwono-brązowego. Biel, podatny na impregnowanie o kolorze żółtawobiałym, dość szeroki, obejmuje zwykle 25 przyrostów rocznych. Sęki występują w wyraźnych okółkach, którym często towarzyszą przeżywiczka. Słojce roczne są wyraźne, a ich szerokość jest bardzo zróżnicowana, zależnie od warunków wzrostu drzewa. Drewno wczesne jest znacznie jaśniejsze od drewna późnego, z zachowaniem wyraźnej granicy pomiędzy nimi. Podczas obróbki drewna sosny w stanie świeżym występują liczne wycieki żywiczne, nadając drewnu aromatyczny, żywiczny zapach. Struktura włókien przebiega zazwyczaj prostoliniowo i równoległe do osi podłużnej, nadając dekoracyjny rysunek na gotowych wyrobach (Flindt, 2006).

### 3.2. Przyrodniczo-leśna regionalizacja Polski

Geograficzna zmienność obszaru Polski pod względem środowiska naturalnego i szaty leśnej została przestrzennie uporządkowana w formie regionalizacji przyrodniczo-leśnej. W leśnictwie, w zgodzie z przyjętym podziałem, kraina przyrodniczo-leśna stanowi jednostkę obejmującą zasięgiem wydzielony obszar o podobnych warunkach fizjograficznych oraz o takich samych warunkach typu klimatycznego, zgodny z naturalnym występowaniem poszczególnych gatunków wydzieleni drzew leśnych. Podział taki w znacznym stopniu ułatwia prowadzenie gospodarki leśnej, zwłaszcza hodowli lasu, opartej na przyrodniczych podstawach. Granice krain przyrodniczo-leśnych w znacznym stopniu pokrywają się z granicami krain geograficznych, granicami klimatycznymi oraz naturalnymi granicami występowania gatunków drzew leśnych (Sikorska,

2006). Z uwagi na znaczące zróżnicowanie obszaru Polski pod względem warunków fizjograficznych, klimatycznych oraz ukształtowania i rzeźby terenu wyodrębniono wstępnie 8 krain o różnych warunkach przyrodniczych.



Ryc. 1. Rejonizacja przyrodniczo-leśna Polski od 2010 roku: I. Kraina Bałtycka – podział na 26 mezoregionów, II. Kraina Mazursko-Podlaska – podział na 16 mezoregionów, III. Kraina Wielkopolsko-Pomorska – podział na 35 mezoregionów, IV. Kraina Mazowiecko-Podlaska – podział na 20 mezoregionów, V. Kraina Śląska – podział na 23 mezoregionów, VI. Kraina Małopolska – podział na 34 mezoregionów, VII. Kraina Sudecka – podział na 11 mezoregionów, VIII. Kraina Karpacka – podział na 18 mezoregionów (źródło: <http://www.srodowiskowa.pl>; Zielony, 2014).

Fig. 1. The natural-forest division of Poland since 2010, I. Baltic Region – division into 26 mesoregions, II. Mazury-Podlasie Region – division into 16 mesoregions, III. Wielkopolska-Pomeranian Region – division into 35 mesoregions, IV. Masovian-Podlasie region – division into 20 mesoregions, V. Silesian Region – division into 23 mesoregions, VI. The Małopolska Region – a division into 34 mesoregions, VII. Sudeten Region – division into 11 mesoregions, VIII. Carpathian Region – division into 18 mesoregions.

Pod względem powierzchniowym kraina przyrodniczo-leśna jest dużym obszarem-jednostką, w granicach której wydziela się strefy różniące się środowiskiem, glebą, klimatem. Uzasadniają one podział tych obszarów w ramach krain, z wydzieleniem mniejszych jednostek zwanych dzielnicami przyrodniczo-leśnymi, czy mezoregionami. Zgodnie z tym podziałem w 1952 roku w skład 8 krain wchodziło 36 dzielnic przyrodniczo-

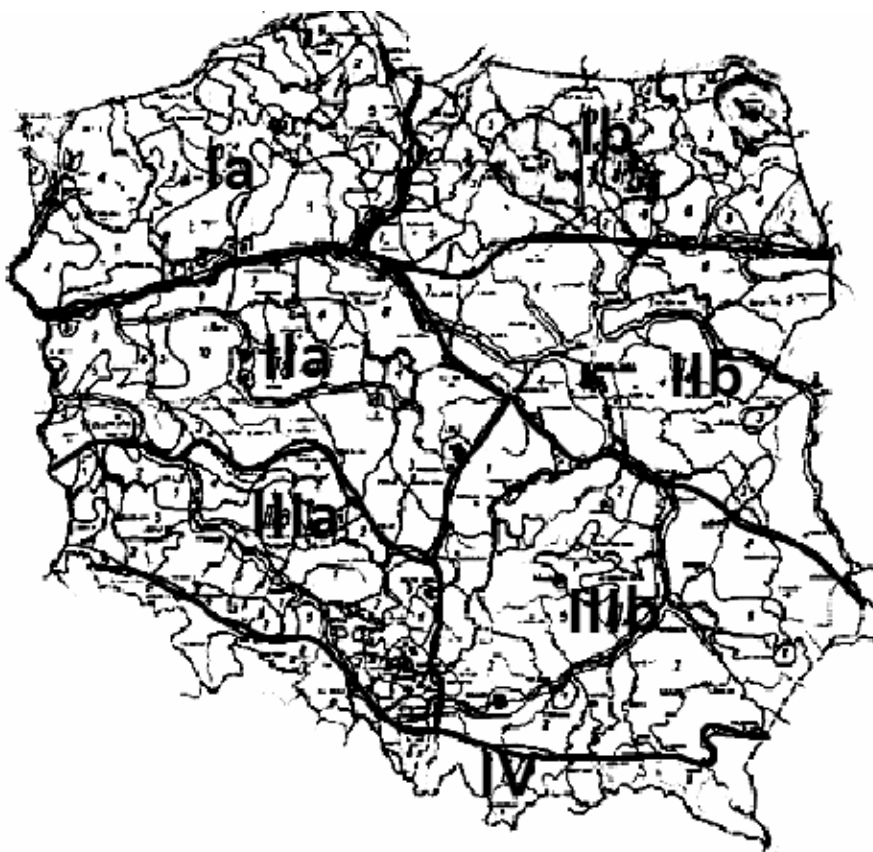
leśnych. Z kolejnymi weryfikacjami w roku 1969 i 1979 dokonano zmian dzielnic do 60. W 1990 roku wydzielono 59 dzielnic, które obejmowały 149 mezoregionów. Dopiero w 2010 zniesiono podział dzielnicowy na rzecz 183 mezoregionów (ryc. 1) (Mroczkiewicz, 1952; Zaręba, 1986; Matuszkiewicz, 1994, 2008; Sikorska, 2006; Zielony, 2014).

### 3.3. Rejonizacja jakościowa drewna sosny w Polsce

Podział Polski na krainy przyrodniczo-leśne pozwolił badaczom wytyczać ramy dla planowania i organizacji produkcji leśnej. Nie ma konieczności brania pod uwagę przy tych działaniach żyzności siedlisk leśnych i dlatego stosowana rejonizacja pozwala jedynie na tworzenie podstaw planowania dla określonego składu gatunkowego drzewostanów. Dla potrzeb szczegółowego realizowania zaplanowanej produkcji i przyjętych praktyk hodowli wydzielone zostały podziały, czyli siedliskowe typy lasu (Ilmurzyński i Mierzejewski, 1956a, 1956b). Określenie dotyczące siedliskowego typu lasu zostało oparte głównie na wiedzy o żyzności i wilgotności gleb. Gleba stanowi tu najbardziej stały i pewny czynnik określający typ siedliskowy lasu. Biorąc pod uwagę warunki siedliskowe danej krainy czy dzielnicy przyrodniczo-leśnej, możliwe jest również prognozowanie właściwości użytkowych drewna o znanym pochodzeniu. Ogólny podział klasyfikacyjny polskich lasów sosnowych z uwzględnieniem jakości pozyskiwanego surowca był przedmiotem wieloletnich badań Dziewanowskiego i innych naukowców (Zajączkowski, 1949; Dziewanowski, 1961, 1964, 1965; Kobyliński, 1967a; Mierzejewski, 1975; Paschalis, 1980; Buchholz i Hruzik, 1981; Urbaniak, 1998; Pazdrowski, 1981, 1992; Jaworski, 1995; Witkowska, 1997; Andrzejczyk i Twaróg, 1998; Urbaniak i Karliński, 2001; Andrzejczyk, 2003; Witkowska, 2003; Tomczak i in., 2009, 2013; Roszyk i in., 2016). Kierując się tym założeniem, jako podstawowe wskaźniki rozpoznawcze przyjęto wyniki szacunków brakarskich dla wszystkich nadleśnictw Polski (Dziewanowski, 1967). Na podstawie zestawienia wyników szacunków brakarskich obliczono procentowy udział poszczególnych klas jakości drewna sosnowego w Polsce. Po czym dokonano oceny jakościowej surowca sosnowego przyjmując jako główny wskaźnik procentowy udział drewna pierwszej, najwyższej klasy jakości badanych drzewostanów (ryc. 2).

Przeprowadzone badania doprowadziły do wprowadzenia podziału terytorialnego Polski w zależności od jakości drewna sosnowego pochodzącego z poszczególnych krain. Podzielono wówczas obszar Polski na cztery pasy: I Pas Sosny Pojezierskiej, II Pas Sosny Nizinnej, III Pas Sosny Wyżynnej i IV Pas Górski. Opisana rejonizacja wiązała się również z wyodrębnieniem przez Dziewanowskiego (1967) trzech klas jakościowych drzewostanów sosnowych zamkniętych w określonych granicach terytorialnych (Kondracki, 1978). Zgodnie z graficznym podziałem otrzymały one nazwy:

- drzewostany sosnowe najwyższej jakości,
- drzewostany sosnowe dobrej jakości,
- drzewostany sosnowe ostatniej jakości.



Ryc. 2. Rejonizacja jakościowa drewna sosnowego w Polsce (wg Dziewanowskiego, 1967). I. Północny pas sosny pojezierskiej: Ia – kraina sosny pojeziersko-pomorskiej, Ib – kraina sosny pojeziersko-mazurskiej; II. Środkowy pas sosny nizinnej: IIa – kraina nizinnej sosny wielkopolskiej, IIb – kraina nizinnej sosny nadbużańskiej; III. Południowy pas sosny wyżynnej: IIIa – kraina wyżynnej sosny nadodrzańskiej, IIIb – kraina wyżynnej sosny nadwiślańskiej; IV. Górski pas wyspowego występowania (Dziewanowski 1967)

Fig. 2. Quality division of pine wood in Poland (according to Dziewanowski 1967). I. Northern belt of lakeland pine: Ia – region of the Pomeranian Lakeland pine, Ib – region of Mazurian Lakeland pine; II. Central belt of lowland pine: IIa – region of Wielkopolska lowland pine, IIb – region of Bug lowland pine; III. Southern belt of upland pine: IIIa – region of Oder upland pine, IIIb – region of Vistula upland pine; IV. mountain range of island occurrence.

### 3.4. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne drewna sosny

Kluczowe znaczenie dla korzystania z sosny jako drewna konstrukcyjnego (oprócz faktu jej powszechnego występowania) mają jej dobre parametry wytrzymałościowe, połączone z łatwością wtórnego przerobu na modyfikowane półfabrykaty konstrukcyjne. Anatomiczne cechy sosny związane z jej pokrojem pozwalają uzyskać znaczną ilość materiału pochodzącego z jednej dłuzycy. Drzewa tego gatunku osiągają stosunkowo

szybko (40-80 lat) parametry decydujące o możliwości zastosowania w praktyce przemysłowej (Hruzik, 1979; Kobyliński, 1967; Buchholz i in., 1970; Buchholz i Hruzik 1981, 1990; Buchholz, 1984; Pazdrowski, 1988; Pazdrowski i Sława-Neyman, 1993, 1996). Właściwości fizyczne i mechaniczne drewna stanowią podstawowe wskaźniki świadczące o przydatności takiego materiału dla różnego rodzaju zastosowań, a zwłaszcza w konstrukcjach budowlanych. Zapisy normy PN-EN 338:2016 „Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości” wskazują na trzy główne kryteria, które wywierają zasadniczy wpływ na zasady podziału drewna jako materiału konstrukcyjnego. Pierwsza z nich to gęstość powiązana z udziałem drewna późnego (Jackowski, 1972; Fabisiak, 2005; Roszyk, 2016; Chmielowski i in., 2018). Jako podstawowa właściwość fizyczna, poprzez powiązanie z jego strukturą, gęstość odzwierciedla także właściwości mechaniczne drewna. Drugą cechą stanowi wytrzymałość na zginanie statyczne. Wpływa ona bezpośrednio na projektowanie konstrukcji drewnianych i wyznaczana jest często podczas prób wytrzymałościowych. Podstawę wytrzymałości materiałów opisaną w przywołanej normie stanowi także moduł sprężystości podłużnej, zwany także modułem Younga. Opisuje właściwości sprężyste drewna poprzez zależność pomiędzy naprężeniem (siłą przypadającą na powierzchnię) a odkształceniem (wydłużeniem względnym). Moduł Younga najczęściej wyznacza się podczas próby zginania statycznego (Gonet, 1991; Krzosek, 2011; Krzosek i Bacher, 2011; Roszyk i in., 2016).

Anizotropowa budowa drewna jest główną przyczyną znacznych różnic w wartościach tych samych właściwości wytrzymałościowych rozpatrywanych w różnych kierunkach i przekrojach anatomicznych drewna. W przypadku sosny zwyczajnej wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien osiąga dziesięciokrotnie większe wartości niż wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien ( $f_{c,0} \approx 10 f_{c,90}$ ). Dysproporcja pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie ( $f_{t,0}/f_{t,90}$ ) w tych kierunkach jest jeszcze większa, osiągając 35-krotną różnicę. Z kolei dla modułu sprężystości zależność pomiędzy właściwościami wzdłuż i w poprzek włókien wynosi  $E_0 \approx 25 E_{90}$  (Dzbeński, 1984). Dla odmiany, drewno sosny wykazuje dwukrotnie większą wytrzymałość na ścinanie w kierunku poprzecznym do włókien w porównaniu z kierunkiem wzdłużnym.

Wartości gęstości drewna wykazują znaczne różnice w zależności od wilgotności, miejsca badania na przekroju poprzecznym, a także innych czynników związanych np. z warunkami wzrostu drzewa (Trendelenburg i Mayer-Wegelin, 1955; Kobyliński, 1967b; Laurow, 1973; Połubojarinow, 1976; Raczkowska i Raczkowski, 1978; Helińska-Raczkowska i Fabisiak, 1992; Buchholz i Hruzik, 1981; Pazdrowski, 1981, 1992; Niedzielska i Muszyńska, 1986; Witkowska i Lachowicz, 2012). W praktyce, najczęściej przyjmowaną wartością średniej gęstości drewna sosny w stanie mokrym (po ścięciu) jest 750-850 kg/m<sup>3</sup>, natomiast w stanie suchym 400-550 kg/m<sup>3</sup> (dla wilgotności 12%). Istnieje także szereg innych cech fizycznych i mechanicznych wpływających w mniejszym lub większym stopniu na możliwości zastosowania sosny zwyczajnej jako materiału konstrukcyjnego.

### 3.5. Czynniki wpływające na mechaniczne właściwości drewna sosny

Właściwości mechaniczne materiałów przeznaczonych dla potrzeb budownictwa są ściśle powiązane z właściwościami fizycznymi drewna, z których materiały te zostały wykonane. Podstawowymi determinantami są: gęstość i wilgotność drewna. Wytrzymałość mechaniczna drewna rośnie wraz ze wzrostem gęstości oraz obniżaniem wilgotności bezwzględnej. Gęstość w powiązaniu ze strukturą materiału (np. udział drewna późnego w przyrostach rocznych) stanowi dobry wskaźnik właściwości mechanicznych drewna. Według zapisów normowych gęstość tarcicy ma znaczący wpływ na wytrzymałość elementów konstrukcyjnych. Drewno sosnowe to materiał, który charakteryzuje się dużą zmiennością gęstości oraz wytrzymałości. Drewno pochodzące z sosen wyrosłych na podłożu bagiennym cechuje się zazwyczaj bardzo niską gęstością ( $230 \text{ kg/m}^3$ ), a także niskim udziałem drewna późnego (poniżej 20%). Ściany komórkowe takiego drewna są bardzo cienkie. Wówczas obniżenie własności mechanicznych sięga nawet 40% w stosunku do stwierdzonej wytrzymałości dla warunków optymalnych. Te ostatnie dotyczą zwykle siedlisk borów świeżych, II i III bonitacji. W takich przypadkach gęstość drewna może nawet osiągnąć wartość  $800 \text{ kg/m}^3$ , a udział drewna późnego przekracza 50%. Wtedy wytrzymałość drewna sosny jest porównywalna z wytrzymałością drewna dębowego (Białobok, 1993; Krzysik 1978; Tyszkiewicz, 1980; Krzosek i in., 1996). Wspomniana szerokość rocznych przyrostów gatunków iglastych także wykazuje wyraźne powiązanie z jakością drewna sosny zwyczajnej w wieku rębności (Jackowski, 1972). Zgodnie z danymi literaturowymi (Kollmann, 1960) w drewnie iglastym to wąskie przyrosty roczne świadczą o wyższych parametrach jakościowych (Giertych i Oleksyn, 1981; Giertych, 1986; Gonet, 1991). Zapisy normowe PN-D-94021:2013 uwzględniają nawet przeciętną szerokość słoju jako kryterium przy określaniu klas jakości tarcicy konstrukcyjnej.

Drewno sosny zwyczajnej wykazuje także zmienność właściwości mechanicznych w części twardzielowej i bielastej. U sosny biel i twardziel zajmują po około 50% powierzchni przekroju, przy czym proporcja ta jest zmienna w zależności od wieku drzewa, warunków klimatycznych podczas wzrostu drzewa, miejsca na wysokości pnia i innych. Podczas procesu twardzielowania następuje przesylenie błon komórkowych substancjami twardzielowymi (związki żywiczne, garbniki i barwniki) o charakterze antyseptyków. Skutkuje to wyraźnie większą trwałością drewna twardzielowego w stosunku do części bielastej. Drewno twardzielowe u sosny ma nieco większą gęstość i nieznacznie lepsze właściwości mechaniczne w relacji z drewnem bielu (Krzysik, 1978; Mielczarek, 1994; Wagner, 2005).

Na obniżenie wartości użytkowych drewna konstrukcyjnego wpływają różnego rodzaju wady, które ogólnie definiowane są jako każda nieregularność spotykana w drewnie. Niektóre z nich naruszają jego budowę i obniżają wytrzymałość, czego przykładem mogą być zgnilizna i otwory po owadach. Inne zaś, takie jak sinizna, są mniej groźne, bowiem stanowią tylko powierzchniowe zmiany zabarwienia drewna. Jednakże najczęściej wadą występującą w drewnie sosnowym są sęki. Zakłócają one jednorodność budowy drewna poprzez zwiększenie twardości, gęstości oraz zmieniają kierunkowy przebieg włókien. Wytrzymałość drewna sękatego jest znacznie mniejsza przy rozciąganiu,

ściskaniu wzdłużnym oraz zginaniu statycznym w stosunku do wytrzymałości drewna bezszęcnego. Występowanie dużej ilości sęków w polskim surowcu sosnowym uważa się jako cechę wysoce negatywną, a określenie wskaźników sękatości drewna konstrukcyjnego stanowi podstawę klasyfikacji wizualnej tarcicy konstrukcyjnej. Skala obniżenia wytrzymałości drewna konstrukcyjnego zależy od wielkości i rozmieszczenia sęków w elemencie. Pojedyncze sęki, lub ich kumulacja, częstokroć decydują o klasie wytrzymałości lub nawet dyskwalifikacji danej sztuki tarcicy jako drewna konstrukcyjnego (Boutelje, 1966; Kobyliński, 1967a; Turolski i Buchholz, 1968; Skatter, 1998; Mongeau i in., 1993; Bindzi i in., 1996; Sandberg i Holmberg, 1996; Skatter i Hoibo, 1998; Baltušaitis, 2000; Rudnicki, 2007; Baumgartner i in., 2010; Burawska i in., 2012a, 2013a, 2014; Duchateau i in., 2013; Krähenbühl i in., 2014; Stängle i in., 2015).

Podobny, negatywny wpływ wywierają także inne anatomiczne cechy drewna. Najistotniejsze z nich to: występowanie zawojów, skręt włókien oraz występowanie części rdzeniowej. Wpływ zawojów na wytrzymałość drewna zależy w dużym stopniu od wymiarów sortymentu. Im mniejsze są wymiary drewna, tym wpływ zawojów większy. Z kolei wpływ skrętu włókien na mechaniczne właściwości drewna jest tym większy, im większy jest kąt nachylenia włókien. Zawartość części rdzeniowej w tarcicy konstrukcyjnej obniża jej właściwości mechaniczne. Mięksiszowe komórki rdzenia są elementem o niskiej wytrzymałości mechanicznej oraz ułatwiają rozwój grzybów. Obecność pęknięć powoduje znaczne obniżenie wytrzymałości drewna oraz straty materiałowe przy produkcji elementów przeznaczonych. Drewno miejscowo przeżywiczone nie wykazuje dużych zmian właściwości mechanicznych, jednak obecność przewodów żywicznych zmniejsza te właściwości o minimum 10%. Z punktu widzenia wytrzymałościowego podczas klasyfikacji tarcicy konstrukcyjnej pęcherze żywiczne należy traktować tak samo jak zwyczajne pęknięcia (Dzbeński i in., 2005). Chodniki owadzie, zwłaszcza głębokie i o dużej średnicy kanałów, wpływają na zmniejszenie czynnego przekroju drewna w czasie obciążenia mechanicznego. Chodniki małe są równie groźne, gdyż występują zwykle w sposób skupiony. Niezależnie od tego w tarcicy konstrukcyjnej wyższych klas jakościowych wada ta jest w zasadzie niedopuszczalna (Krzysik, 1978; Dzbeński i in., 2005).

Drewno jest materiałem anizotropowym, a jego wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, zginanie w dużym stopniu zależą od kierunku działania sił w stosunku do układu włókien. Drewno sosny, podobnie jak drewno innych gatunków, wykazuje znacznie większą wytrzymałość wzdłuż włókien. Stąd wzrost kąta odchylenia działających sił w stosunku do kierunku włókien, powoduje spadek wytrzymałości drewna (najważniejszych cech z punktu widzenia zastosowań w konstrukcji).

Oprócz wytrzymałości niezwykle ważnym parametrem opisującym własności użytkowe drewna konstrukcyjnego jest jego sztywność. Parametrem opisującym sztywność elementu konstrukcyjnego jest moduł sprężystości (Moduł Younga). Wraz ze wzrostem modułu rośnie techniczna jakość materiałów konstrukcyjnych. Anizotropowa budowa drewna powoduje, że występują różne moduły sprężystości w kierunkach podłużnym oraz promieniowym i stycznym. Moduł sprężystości można określać w badaniach ściskania, rozciągania, zginania, ścinania itp. Najczęściej wykorzystuje się wyniki wyznaczone podczas prób zginania statycznego. Stanowi to podstawę do porównawczej oceny



wartości technicznej drewna (Kowal i Surkont, 1978; Kowal, 1996; German, 2000; Orłowicz i in., 2004; Rapp i Lis, 2001, 2002; Czuczeło, 2005; Krzosek i Grzeškiewicz, 2008; Wieruszewski i in., 2010; Kozakiewicz i Krzosek, 2013). Pod względem botanicznym drewno to materiał pochodzenia roślinnego. Z punktu widzenia użytkowego opisane cechy fizyczne niejednokrotnie stanowią istotne wady. Oprócz fizycznych cech makroskopowych opisanych istnieją jeszcze inne, wywołane np. czynnikami zewnętrznymi. Spośród wielu można wymienić: niecylicyryczność, drewno reakcyjne, skręt włókien mogący powstać np. na skutek jednokierunkowego wiatru czy obciążeń własnych. Nierównomierny przebieg przyrostów rocznych tłumaczy się zaburzonym wzrostem rośliny drzewnej przy braku lub nadmiarze wody. Te i inne cechy można zaobserwować na trzech podstawowych przekrojach drewna: poprzecznym, promieniowym oraz stycznym. Większość z wyżej wymienionych wad i czynników wywiera bezpośredni lub pośredni wpływ na mechaniczne właściwości drewna konstrukcyjnego. Jakość przeznaczonego do przerobu materiału drzewnego uzależniona jest także w dużym stopniu od typu siedliskowego lasu, klasy bonitacji tego siedliska i wieku występujących na nim drzewostanów (Buchholz i Hruzik, 1970; Borowski, 1974; Paschalis, 1980; Machado i Cruz, 2005; Stępień i Lewandowska-Gross, 2013; Jelonek, 2013; Jelonek i in., 2012, 2015; Brutovská i in., 2013; Rola i in., 2014; Roszyk i in., 2016). Ważnym elementem jest tutaj dojrzałość techniczna surowca. Badania prowadzone w tym zakresie dla drewna sosny (Dziewanowski, 1965; Buchholz i Hruzik, 1973; Buchholz, 1975) wskazują na takie elementy jak: średnica i długość strefy bezsęczonej, które determinują przydatność surowca również do zastosowań konstrukcyjnych.

Wyniki licznych badań laboratoryjnych potwierdzają również ścisłą zależność budowy mikroskopowej drewna sosny z właściwościami mechanicznymi badanych prób. Potwierdzeniem tej tezy mogą być m.in. wyniki badań, które dowodzą, że powodem mniejszej gęstości młodocianego drewna sosny w porównaniu z drewnem dojrzałym są istotne różnice w grubościach ścian i wielkościach światel komórkowych. Ponadto, w drewnie młodocianym (przyrzeniowym) zaobserwowano wyraźnie mniejszy udział drewna późnego w porównaniu z drewnem dojrzałym, co wywiera oczywisty wpływ na gęstość drewna i własności mechaniczne. Drewno sosny zwyczajnej cechuje się zatem wyraźną, promieniową zmiennością wytrzymałości ścian komórkowych cewek. Wytrzymałość na rozciąganie podłużne cewek wczesnych i późnych wzrasta wraz z dojrzewaniem tkanki drzewnej i wynosi odpowiednio 150-250 N/mm<sup>2</sup> i 180-350 N/mm<sup>2</sup> (Giefing, 1989; Moliński i Krauss, 2008; Roszyk, 2016; Roszyk i in., 2016a, 2016b, 2016c; Büyüksarı i in., 2017). Stwierdzono ponadto, że owa wytrzymałość dla drewna wczesnego praktycznie nie zależy od wieku kambialnego przyrostów rocznych, wzrasta natomiast z wiekiem kambialnym rocznych przyrostów w drewnie późnym. Tak więc dla drewna dojrzałego przeciętna wartość wytrzymałości na rozciąganie jest około 4 razy wyższa dla drewna późnego w porównaniu z drewnem wczesnym. Obserwuje się także liniowy przebieg wzrostu wytrzymałości drewna (ścian komórkowych cewek) wraz ze zmniejszeniem kąta mikrofibril celulozy wchodzącej w skład ścian cewek w stosunku do podłużnej osi drzewa sosnowego. Ponadto dowiedziono, że wspomniany kąt nachylenia mikrofibril (MFA) jest prawie o 1/3 większy dla drewna wczesnego niż późnego (Fabisiak i Moliński, 2009). Ultrastrukturalne uwarunkowania w zależności od odległo-

ści od rdzenia dotyczą również wytrzymałości drewna sosny na ściskanie wzdłuż włókien. Jak wiadomo, gęstość drewna wczesnego (w obrębie części przyrzeniowej) jest znacznie mniejsza niż drewna dojrzałego. Cytując Kraussa, Fabisiaka i Szymańskiego (2009), można stwierdzić, że orientacja mikrofibryl w ścianach komórkowych i gęstość drewna są głównymi determinantami jego wytrzymałości, przy czym wpływ kąta nachylenia mikrofibryl jest większy niż wpływ gęstości. Wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien zależy w około 60% od kąta nachylenia mikrofibryl i około 40% od gęstości drewna. Wzrost kąta nachylenia mikrofibryl powoduje obniżenie wytrzymałości ścian komórkowych na ściskanie wzdłuż włókien. Znaczny wpływ na uzyskiwane własności mechaniczne drewna konstrukcyjnego wywierają warunki wzrostu drzewa (Pazdrowski i Sława-Neyman, 1993). Lepszym warunkiem biosocjalnym drzew w drzewostanie towarzyszy dłuższy okres formowania się drewna do stanu dojrzałości technicznej. Na podstawie badań zmienności długości cewek można określić zakres występowania drewna młodocianego (o zdecydowanie gorszych własnościach użytkowych), który obejmuje 20-25 przyrostów w drzewach dominujących, około 15 w średnich i 12 w drzewach opanowanych (Fabisiak, 2005). Tak więc klasa biosocjalna wywiera istotny wpływ na gęstość pozyskanego później drewna. Największą gęstość wykazuje drewno drzew opanowanych, zaś najmniejszą drzew dominujących.

### 3.6. Wymagania normowe dla drewna konstrukcyjnego litego klejonego warstwowo

Wymagania w zakresie mechanicznej obróbki drewna, związane są nie tylko z koniecznością utrzymania stabilności wymiarowej, ale również z optymalizacją kosztów produkcji. Drewno strugane wykazuje większą odporność na działania ogniowe, ponieważ płomień „ślizgają się” po struganej powierzchni, ograniczając szybkość zapalenia, a tym samym ograniczają rozprzestrzenienie się pożaru ([www.szkielet.com](http://www.szkielet.com)). Z tych też powodów oraz poddawaniu drewna procesom suszarnianym, drewno podlega mniejszemu zagrożeniu ze strony owadów. Proces taki powoduje bowiem zniszczenie zarodników grzybów domowych i pleśniowych oraz znajdujących się w drewnie owadów lub ich larw (Buczowski i in., 2010). Badania przeprowadzone w Stanach Zjednoczonych wykazały, że wygrzewanie w podwyższonych temperaturach (około 60°C) pozbawia drewno dużego udziału naturalnych substancji, które mogłyby stanowić substancję pokarmową dla szkodników. Natomiast struganie elementów konstrukcyjnych (czterostronne) zapobiega między innymi składaniu jaj przez owady na gładkiej powierzchni drewna, co ogranicza ich rozmnażanie się w obrębie drewnianej konstrukcji budynku. Polskie przepisy budowlane dotychczas nie w pełni uwzględniają jakość obróbki drewna jako metodę ochrony przed szkodnikami. Istnieje nigdzie niezapisany obowiązek ochrony dla drewnianych elementów konstrukcji przy pomocy chemicznych środków impregnujących, które w większości przypadków są niewłaściwie stosowane ([www.szkielet.com](http://www.szkielet.com)).

Jak już wspomniano, drewno ze względu na swoje pochodzenie i naturalną budowę jest materiałem niejednorodnym. Pozyskiwane do celów budowlanych w różnych regionach Europy charakteryzuje się odmiennymi właściwościami i budową w obrębie tego samego gatunku. Dlatego jakość materiałów tartych uzależniona jest w dużym stopniu od typu siedliskowego lasu, klasy bonitacji siedliska i wieku drzewostanów (Buchholz i Hruzik, 1970; Pazdrowski, 1992; Witkowska, 1997; Kärenlampi i Riekkinen, 2004; Smal i Olszewska, 2008; Jelonek i in., 2009, 2016; Tomczak i in., 2009, 2010, 2012, 2013; Cedro i Cedro, 2018). Mając zatem na uwadze wskazane powyżej aspekty oraz biorąc pod uwagę kwestię bezpieczeństwa budowli, elementy konstrukcyjne przeznaczone dla budownictwa drewnianego powinny być sortowane wytrzymałościowo (Dzbeński, 1994, 1995; Krzosek, 1995, 1998, 2009; Pajchrowski i in., 2009; PN-EN 1995-1-1). Proces taki zapewnia określenie gwarantowanych i powtarzalnych wskaźników wytrzymałościowych i prowadzi do nadania klas wytrzymałości badanym elementom konstrukcyjnym. Ponadto, klasyfikacja wytrzymałościowa tarcicy konstrukcyjnej stanowi również wymóg związany z obowiązującymi przepisami technicznymi i regulacjami prawnymi. Ze względu na zróżnicowanie cech drewna pozyskiwanego do celów budowlanych z różnych miejsc siedliskowych poszczególne wymagania normowe do niedawna także nie były jednolite. Klasyfikacja wytrzymałościowa jest także integralną częścią procedury zmierzającej do nadania wyrobom konstrukcyjnym Europejskiej Aprobaty Technicznej, oznaczanej symbolem CE. Już w 1997 roku rozpoczęto procedury znakowania produktów spełniających wymogi odpowiednich Europejskich Aprobat Technicznych (EAT). Od roku 2001 zaczęto wprowadzać w życie europejskie normy zharmonizowane, co znacznie przyspieszyło i rozwinęło proces certyfikacji (Bell, 2006; Ajdukiewicz i in., 2007; Kotwica, 2009). Oznaczenie materiałów konstrukcyjnych znakiem CE zastosowano jako rozwiązanie problemów związanych ze spełnieniem przez wyroby wymogów technicznych wymaganych w różnych krajach będących członkami Unii Europejskiej. Okres przejściowy dla obowiązku znakowania znakiem CE wyrobów konstrukcyjnych z drewna litego upłynął 01.09.2009, jednak na wniosek niektórych państw członkowskich, w tym Polski, zgodnie z Komunikatem Komisji w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej, obowiązywał do 01.09.2012 (dla certyfikacji i oznakowania CE konstrukcyjnego drewna klejonego okres przejściowy trwał do 01.12.2011). Po tym terminie drewno nieposiadające Europejskiej Aprobaty Technicznej nie może być stosowane w konstrukcjach budowlanych. Obecnie w Polsce bieżące zapotrzebowanie na certyfikowane drewno konstrukcyjne sortowane wytrzymałościowo jest w dużej mierze pokrywane poprzez import ze Szwecji, Austrii i Niemiec.

Opisana procedura certyfikacyjna umożliwia swobodny obrót towarami w krajach Unii Europejskiej bez konieczności stosowania kosztownych procedur certyfikacji indywidualnie w każdym kraju, jak miało to miejsce wcześniej. Podstawę do znakowania tarcicy konstrukcyjnej znakiem CE stanowi norma PN-EN 14081. Norma obejmuje 4 części, z których pierwsza (14081-1:2016 „Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo – Wymagania ogólne”) dotyczy sortowania metodą wizualną. Z powodu stosowania różnych metod takiego sortowania w krajach UE nie udało się ich ujednoczyć w obszarze wszystkich krajów członkowskich. Znalaziono więc kompromisowe rozwiązanie, które warunkowo zezwala

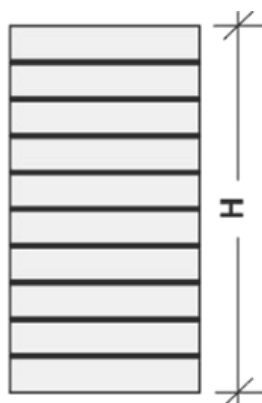
na stosowanie norm krajowych w poszczególnych krajach w oparciu o podstawowe zasady takiego sortowania wskazane w normie PN-EN 14081-1. W większości krajów UE zakończono proces, którego zadaniem było ustalenie poprawnego przyporządkowania klas drewna sortowanego wytrzymałościowo metodą wizualną, bezpośrednio do klas wytrzymałościowych C, będących efektem sortowania maszynowego według PN-EN 338. Przyporządkowanie takie znajduje się w systematycznie uaktualnianej przez kraje UE normie EN 1912. Do tego celu niezbędne są stosowne badania krajowe mające na celu wprowadzenie polskiej tarcicy konstrukcyjnej do normy EN 1912. W przypadku badań surowca drzewnego do zastosowań konstrukcyjnych niezbędne jest także przeprowadzenie badań wytrzymałościowych na podstawie normy PN-EN 408 „Konstrukcje drewniane; Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo; Oznaczenie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych”. Zapisy tej normy nakazują początkowo przeprowadzenie badań mających na celu oznaczenie właściwości wytrzymałości na zginanie, modułu sprężystości i gęstości drewna przeznaczonego na konstrukcje. Następnie należy obliczyć kolejne wartości charakterystyczne, dla wyznaczonych wartości poszczególnych cech na podstawie wzorów wskazanych w normie PN-EN 384 „Drewno konstrukcyjne – Oznaczenie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości”.

Nowe europejskie normy definiują drewno klejone warstwowo, ale także różnicują je ze względu na kierunek płaszczyzny spoiny, występujący układ warstw, określoną jakość wytrzymałościową i/lub gatunek drewna (PN-EN 14080). W oparciu o wskazane normy i inne źródła można przytoczyć najważniejsze określenia:

Drewno klejone warstwowo – element konstrukcyjny wytworzony przez zestawienie warstwowe elementów równoległe do przebiegu struktury włókien (PN-EN 14080).

Można je podzielić ze względu na układ warstw określonej jakości wytrzymałościowej i/lub gatunku drewna wg PN-EN 14080:

- jednorodne drewno klejone warstwowo – drewno klejone, którego przekrój poprzeczny został wytworzony z tarcicy jednakowej jakości i wytrzymałości z tego samego rodzaju drewna (gatunku lub kombinacji gatunków botanicznych) (ryc.3).



Ryc. 3. Drewno obstawy bocznej klejone warstwowo: jednorodne w systemie pochodzenia (homogeniczne).

Fig. 3. Side-panel laminated timber: uniform in provenance.

Ze względu na położenie płaszczyzny klejenia wg PN-EN 386 rozróżnia się:

- drewno klejone warstwowo poziomo – drewno klejone z płaszczyzną spoiny klejowej prostopadłą do dłuższego boku przekroju poprzecznego,
- drewno klejone warstwowo pionowo – drewno klejone z płaszczyzną spoiny klejowej prostopadłą do krótszego boku przekroju poprzecznego.

Drewno używane do produkcji konstrukcji klejonych powinno spełniać szereg wymagań technicznych określonych w odpowiednich normach. W normie PN-81/B-03150 sosna (*Pinus sylvestris* L.) i świerk (*Picea abies* L.) zostały wskazane jako wiodące gatunki drzew stosowanych do potrzeb produkcji konstrukcyjnego drewna klejonego warstwowo. Podobnie jak w przypadku materiałów litych niezwykle istotna jest także klasyfikacja wytrzymałościowa tarcicy, która może zostać użyta do produkcji modyfikowanych materiałów konstrukcyjnych. Klasa drewna klejonego może być określana na podstawie PN-EN 14080:2013. Wskazana norma określa system klasyfikacji wytrzymałościowej dla drewna klejonego warstwowo o poziomym układzie czterech i więcej warstw tarcicy. Określono w niej klasy: GL 20, GL 22, GL 24, GL 28, GL 30, GL 32 w zależności od wytrzymałości na zginanie. Skrót literowy „GL” (*glued laminated*) oznacza drewno klejone warstwowo, wartości liczbowe od 20 do 32 odpowiadają charakterystycznej wytrzymałości na zginanie w N/mm<sup>2</sup>. Należy dodać, że wśród elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego wyróżnia się dwa rodzaje przekrojów: przekrój złożony z tarcicy jednorodnej, o tej samej wytrzymałości – oznaczenie normowe „h” (*homogenous*) i przekrój złożony z tarcicy niejednorodnej, o różnych wytrzymałościach – oznaczenie „c” (*combinated*) (PN-EN 386; Kozakiewicz i Krzosek, 2013; Burawska, 2015). W takim układzie klejenia zapisy normy PN-EN 14080 wskazują na konieczność stosowania co najmniej dwóch warstw wykonanych z tarcicy lepszej jakości w zewnętrznym pasie klejonego elementu konstrukcyjnego. Oprócz wskazania konkretnych klas drewna spełniającego wymogi ze względu na zginanie norma określa pozostałe istotne wartości innych cech wytrzymałościowych drewna konstrukcyjnego.

Na podstawie aktualnych postanowień Europejskiego Komitetu Normalizacji tarcica wykorzystywana do produkcji konstrukcji klejonych warstwowo powinna posiadać wilgotność 8÷15%, sprawdzoną bezpośrednio przed skierowaniem jej do procesu produkcyjnego. Czasami, jeżeli jest to wymagane, powinna być także zabezpieczona impregnatami, po której to czynności jej wilgotność powinna mieścić się w zakresie 11÷18%. Wymaga się także, aby podczas przygotowywania zestawu poszczególnych warstw drewna klejonego wilgotność kolejnych warstw elementu była zbliżona, mieszcząca się w przedziale tolerancji 4%. Ponadto zapisy tej samej normy PN-EN 386 „Drewno klejone warstwowo. Wymagania eksploatacyjne i minimalne wymagania produkcyjne” wskazują na szereg wymagań w zakresie procesu produkcji konstrukcyjnych materiałów klejonych. W pierwszej części wskazuje się podział na 3 klasy użytkowania danej konstrukcji klejonej w zależności od wilgotności względnej otaczającego powietrza i czasu ewentualnych zmian takiej wilgotności. Wymogiem eksploatacyjnym jest także trwałość spoiny klejowej, gdzie próbki drewna klejonego poddaje się badaniom na rozwarstwienie w zależności od środowiska pracy danej konstrukcji (klasy użytkowania). Inną cechą określoną w normie jest wartość wytrzymałości na ścinanie spoiny klejowej. Oznacza się ją, porównując stosunek siły ścinającej do pola powierzchni ścinanego przekroju po-

przecznego z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego. Dla próbek, których grubość w kierunku włókien powierzchni ścinanej jest mniejsza niż 50 mm, powinna wynosić minimum  $6 \text{ N/mm}^2$ , w niektórych przypadkach określonych przez normę dopuszcza się wartość  $4 \text{ N/mm}^2$ . Wytrzymałość na rozwarstwienie określa się jako procent sumarycznego rozwarstwienia w zależności od metody badania, typu kleju poddanego próbom wytrzymałościowym oraz liczby cykli badawczych.

Połączenia czołowe poszczególnych warstw tarcicy podczas klejenia na długość są oceniane poprzez sprawdzenie ich wytrzymałości na zginanie. Badanie może być przeprowadzone podczas procesu technologicznego, jako jeden z jego elementów, lub po pobraniu reprezentatywnej grupy próbek elementów połączonych czołowo w linii produkcyjnej każdej zmiany (Czuczelo, 2005). PN-EN 386 wymaga, aby wytrzymałość na zginanie każdego pojedynczego lub ostatnich 15 takich złączy była większa lub równa charakterystycznej wytrzymałości na zginanie złącza czołowego. Z kolei, różnica wilgotności końców łączonych ze sobą elementów nie powinna przekraczać 5%, a temperatura w strefie złącza podczas czołowego klejenia drewna nie powinna być niższa niż  $15^\circ\text{C}$ . Sposób przeprowadzenia badań wytrzymałości złączy czołowych na zginanie jest sprecyzowany w PN-EN 385 „Złącza klinowe w konstrukcjach drewnianych. Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne”, zastąpione przez PN-EN 14081:2013 i PN-EN 15497:2014. Ogólną zasadą podczas wszelkich prób wytrzymałościowych połączeń klinowych jest konieczność zachowania co najmniej 72 godzinnej przerwy pomiędzy procesem klejenia a badaniami takich złączy.

Niezależnie od typu kleju każde połączenie lameli zastosowane w drewnie klejonym warstwowo musi wykazywać odpowiednią wytrzymałość spoin na rozwarstwienie. Inne własności wytrzymałościowe dla spoin klejowych zostały również przedstawione w normach: PN-EN 302-1:2005; PN-EN 302-2 i PN-EN 391; PN-EN 392 (zastąpione przez PN-EN 14080). Powyższe normy przedstawiają również metody laboratoryjne i przemysłowe (bieżąca kontrola jakości produkcji) pozwalające ocenić same właściwości kleju i praktyczne możliwości jego zastosowania.

Wskazana wcześniej norma PN-EN 386 wprowadza również szereg wymogów dotyczących kształtowania przekroju poprzecznego klejonych elementów konstrukcyjnych. Podczas klejenia elementów na szerokość miejsca łączenia boków powinny być przesunięte w stosunku do sąsiednich warstw co najmniej o grubość 1 warstwy. Ponadto nośne elementy konstrukcyjne powinny zostać ukształtowane z zachowaniem stojącego układu słoju (Mielczarek, 1994; Zenkteler, 1968; Krzysik, 1978). Taki układ zapewnia zmniejszenie wpływu deformacji związanej z ortogonalno-anizotropową budową drewna przez zachowanie położenia płaszczyzn rdzeniowych poszczególnych warstw po jednej stronie elementu klejonego.

W zależności od klasy użytkowania ta sama norma wskazuje na ograniczenia maksymalnej grubości i pola powierzchni przekroju poprzecznego przyszłej konstrukcji. Dla sosny maksymalna grubość i pole powierzchni przekroju poprzecznego warstwy w skrajnych klasach użytkowania wynosi: w 1 klasie użytkowania  $h = 45 \text{ mm}$  i  $A = 10\,000 \text{ mm}^2$ , w 3 klasie użytkowania  $h = 35 \text{ mm}$  i  $A = 7000 \text{ mm}^2$ . W przypadku przekroczenia pola przekroju powyżej  $7500 \text{ mm}^2$ , niezależnie od klasy użytkowania i gatunku drewna,

konieczne jest nacinanie rowków odprężających w środkowej części przekroju poprzecznego (Mielczarek, 1994).

Istnieją także inne zalecenia (nie zawsze ujęte w zapisach normowych), które dotyczą drewna klejonego warstwowo przeznaczonego na konstrukcje. Przykład może stanowić zalecenie dotyczące proporcji pomiędzy wysokością i szerokością prostokątnego przekroju poprzecznego. Zgodnie z danymi literaturowymi (APA, <http://www.apawo-od.org>, Konsbud; <http://konsbud.com>; Central Mortgage and Housing Corporation, 1994; Centrum Budownictwa Szkieletowego, 2004; Nitka, 2005) dla elementów o szerokości większej od 80 mm zaleca się zachowanie proporcji wysokości do szerokości prostokątnego przekroju poprzecznego  $h/b \leq 10-12$ . Czasami wytyczne takie dotyczą również proporcji wysokości przekroju poprzecznego do długości elementu klejonego L, przyjmując dość duży zakres tej wartości  $h = (1/10 \div 1/40) \times L$ .

### 3.7. Badania jakości drewna

Badania właściwości drewna poddawanego klejeniu przeznaczonego dla budownictwa zapoczątkowano w latach 30. XX wieku w Stanach Zjednoczonych (Forest Products Laboratory). Zmierzały one do określenia zdolności przenoszenia obciążeń równych lub większych niż w przypadku elementów wykonywanych z drewna litego. Badania nad drewnem klejonym warstwowo, dla którego przeprowadzano statyczne próby wytrzymałościowe, odniesione zostały do gęstości materiału przeznaczonego do badań, grubości i szerokości warstw. Badania te potwierdzono w kolejnych jednostkach badawczych (Kaszkarow i Kopuły, 1937; Sterr, 1963; Kollmann i in., 1960, 1968a i 1968b; Kobyliński, 1967c; Gerhards, 1975; Krzosek, 1998).

W 1941 roku Enger w pracy dotyczącej trwałości prostych i giętych belek złożonych z klejonych sztucznymi żywicami warstw drewna przedstawia wyniki badań sprężystości pod obciążeniem statycznym (Sterr, 1963). Potwierdzono, że elementy z drewna klejonego warstwowo pod względem nośności zachowują się podobnie jak elementy z drewna litego. Stwierdzono wzrost jakości materiału w wyniku warstwowego ułożenia tarcicy. Badania wykorzystania drewna dla potrzeb konstrukcyjnych i jego wzmacniania były prowadzone przez kolejnych badaczy (Sterr, 1963; Bulleit, 1984; Socha, 1999, 2002, 2004; Bos, 2004; Broł, 2005; Burawska, 2012; Burawska i in., 2011, 2012b, 2013b, 2015; Orłowicz i Sierov, 2004). Prowadzone przez Frerasa i Werrena w 1957 roku w USA badania na elementach doświadczalnych wykazały zniszczenie w drewnie bez potwierdzenia rozwarstwień dla płaszczyzny klejenia. Kontynuacja cyklu doświadczeń miała miejsce na przełomie lat 50. i 60., gdy w Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München podjęto badania drewna klejonego warstwowo, przeprowadzone przez zespół pod kierownictwem Kollmanna (Sterr, 1963; Kollmann i Krech, 1960). Jak dotąd dokonano szeregu badań drewna klejonego warstwowo, a wyniki badań prób dynamicznych przeprowadzonych na materiale niepozabawionym wad obejmowały: wytrzymałość na drgania wymuszone, podatność na tłumienie drgań, wpływ kleju i położenia słoików drewna w deskach na właściwości dynamiczne, zmiany

temperatury w drgającej belce, a także obliczeniowe oznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej drewna litego i drewna klejonego warstwowo (Ganowicz, 1982; Ritter, 1994; Rapp, 1999, 2002, 2010, 2016, 2017; Thelandersson, 2000; Rapp i Lis, 2001; Lis i Rap, 2002a, 2002b; Wang i Gunnion, 2008).

Porównanie rozrzutu wyników dla drewna litego wysokogatunkowego i pozyskanego z tarcicy niższej jakości poddanego obróbce eliminacji wad i klejeniu, zarówno dla gęstości, jak i właściwości wytrzymałościowych, wskazało na wyższość drewna klejonego warstwowo. Nie stwierdzono znaczącego wpływu rodzaju użytego kleju na wytrzymałość belek w stanie suchym z drewna klejonego warstwowo (Ganowicz, 1982; Rapp, 1999, 2002, 2010, 2016, 2017; Czuczelo, 2005).

Współczesne prace nad drewnem klejonym warstwowo to między innymi materiały klejone na długość (Konstruktionvollholz), klejone warstwowo wzdłużnie (Brettschnittholz) oraz klejone poprzecznie (na przykład Cros Laminatet Timer) (Cziesielski, 1974; Colling, 1990; Ceccotti, 2010; Brandner i Schickhofer, 2008, 2010, 2012; Brandner, 2014; Bejder i in., 2010, 2011, 2012; Augustin i in., 2010; Falk, 2011; Espinoza, 2016). Badania dotyczyły odkształcenia drewna klejonego warstwowo, wynikającego z cyklicznego moczenia drewna niedojrzałego oraz dojrzałego (typowo stosowanego do produkcji tego materiału), oraz ugięcia belek drewna klejonego warstwowo, poddanych działaniu długotrwałych naprężeń, które wzrastają z biegiem czasu, w zależności od pochodzenia surowca. Wielkość zmian struktury drewna zależy od wielkości występujących naprężeń (Jackowski, 1972; Brzostowski i Górecki, 1981; Krauss i in., 2009).

W powyższych badaniach zauważono brak zainteresowania badaczy możliwościami stosowania w drewnie klejonym warstwowo tarcicy obstawy bocznej. Podobne problemy badali Czuczelo (2005), Dzbeński (2000, 2004), Kozakiewicz i Krzosek (2013). Badacze zajmowali się między innymi wytrzymałościowym kształtowaniem przekroju elementów złożonych z tarcicy różnych klas jakości (oraz wykorzystaniem tak zwanej tarcicy bocznej).

Istotną rolę w uzyskaniu wymaganych rozwiązań konstrukcyjnych, spełniając żywice klejowe i odpowiednie technologie ich aplikowania, stwarzające coraz to lepsze możliwości w zakresie projektowania bądź korygowania technicznych charakterystyk dla sklejonnych elementów drzewnych, przy zapewnieniu ich wymaganej funkcjonalności oraz wysokiej trwałości (Ritter, 1994; Rapp, 1999, 2002; Rapp i Lis, 2001).

Elementy drewniane wykorzystywane w warunkach narażenia na negatywne czynniki klimatyczne łączone są za pomocą środków wiążących, zapewniających wysoką wytrzymałość na obciążenia statyczne, jak i dynamiczne. Wymagana jest wysoka odporność na działanie wody i zmian temperatury, a w przypadku ich stosowania do łączenia drewna zabezpieczonego powinny charakteryzować się brakiem reagowania na impregnaty. Oprócz szeroko stosowanych (niemal wyłącznie do warstwowego łączenia drewna dla potrzeb budownictwa, a w szczególności do konstrukcji wielkowymiarowych nośnych) klejów rezorcynowo-fenolowo-formaldehydowych, w ostatnim okresie coraz szersze zastosowanie znajdują nowoczesne generacje żywic bazujących na spoiwach poliuretanowych oraz melaminowych. Prowadzone są także prace nad opracowaniem klejów epoksydowych oraz poliestrowych (Selbo, 1975; Ritter i in., 1994; Serrano, 2001; Jasiński, 2003; Krystofiak i in., 2008). Według danych Instytutu Otto Grafa (Radovič i Rothkopf, 2003) do klejenia drewnianych elementów konstrukcyjnych zgodnie



z procedurą DIN 1052-10:2012 w Europie w ciągu ostatnich lat kleje RPF w licznych zastosowaniach z powodzeniem zastąpiono klejami 1K PUR oraz MUF/MF.

Wykorzystywane są także kleje bazujące na żywicach epoksydowych oraz poliestrowych. Kleje epoksydowe i poliestrowe są dość powszechnie stosowane do prowadzenia różnego rodzaju prac w tym remontowych w konstrukcjach drewnianych, zwłaszcza do rewitalizacji więźb w różnych budynkach zabytkowych (Rapp, 1999, 2015). W przypadku stolarki otworowej szeroko używa się modyfikowanych dyspersyjnych klejów PVAC, z których najczęściej stosowane są systemy katalizowane kwasami „Lewisa” (np. 20% roztwór  $AlCl_3$ ) lub też izocyjanianami (kleje EPI). Uzyskiwane z tych żywic spoiny spełniają wymagania dla klasy odporności D4 wg PN-EN 204 oraz WATT'91 (Gos, 1996; Proszyk, 1996).

Dla pełnego i praktycznego zastosowania sosnowych materiałów tartych przy sortowaniu wytrzymałościowym niezbędne jest spełnienie przez nie wymagań związanych z rolą, jaką mają pełnić w konstrukcjach. Specyfiką polskiego tartacznictwa są przede wszystkim małe i średnie zakłady (Szczuka i Żurowski, 1999; Ratajczak, 2003), gdzie znalazła zastosowanie wizualna metoda sortowania wytrzymałościowego tarcicy (Krzosek, 1995, 1998a, 2002, 2009; Czuczelo, 2005; Dzbeński i in., 2005; Krzosek i Grzeskiewicz, 2008; Pajchrowski i in., 2009; Kotwica, 2009). Opiera się ona na podstawowej wiedzy z zakresu budowy drewna i występujących w nim wad. Maszynowe metody klasyfikacji tarcicy, znajdujące zastosowanie w Europie (Müller, 2002; Glos, 1982; Glos i Diebold, 1997; Mańkowski i Krzosek, 2001; Krzosek, 1995, 2002, 2011, 2012; Noskowiak, 2007; Krzosek i Bacher, 2011; Kozakiewicz i Krzosek, 2013), są mało rozpowszechnione w Polsce ze względu na znaczne koszty zakupu i eksploatacji maszyn sortowniczych. Stanowi to podstawę do rozwijania wytrzymałościowego sortowania tarcicy metodą wizualną z wykorzystaniem PN-82/D-94021, zastąpionej obecnie przez PN-D-94021:2013-10P.

Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana jest metodami wytrzymałościowymi zgodnie z PN-EN 14080:2013 i PN-EN 14081- 1, 2, 3, 4, nadając klasy wytrzymałości drewnu zgodnie z PN-EN 338:2016. Produkcja tarcicy budowlano-konstrukcyjnej o gwarantowanych właściwościach mechanicznych odbywała się zgodnie z normą PN-81/B-03150, a także jej późniejszą wersją PN-B-03150:2000 zastąpiona normą PN-EN 1995-1-1:2010.

Współcześnie do najbardziej rozpowszechnionych metod stosowanych w dziedzinie diagnostyki różnych materiałów (w tym również drewna) należą metody ultradźwiękowe. Zaliczane są one do grupy metod nieniszczących – NDT (Nondestructive Testing). Metody te znajdują zastosowanie zarówno w badaniach naukowych, jak i w różnych dziedzinach techniki (Mottl, 2001; Śliwiński, 2001). W badaniach cech jakościowych materiałów najczęściej dokonuje się pomiarów czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez badany obiekt, a więc przy znanej drodze propagacji i prędkości jej transmisji. Możliwość klasyfikacji jakościowej (wytrzymałościowej) drewna na podstawie pomiarów prędkości propagacji w nim fal ultradźwiękowych wynika z faktu, że wartość tej wielkości zależy od wilgotności, występowania wad oraz od kierunku propagacji, gatunku i gęstości drewna (Burmester, 1965; Dzbeński, 1984; Yamamoto i in., 1998; Marcinkowska i Moliński, 2005, 2006; Fabisiak i in., 2007; Misztal, 2006, 2008, 2010), a więc

tych aspektów materiałowych, które definiują jego parametry mechaniczne. Dokładne poznanie związków pomiędzy wilgotnością drewna a prędkością propagacji fal ultradźwiękowych jest ważne przy oznaczaniu dynamicznego (sonicznego) modułu sprężystości drewna ( $E_d$ ), którego wartość oblicza się z zależności:  $E_d = C^2 \times \rho_w$ . Gęstość drewna ( $\rho_w$ ) przy wzroście wilgotności w zakresie od 0% do PNW wzrasta w stosunkowo niewielkim stopniu, bo zwiększającej się masie drewna towarzyszy wzrost jego objętości. Wzrost wilgotności drewna powyżej PNW powoduje już gwałtowny wzrost jego gęstości, bo objętość próbki nie ulega zmianie. Taka zmiana gęstości drewna w funkcji jego wilgotności w całym możliwym jej przedziale sprawia, że obliczone wartości dynamicznego (sonicznego) modułu sprężystości drewna są niepoprawne, bowiem rosną wraz ze wzrostem jego wilgotności powyżej PNW (Gerhards, 1975; Sakai i Takagi, 1993; Wang i in., 2008). Ten specyficzny wpływ gęstości drewna przy określonej jego wilgotności można jednak wyeliminować, stosując odpowiednio wyliczone współczynniki korekcyjne (Gerhards, 1975), ewentualnie zastępując wartość  $\rho_w$ , wykorzystywaną przy oznaczaniu modułu sprężystości, tzw. efektywną gęstością drewna ( $\rho_{ef}$ ), której sposób obliczania przedstawiono w pracy Wanga i innych autorów (2008). Z większości dotychczas opublikowanych badań wynika, że w miarę wzrostu gęstości drewna, w obrębie pojedynczych gatunków, wzrasta prędkość transmisji ultradźwięków (Kollmann i Krech, 1960; Burmester, 1965; Dzbeński, 1984; Dzbeński i Wiktorski, 2007), a zależność pomiędzy tymi wielkościami jest liniowa. O pozytywnym wpływie gęstości drewna na prędkość ultradźwięku świadczą również badania Yiannosa i Taylora (1967), a także Burmestera (1965) przeprowadzone na wczesnym i późnym drewnie sosny.

Praktycznym przykładem stosowanym przemysłowo w drzewnictwie może być ultradźwiękowy system przystosowany do oceny jakości drzew, surowca drzewnego i wytrzymałościowego sortowania tarcicy konstrukcyjnej. Ultradźwiękowe maszyny do pomiarów przemysłowych oraz pomiarów w terenie oparto o klasyczne zasady pomiaru za pomocą ultradźwięków (Sandor, 1996, 2000; Ross i in., 2005) wykorzystując głowice pracujące w paśmie fal słyszalnych i ultradźwięków. W Polsce badania z zastosowaniem powyższej nieniszczącej metody oceny mechanicznych właściwości drewna, jak również oceny jakości drzew prowadzone przez Dzbeńskiego, Krzoska i Kozakiewicza z WTD SGGW w Warszawie od lat 80. XX wieku (Dzbeński, 1978, 1981, 1984; Kolb i Gruber, 1981; Dzbeński i Wiktorski, 2004, 2005, 2007; Krzosek, 2009; Kozakiewicz i Krzosek, 2013), potwierdzają wysoką skuteczność zastosowania fal akustycznych do badań surowca drzewnego i materiałów tartych. Powstało wiele urządzeń i przyrządów wykorzystujących fale sprężyste. Są one wyposażone w przetworniki ultradźwiękowe w miejscu głowic rejestrujących. Są to przyrządy analizujące i przetwarzające odczytane parametry propagacji fal, obrazujące również wewnętrzne różnice budowy w strukturze drewna.

Wyniki nieniszczących metod pomiaru jakości drewna mogą być zazwyczaj uzyskane w krótkim czasie po dokonaniu pomiaru wyników, mogą być również wykorzystywane w wysoko zautomatyzowanych procesach technologicznych. Zastosowanie tych metod pozwala na pełną ocenę jakości wyrobów. Pozwala to na ograniczenie naddatków ilościowych stosowanych w przerobach jako margines bezpieczeństwa w produkcji wyrobów o przeznaczeniu konstrukcyjnym (Dzbeński, 1984; Wang i Ko, 1998; Krzosek, 2002, 2009; Dzbeński i in., 2005; Szukała i Szumiński, 2003; Ross i in., 2005). Badania

nieniszczące wymagają znacznej wiedzy na temat właściwości i budowy drewna oraz spodziewanych rozkładów wad wewnętrznych i niejednorodności, a także właściwości czynnika, za pomocą którego wykonuje się pomiar.

Wiele doniesień literaturowych wskazuje, że skuteczność wytrzymałościowej klasyfikacji drewna metodą ultradźwiękową jest zbliżona do rezultatów uzyskiwanych przy wykorzystaniu maszyn sortujących (Cook Bolinder, Computermatic, Finnograder) bądź metodą wibracyjną (Boström, 1992; Prestorper, 1994; Steiger, 1997; Wang i in., 2002, 2005; Sandoz i Benoit, 2007; Kozakiewicz i Krzosek, 2013).

### 3.8. Znaczenie wykorzystania drewna sosny

Drewno oprócz wielu zalet, posiada również różnorodne wady, za które uważa się każdą destrukcję tkanki oraz jej nieregularność strukturalną, która może obniżyć jego wartość użytkową. Niektóre wady anatomiczne drewna obniżają jego wytrzymałość, inne natomiast są mniej groźne, np. powierzchniowe zmiany zabarwienia drewna takie jak sinizna (Fojutowski, 2002; Fojutowski i Kropacz, 2003; Ważny, 2003).

Najczęściej występującą wadą techniczną w drewnie sosnowym są sęki (Dziewanowski, 1961, 1964, 1965, 1968; Kobyliński, 1967a; Kollmann i Côté, 1968; Turolski i Buchholz, 1968; Kamiński, 1973; Krzysik, 1978; Sell, 1989; Kretschmann, 2010). Zakłócają one jednorodność budowy drewna poprzez zwiększenie twardości, gęstości oraz zmieniają kierunkowy przebieg włókien (Rudnicki, 2007; Bogacz i in., 2007; Bogensperger i in., 2011; Burawska i in., 2012a, 2013a, 2014a). Wytrzymałość sękatego drewna jest mniejsza przy rozciąganiu i ściskaniu wzdłużnym oraz zginaniu statycznym niż wytrzymałość drewna bezsęcznego. Obniżenie wytrzymałości zależy od wymiarów, zdrowotności i rozmieszczenia sęków w danym elemencie. Inne wady, takie jak zawoje i wszelkiego rodzaju skręt włókien w znaczny sposób obniżają właściwości mechaniczne drewna (Baño i in., 2011, 2013; Oscarsson i in., 2012).

Inne cechy budowy anatomicznej (jak obecność rdzenia i tkanki młodocianej w tarczy konstrukcyjnej) czy wady (pęknięcia, drewno reakcyjne, chodniki owadzie) wpływają na zmniejszenie czynnego przekroju drewna w czasie obciążenia mechanicznego (Krzysik, 1978; Schniewind i in., 1989; Burawska, 2013a). Często zdarza się, że jedna wada może zdyskwalifikować cały element przeznaczony do zastosowania w konstrukcji.

Wskazania dotyczące drewna zalecanego do stosowania w wyrobach klejonych warstwowo zawarte zostały w normie PN-81/B-03150. W normatywie tym wskazano sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) i świerk (*Picea abies* L.) jako podstawowy surowiec do przerobu na elementy konstrukcyjne. Norma PN-EN 386 zwiększała listę gatunków dopuszczonych do stosowania oprócz jodły (*Abies alba* L.) i modrzewia (*Larix decidua* L.) o następujące rodzaje: dagleżę (*Pseudotsuga menziesii* L.), choinę górską (*Tsuga heterophylla* L.), sosnę czarną (*Pinus nigra* L.), sosnę nadmorską (*Pinus pinaster* L.), sosnę kalifornijską (*Pinus radiata* L.), topolę białą (*Populus alba* L.) i żywotnik olbrzymi (*Tuja plicata* L.) (nazewnictwo według PN-EN 13556:2005).

Podstawowe rodzaje drewna przemysłowego w Polsce (sosna i świerk) łączą wysokie parametry wytrzymałościowe z łatwością obróbki i impregnacji, zaś wymiary pozwalają uzyskać odpowiednią ilość materiału z jednej kłody na określone elementy konstrukcyjne (Socha, 1999, 2002, 2004). Sosna osiąga stosunkowo szybko (40-80 lat) parametry pozwalające na zastosowanie przemysłowe (Gierliński, 1961; Kobyliński, 1967; Kamiński, 1973; Laurow, 1973; Buchholz, 1975, 1984; Buchholz i Hruzik, 1981; Pazdrowski, 1988; Pazdrowski i Splawa-Neyman, 1993, 1996). W polskich warunkach surowiec sosnowy jest najczęściej pozyskiwanym rodzajem drewna tartacznego o przeznaczeniu konstrukcyjnym. Jest ponadto dominującym w Lasach Państwowych rodzajem, który wraz z modrzewiem stanowi średnio około 69% drzew panujących (GUS, 2016; Lasy Państwowe, 2017).

Dążąc do zwiększenia zakresu przetworzenia surowca drzewnego i eliminacji jego anatomicznych nieprawidłowości, zmierza się do produkcji elementów przeznaczonych maksymalnie pozbawionych wad. Są one wstępnie wykorzystywane zarówno w postaci półfabrykatów litych, jak i klejonych (Czuczelo i Dzbeński, 2004; Czuczelo, 2005; Kozakiewicz i Krzosek, 2013). W procesach przerobu dąży się do maksymalizacji wydajności ilościowej elementów pełnowartościowych, jako najbardziej pożądaných, co potwierdzają liczne prace w obszarze jakości drewna sosnowego pochodzącego z terenów Polski oraz jego przydatności do dalszego przetworzenia, spośród których można wymienić Dziewanowskiego (1961, 1964, 1965, 1967), Gierlińskiego (1961), Pachelskiego, Żyteckiego, Iskrę (1966), Buchholza (1975, 1984), Buchholza i innych (1970, 1990), Cegła, Hruzika (1974), Dzbeńskiego (2000, 2004), Karczewskiego (1973), Hruzika (1979), Paschalisa (1980), Pazdrowskiego (1981, 1992) i innych autorów (Kobyliński, 1967b; Laurow, 1973; Nishkian i in., 1977; Milewski, 1980; Lang, 1987; Hełlińska-Raczkowska i Fabisiak, 1992; Mielczarek, 1994; Rapp, 1999, 2002; Dzbeński, 2000, 2004; Lange i Orłowicz, 2004; Krzosek, 2002, 2009, 2011; Neuhaus, 2006; Tomczak i in., 2009, 2010, 2012, 2013; Kozakiewicz i Krzosek, 2013). Badania te stały się podstawą do definiowania technologicznej racjonalizacji przerobu drewna. Wyniki prac podkreślają naturalne predyspozycje jakościowe surowca, zarówno w postaci okrągłej, jak i materiałów tartych, w kierunku pozyskania określonych produktów finalnych o zastosowaniu konstrukcyjnym.

Eliminacja wad i postęp technologiczny w dziedzinie klejenia drewna pozwalają na produkcję różnowymiarowych i wartościowych półfabrykatów. Pozyskiwane elementy o wysokich parametrach mechanicznych, stabilności wymiarowej (kształtu, postaci), ograniczonym paczeniu się, dużym przekroju poprzecznym i teoretycznie nieskończonej długości (ograniczonej wymaganiami transportu oraz zastosowaniami finalnymi) (Guzera, 1976; Gos, 1996; Krystofiak i in., 2008; Jeitler, 2007; Frühwald, 2006). Drewno klejone warstwowo posiada cechy typowe dla drewna litego oraz dodatkowo szereg zalet: lekkość, wytrzymałość, sprężystość, podatność na formowanie przekrojów, podatność na obróbkę, trwałość. Warstwowy układ przekroju pozwala kształtować elementy o zmiennej wysokości przekroju w zależności od potrzeb. Stosowany w produkcji drewna klejonego warstwowo surowiec jest materiałem podatnym na obróbkę. Jednakże technologia klejenia drewna wymaga specjalistycznych maszyn, odpowiednich warunków klejenia i magazynowania kleju oraz odpowiedniego przygotowania materiału do klejenia.

Zasadne jest stwierdzenie Czechowicza (1960), że do wyrobu konstrukcji klejonych zalecane jest drewno użytkowo suche. Zbyt duża wilgotność może powodować obniżenie własności wiążących kleju oraz skurcz drewna, co obniża jakość połączenia i powoduje dodatkowe naprężenia w skleinie. Drewno konstrukcyjne powinno osiągnąć wilgotność w granicach 6-18%. Elementy z drewna klejonego warstwowo powinny posiadać wilgotność mniejszą niż wilgotność elementu w eksploatacji. W ten sposób unika się wysychania powierzchniowego drewna, a także innych zmian (kształtowych) w całym elemencie. Większe zmiany wilgotności drewna po sklejeniu powodują niebezpieczny skurcz bądź pęcznienie, co może wywoływać niepożądane naprężenia w drewnie, jak i w spoinie, które z kolei powodują pęknięcia drewna bądź uszkodzenie połączenia materiału i spoiny klejowej. Zachowanie zbliżonej wilgotności w poszczególnych warstwach drewna jest wymagane dla poprawności wytrzymałościowej spoin. Różnice wilgotności warstw mogą spowodować duże naprężenia w spoinach, a nawet zniszczenie całego elementu. Za maksymalną różnicę wilgotności między przylegającymi warstwami przyjmuje się 5% (Zenkter, 1968, 1996; Korzeniowski, 1965a, 1965b; Rhude, 1996; Wieruszewski i in., 2009; PN-EN 301:2017).

Liczne zalety drewna klejonego warstwowo pozwalają na stosowanie tego materiału praktycznie w każdym rodzaju budynków, niezależnie od przeznaczenia. Najczęściej wykorzystuje się ten materiał w obiektach sportowych (pływalnie, korty, boiska, hale sportowe), obiektach przemysłowych (hale fabryczne i magazynowe), obiektach handlowo-usługowych, biurach, szkołach, obiektach sakralnych, hotelach, budownictwie rodzinnym i rolniczym, a także obiektach małej architektury ogrodowej. Materiał konstrukcyjny wolny od wad posiada większą wytrzymałość niż zawierający wady. Budownictwo szkieletowe w dużym stopniu bazuje na materiałach tartych konstrukcyjnych litych, jak również klejonych. Założenie to stanowi podstawę do podjęcia badań jakości elementów i półfabrykatów klejonych z uwzględnieniem zastosowania w budownictwie. Określenie wpływu jakości przerabianych sortymentów drewna okrągłego krajowego pochodzenia na materiały tarte z wydzieleniem tarcicy bocznej przeznaczonej na elementy klejone może wzbogacić wiedzę w zakresie polskiego drzewnictwa i przyczynić się do rozwoju branży drzewnej ukierunkowanej na budownictwo (Central Mortgage and Housing Corporation, 1994; Centrum Budownictwa Szkieletowego, 2004; Nitka, 2005).



## 4. Materiał i metodyka badań

### 4.1. Dobór materiału badawczego i miejsce realizacji badań

Realizacja badań oraz technologicznej części projektu przeprowadzona została w ramach prac Katedry Tworzyw Drzewnych Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz w wybranych zakładach drzewnych z zastosowaniem aparatury i stanowisk pomiarowych do analizy wytrzymałościowej. Prace realizowano w ramach projektów badawczych NCN, NCBR oraz własnych badań statutowych.

W doborze materiału badawczego nie może zostać pominięty wiek drzewostanów. Ważnym elementem jest tutaj również dojrzałość techniczna surowca. Badania prowadzone w tym zakresie dla drewna sosny (Gieruszyński, 1961; Dziewanowski, 1965; Gierliński, 1970, 1971; Buchholz i Hruzik, 1973; Buchholz, 1975) wskazują na takie elementy jak: pierśnica i długość strefy bezszęcej, które determinują przydatność surowca do przerobów tartacznych. Prace związane z właściwościami i zastosowaniem sosny jako gatunku charakteryzującego się szybkim wzrostem (Dziewanowski, 1966; Duda, 1975; Hruzik, 1993; Helińska-Raczkowska i Raczkowski, 1979; Fabisiak i Moliński, 2002) pozwalają na przyjęcie założenia, że 80-100 letnie drzewostany sosnowe mogą być dojrzałe i w pełni przydatne do przemysłowego stosowania jako surowiec tartaczny.

Dobór materiału badawczego przeprowadzono przy uwzględnieniu czynników technologicznych przerobu drewna na materiały przeznaczeniowe dla budownictwa (Kalinowska, 1993; Central Mortgage and Housing Corporation, 1994; Epsten, 1998; Centrum Budownictwa Szkieletowego, 2004; Czerwiński, 2006). Opracowano wstępną bazę danych o parametrach jakościowych surowca sosnowego pochodzącego z wybranych rejonów kraju przy uwzględnieniu metody badania jakości drewna okrągłego w oparciu o wady budowy i wady kształtu. Wydzielenie klasy jakości nastąpiło w oparciu o stosowane normatywy Klasyfikacji Jakościowo Przeznaczeniowej (KJW), odnoszące się do polskiej normalizacji (PN-79/D-01011; PN-92/D-95017; PN-93/D-02002; Zarządzenie nr 72 DG LP z 27.09.2013; Zarządzenie nr 47 DG LP z 31 maja 2002; Splawa-Neyman i Urbanik, 1999; Wiktorski, 2003; Ślęzak, 2006; Praca zbiorowa, 2016) i normatywów europejskich PN-EN (PN-EN 1310:2000; PN-EN 1311:2000; PN-EN 1315-2:2001; DIN EN 1927-2:2008-06; LST L EN 1927-2:2008; PN-EN 844- 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12; Praca zbiorowa, 2016). Drewno okrągłe weryfikowane było w trzech klasach grubości dla drewna dłużycowego (1 klasy – średnica w połowie długości do 24 cm bez kory, 2 klasy – średnica od 25 cm do 34 cm, 3 klasy – średnica równa i większa od 35cm) przeznaczonego do przerobów na materiały konstrukcyjne. Pozyskano i przetarto surowiec sosnowy z drzewostanów 90-120-letnich pochodzący z wybranych nadleśnictw na terenie kraju, charakterystycznych dla występowania drzewostanów sosnowych I bonitacji, wytypowano zgodnie z wymaganiem doboru drzew reprezentatywnych (w ilości minimum 8 dłużyc modelowych z powierzchni).

Miejszem realizacji części badań przemysłowych były zakłady tartaczne produkujące elementy drzewne z drewna sosnowego, w tym dla budownictwa.

Dobór surowca do badań odbył się poprzez wyznaczenie drzew reprezentujących badane drzewostany z zastosowaniem uproszczonej metody Hartiga. Według Wolskiego (1965), Krzysika (1978), Buchholza (1975) metoda Hartiga może być uznawana za przydatną do przeprowadzania analiz właściwości fizycznych drewna danego drzewostanu.

Na podstawie badań dokonanych przez Wolskiego (1965) przyjmuje się, że istnieje ścisły związek pomiędzy pierściami drzew a ciężarem właściwym oraz wytrzymałością na ścislenie i zginanie statyczne drewna z nich pozyskanego. Prawdopodobnie tę można brać pod uwagę przy pozyskaniu drewna, które ilościowo i jakościowo odpowiada wymaganiom związanym ze strukturą jakościową i wymiarową produkcji. Dobór drzew modelowych oparty został na pomiarze pierścieni, które generują cechy biologiczne drzew w drzewostanie, jak również właściwości fizyczne i mechaniczne oraz technologiczne pozyskanego z nich materiału.

Surowiec drzewny został zakupiony z uwzględnieniem pochodzenia z Bałtyckiej, Śląskiej i Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej. Po dostarczeniu do współpracujących zakładów surowiec został poddany obróbce wstępnej w celu przygotowania odpowiednich sortymentów dla celów badawczych. W procesach technologicznych zachowana została ścisła kontrola pochodzenia pozyskiwanych materiałów z poszczególnych stref na długości i przekroju przerabianego drewna okrągłego (kłód).

W kolejnych etapach przerobów doświadczalnych uwzględniono najczęściej spotykane szeregi wymiarowe pozyskiwanych sortymentów z przeznaczeniem dla budownictwa.

## 4.2. Tarcica i półfabrykaty sosnowe

Surowcem wyjściowym do badań było drewno sosnowe pozyskane z różnych krain przyrodniczo-leśnych dla porównania jego właściwości przy ocenie jakości uzyskanych sortymentów i materiałów laboratoryjnych. Tarcicę przeznaczoną do badań pozyskano z drewna okrągłego klasy jakości WC0 (PN-92-D-95017; Zarządzenie DG LP z 31.05.2002), dla trzech klas grubości sosny zwyczajnej pochodzącej z określonych lokalizacji (tab. 1) na terenach siedliska boru mieszanego świeżego.

Dla oceny parametrów klasyfikacji KJW zdecydowano o wykorzystaniu dodatkowych sortymentów reprezentujących badane krainy przyrodniczo-leśne. Do badań zaklasyfikowano drewno sosnowe reprezentujące siedliska lasu mieszanego świeżego. Drzewostany charakteryzowały się V i VI klasą wieku (100-120-letnie). Pozyskanie surowca odbyło się na podstawie oceny posztucznej drzewostanu w wybranej lokalizacji ze wskazaniem do zrębu. Drewno sosnowe dłużycowe zostało pozyskane i sklasyfikowane w celu przekazania do badań wytrzymałościowych.



Tabela 1. Oznaczenie powierzchni badawczych dla oceny właściwości tarcicy bocznej według operatów urzędzeniowych

Table 1. Determination of test surfaces for assessment of lateral lumber properties according to Forest Management Plans

Symbol powierzchni Symbol of area	Nadleśnictwo Forest District	Leśnictwo Forestry department	Oddział Compartment	Siedlisko Forest site type	Wiek Stand Age
I	Barlinek	Barlinek	730c	bór mieszany świeży mixed fresh forest	105-letni
II	Człuchów	Kątki	78l	bór mieszany świeży mixed fresh forest	120-letni
III	Borne Sulimowice	Nowa Wieś	45b	bór mieszany świeży mixed fresh forest	100-letni
IV	Sulechów	Stary Dwór	255b	bór mieszany świeży mixed fresh forest	100-letni
V	Iława	Makowo	149h	bór mieszany świeży mixed fresh forest	110-letni

Dla weryfikacji czynników jakościowo-wytrzymałościowych wykorzystane zostały próbki pozyskane z surowca dłużycowego przeznaczonego do manipulacji. Wymanipulowane kłody sosnowe z poszczególnych stref na długości dłużyc poddane zostały przetarciu „na ostro” na pilarkach ramowych ze sprzęgiem głównym dostosowanym do żądanych sortymentów w celu pozyskania cech tarcicy rdzeniowej oraz stycznej z każdej kłody.

Uwzględniając wyniki wcześniejszych badań dotyczących drewna iglastego oraz klasyfikacji normatywnej (PN-92/D-95017), wskazujących na znaczący wpływ proveniencji kłód na ich przydatność, postanowiono przyjąć również w przypadku drewna sosnowego podział surowca wynikający z pochodzenia na długości dłużyc: kłody odziomkowe (O), kłody środkowe (Ś) i wierzchołkowe (W).

Kłody grupy odziomkowej (oznaczone „O”) posiadały na powierzchni oznaki świadczące o głębiej zalegających sękach. Minimalna ich średnica w cieńszym końcu wynosiła 25 cm. Do drugiej grupy zaliczono kłody uformowane w strefie przejściowej (środkowej – oznaczone „S”), na ich powierzchni występowały liczne guzy, mające przewagę nad sękami otwartymi. Do trzeciej grupy klasyfikowano kłody pochodzące z części wierzchołkowej dłużyc modelowych (oznaczone „W”). Kłody te cechowały się występowaniem na ich powierzchni sęków otwartych. Należy zaznaczyć, że oprócz sękatości, stanowiącej zasadnicze kryterium podziału, przy ocenie jakości uwzględniono pozostałe

wady decydujące o klasyfikacji wg KJW (krzywizna, zbieżystość i inne). Uwzględniono również przykłady ze zgnilizną, które zdefiniowano poprzez występowanie tej wady w badanych dłużycach po wyrzynce kłód.

W grupie wad decydujących o przydatności surowca uwzględniono: mursz (zgnilizna twarda i czerwien, zgnilizna miękka), hubę, martwicę boczną, rdzeń mimośrodowy i podwójny, pęknięcia (promieniowe, łukowe, mrozowe i piorunowe), krzywiznę, skręt włókien, zbieżystość, sęki zdrowe (zrosnięte, rogowe) i sęki zepsute (murszowe, tabaczone, nadgniłe, smołowe), guzy, przesylenie żywicą, pęcherze żywiczne, uszkodzenia od żywicowania, siniznę, otwory po owadach, obrzęki i rak oraz części zawierające odłamki metali (PN-92/D-95017).

Większość wymienionych wad jest również wyszczególniona w obecnie obowiązujących normatywach PN-EN (PN-EN 1310:2000; PN-EN 1311:2000; PN-EN 1315-2:2001; DIN EN 1927-2:2008-06; LST L EN 1927-2:2008; PN-EN 844- 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12; Praca zbiorowa, 2016), jak np. skręt włókien, krzywizna czy też pęknięcia. Klasyfikacja wynika ze sposobu pomiaru wad (dopuszczalność wady odnoszonej do przeznaczenia danej sztuki drewna). W zapisach obowiązujących normatywów guz jest charakteryzowany jako sęk zarośnięty. Wielkość i nasilenie wad kształtuje poziom obniżenia klasy użytkowej drewna pochodzącego z danej lokalizacji w stosunku do drewna z drzewa bez wad, co wynika z przyjętej klasyfikacji jakościowej.

Tarcica pozyskana w wyniku badań została przygotowana poprzez obróbkę termiczną i suszenie do wilgotności 12% ( $\pm 3\%$ ), rozpiłowywanie na wymiar brutto, a następnie struganie do wymiarów przekroju netto. Pozyskane zestawy próbek w postaci desek z przeznaczeniem na elementy stypizowane zostały przycięte na wymagane długości netto.

Elementem dodanym jest wydzielenie prób wielkowymiarowych z wykorzystaniem tarcicy bocznej, które posłużyły do wytworzenia elementów klejonych warstwowo. Próbkę te pozyskano w grupach ze względu na pochodzenie surowca i różnice w przekroju poprzecznym. Pozyskane próbki posiadały układ wielowarstwowy przy zachowaniu kolejnych zasad łączenia: dobór przekroju (styczne) elementów tarcicy klejonych na długość.

W grupie tych badań znalazła się tarcica boczna stanowiąca materiał wyjściowy do produkcji elementów sosnowych klejonych z większej liczby warstw, grubość łączonych desek obstawy bocznej wynosiła 22 mm. Wymaganie to ustalono w celu uniknięcia znacznego spadku siły dociskającej na grubości ściskanego pakietu w związku ze stratą energii na wyprostowanie nierówności sklejaných desek. Elementem finalnym poddawany badaniu były sortymenty w postaci desek sklejaných o grubości 40 mm w celu porównywalnej weryfikacji dla próbek drewna litego obstawy głównej (centralna strefa drewna z przerobu tartaczno-go).

Podstawowe badania dotyczące właściwości materiałów produkowanych w warunkach laboratoryjnych i wielkowymiarowych przeprowadzono na aparaturze pomiarowej i maszynach wytrzymałościowych dostosowanych do badań drewna wielkowymiarowego oraz próbek laboratoryjnych zgodnych z normami przedmiotowymi.

Badania zostały przeprowadzone na wybranych, pełnowymiarowych elementach konstrukcyjnych o charakterystyce wymiarowej odpowiadającej sortymentom stoso-

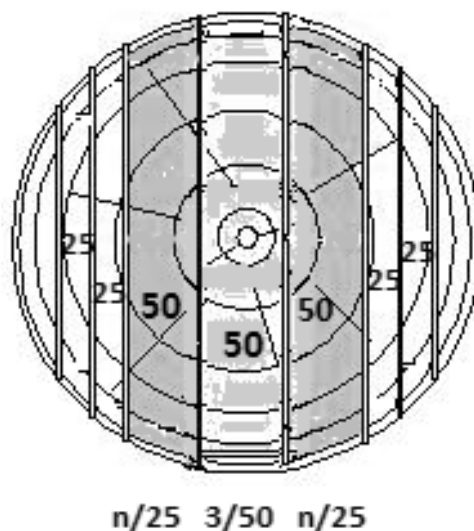
wanym w praktyce przemysłowej jako elementy lite (styczne i promieniowe) i klejone warstwowo z tarcicy bocznej. W oparciu o standardowe przekroje elementów konstrukcyjnych w budownictwie szkieletowym, uwzględniając również dotychczasowe badania terenowe w tym zakresie, postanowiono wybrać typowy szereg elementów o przekrojach poprzecznych 40 mm x 150 mm (Central Mortgage and Housing Corporation, 1994; Centrum Budownictwa Szkieletowego, 2004; Nitka, 2005). Ze względu na próbę określenia wybranych właściwości drewna sosnowego obstawy bocznej oraz dla spełnienia wymogów normowych dotyczących właściwości wytrzymałościowych drewna litego i klejonego w konstrukcjach (PN-EN 338; PN-EN 14080) za podstawowy wskaźnik klasyfikacji przyjęto próbę zginania (własności sprężyste) jako głównego obciążenia podczas praktycznego zastosowania w konstrukcjach. Weryfikowane materiały przyjęto za wzorcowe modele materiałowe, które pracują jako elementy belkowe.

### 4.3. Technologia pozyskania i klejenia próbek do badań

W celu pozyskania próbek na potrzeby badań niniejszej pracy i dla zgodności z zapisami normy PN-EN 384 wyselekcjonowano kłody wymanipulowane z dłużyc sosnowych pozyskanych z terenów oznaczonych cyframi rzymskimi od I do V (tab. 1). Długość poszczególnych kłód wynosiła 2,5 do 3,5 m, a średnice były równe lub większe od 14 cm (mierzone w cieńszym końcu kłody). W wyniku przetarcia blokowego z każdej kłody pozyskano: 1 bal rdzeniowy (o promieniowym przebiegu usłojenia), 2 bale boczne (o stycznym przebiegu usłojenia), a także od 4 do 10 desek (25 mm w stanie szorstkim) z półpromieniowym i stycznym układem usłojenia (ryc. 4), kierowanych do rozkroju na łąty.

Grubość bali centralnych wynosiła nominalnie 50 mm, a desek 25 mm w stanie szorstkim. Tak przygotowaną tarcicę poddano suszeniu w suszarniach komorowych do wilgotności 12%. Następnie tarcicę nieobrzynaną rozpiłowano i strugano celem uzyskania próbek odpowiadających przyjętym wcześniej grupom wymiarowym, uzyskując w ten sposób:

- elementy konstrukcyjne o wymiarach przekroju poprzecznego: 40 × 150 mm, o promieniowym przebiegu usłojenia, zarówno rdzeniowe jak i bezrdzeniowe
- elementy konstrukcyjne o wymiarach przekroju poprzecznego: 40 × 150 mm, o promieniowym przebiegu usłojenia, zarówno rdzeniowe jak i bezrdzeniowe
- elementy konstrukcyjne o wymiarach przekroju poprzecznego 40 × 150 mm, o stycznym przebiegu usłojenia,
- deski obstawy bocznej o grubości normatywnej 25 mm, przeznaczone do dalszego przerobu, celem otrzymania elementów konstrukcyjnych klejonych: 40 × 150 mm.



Ryc. 4. Schemat rozmieszczenia próbek pozyskanych z różnych miejsc na przekroju poprzecznym kłód sosnowych

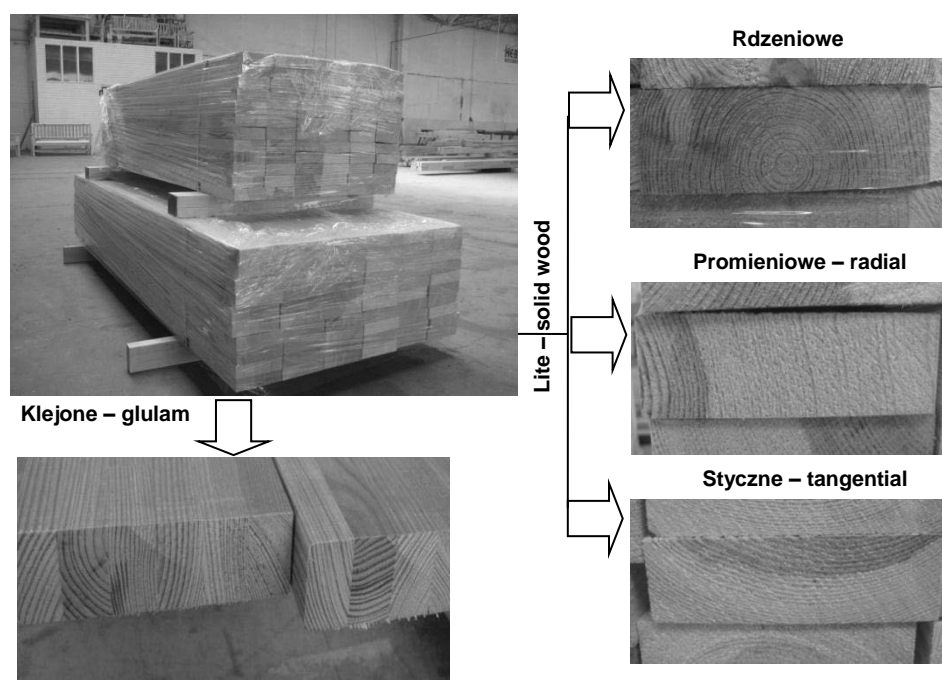
Fig. 4. Diagram of the distribution of samples obtained from various locations on the cross section of pine logs

Tarcica nieobrzynana obstawy bocznej przeznaczona na elementy klejone została rozcięta wzdłużnie na łąty o szerokości 46 mm, a następnie dokonano przygotowania do łączenia na szerokość. Uzyskane tą metodą lamele poddano czterostronnemu struganiu na grubość i klejeniu poprzecznemu w prasach hydraulicznych, zachowując wytyczne dla drewna klejonego warstwowo (PN-EN 14080; PN-EN 301) z wykorzystaniem żywicy klejowej MUF. W przypadku laminacji (klejenie na grubość) użyto nakładarki walcowej, nakładając 400 g mieszaniny klejowej na każdy m<sup>2</sup> klejonych powierzchni. Czas montażu wynosił maksymalnie 20 minut, czas prasowania (na wysokość) 5 godzin i 45 minut, przy 20°C, i wilgotności względnej powietrza 65%.

Zarówno próbki klejone z tarcicy bocznej, jak i lite ze strefy centralnej strugano na stałą grubość 40 mm i docięto na długość 2400 mm (ryc. 5) według wytycznych normowych PN-EN 408. Tak przygotowane próbki wielkowsmiarowe poddano przed dalszymi badaniami klimatyzowaniu przez 8 tygodni w laboratorium Zakładu Mechanicznej Technologii Drewna w temperaturze 20°C oraz względnej wilgotności powietrza 60% ( $\pm 5\%$ ) (wilgotność równowagowa drewna 12%).

Metodyka badań z wykorzystaniem tarcicy przyobwodowej przewidywała porównywalne testowanie surowca ze względu na wymiary przekroju sortymentów tartych w przeprowadzonych badaniach nieniszczących. Proces ten wiązał się z wygenerowaniem półfabrykatów z zastosowaniem odpowiednich systemów klejowych. Użycie klejów MUF było uzasadnione coraz częstszym stosowaniem tych żywic w drewnie konstrukcyjnym. Spoiny klejów MUF charakteryzują się estetycznym wyglądem (Proszyk i Bernaczyk, 1997) i pozwalają uzyskać wytrzymałość złączonych elementów na pozio-

mie drewna litego (Zenkteler, 1968, 1996; Selbo, 1975; Rhude, 1996; Rudnicki, 2007; Makowski i Noskowiak, 2009). Zaletą jest niewątpliwie wyeliminowanie niektórych wad drewna, co także daje częściową redukcję anizotropowości drewna, przy dzisiejszym nacisku na wysoką wydajność procesów technologicznych jest to niewątpliwym atutem (Czechowicz, 1960; Cegiel i Hruzik, 1974; Buchholz i Hruzik, 1970; Wieruszewski i in., 2006, 2009a, 2009b, 2010).



Ryc. 5. Przygotowane zestawy próbek sosnowych centralnych i obstawy bocznej (klejonych)  
Fig. 5. Prepared sets of central pine samples and side board (glued) samples

Klejenie drewna, szczególnie charakteryzującego się niską grubością, pozwala na tworzenie przekrojów elementów o parametrach najkorzystniejszych pod względem statycznym (Gos, 1996). Takie konstrukcje pozwalają tworzyć systemy nośne (filary, słupy) o dużej rozpiętości z pominięciem podpór, co wpływa na estetyczny wygląd oraz minimalny ciężar konstrukcji. Realizowane projekty budowlane z użyciem tych elementów, pozwalają uzyskać kształty łupin czy kopuł o różnych rodzajach krzywizn. Specyfika tych półfabrykatów gwarantuje obiektom długowieczność, pomimo zmiennych warunków atmosferycznych, w szczególności zmian wilgotności (Ganowicz i Guzenda, 1996).

Pierwsze elementy z drewna klejonego zastosowano już w 1893 roku przy konstrukcji hali audytorium w Bazylei. Zaledwie po 17 latach uzyskano już patent na klejenie tarcicy warstwowo, nazywając go drewnem systemu Hetzera (Piotrowski i Strykowski, 2002; Krystofiak i in., 2008). Najczęściej wytwarza się je w postaci krokwi, dźwigarów, słupów i belek.

Dotychczas szeroko stosowane kleje rezorcynowo-fenolowo-formaldehadowe (RPF) są zastępowane klejami nowej generacji melaminowo-mocznikowo-formaldehadowymi (MUF) i poliuretanowymi (PUR), ponadto prowadzone są prace zmierzające do szerszego zastosowania systemów epoksydowych (E) i silanowo-epoksydowych (SE) (Krystofiak i in., 2008). Zmiany te dotyczą klejenia elementów konstrukcyjnych z drewna wytwarzanych zgodnie z procedurami obowiązującymi w Europie – DIN 1052 (Radović i Rothkopf, 2003; Krystofiak i in., 2008). W ostatnich latach pozycja klejów RPF znacznie spadła, a w ich miejsce są wprowadzane kleje MUF i PUR, które spełniają wszystkie wymagania techniczne w zakresie jakościowej weryfikacji, potwierdzonej przez Instytut Otto- Grafa w Stuttgarcie. Dodatkowo wykazują dużą wytrzymałość na przenoszenie różnych obciążeń, a uzyskane spoiny charakteryzują się odpornością na działanie agresywnych chemikaliów, zachowując dużą wytrzymałość spoin. Umożliwiają także klejenie drewna o wysokiej wilgotności, nawet do 25% oraz drewna zabezpieczonego impregnatami i modyfikowanego.

Zgodnie z zaprezentowanym powyżej uzasadnieniem próbki tarcicy bocznej do badań spajano za pomocą żywicy melaminowo-mocznikowo-formaldehadowej, przeznaczonej do klejenia konstrukcji nośnych o oznaczeniu 1247 z dodatkiem 20 części wagowych utwardzacza 2526 firmy Akzo Nobel. Proces klejenia wzdłużnego odbywał się przy pomocy połączeń wczepowo-klinowych, na które klej był aplikowany metodą mechaniczną przy użyciu nakładarki grzebieniowej. Natomiast aplikacja kleju na szerokie płaszczyzny odbywała się z użyciem ręcznej nakładarki walcowej. Podczas klejenia bezwzględnie przestrzegano parametrów, które dla klejów MUF wynosiły:

- temperatura kleju, drewna, powietrza: 22°C,
- wilgotność powietrza: 65%,
- ilość kleju: 170 g/m<sup>2</sup> (±50 g/m<sup>2</sup>),
- ciśnienie prasowania: 0,6-0,8 N/mm<sup>2</sup>,
- czas zamknięty klejenia: 30 min,
- czas prasowania: około 6 godzin,
- wagowe proporcje mieszania żywicy z utwardzaczem: 10:2 części.

#### 4.4. Obliczanie wydajności materiałowej

##### Wydajność przetarcia

Zgodnie z założeniami niniejszej pracy po oznaczeniu udziału części twardej drewna sosny, surowiec drzewny przeznaczony na elementy konstrukcyjne został rozpiłowany na pilarsce ramowej niemieckiej firmy Muller, o prześwicie ramy piłowej 75 cm. Po przetarceniu dokonano pomiaru miąższości tarcicy i wyznaczono wydajność materiałową przetarcia na podstawie wzoru (1):

$$W_{it} = \frac{V_t}{V_k} \times 100 = \frac{V_{t_s} + V_{t_b}}{V_k} \times 100 \quad (1)$$

gdzie:

- $W_{it}$  – wydajność tarcicy (%),
- $V_t$  – miąższość tarcicy po przetarciu ( $m^3$ ),
- $V_{tg}, V_{tb}$  – miąższość tarcicy głównej i bocznej po przetarciu ( $m^3$ ),
- $V_k$  – miąższość kłody ( $m^3$ ).

#### **Wydajność materiałowa półfabrykatów**

Po przerobieniu surowca na materiały tarte produkty te poddano dalszej obróbce celem uzyskania półfabrykatów do produkcji klejonych próbek wielkowymiarowych. Wydajność materiałową półfabrykatów pozyskanych z tarcicy obliczono wzorem (2):

$$W_{ip} = \frac{V_p}{V_t} \times 100 \quad (2)$$

gdzie:

- $W_{ip}$  – wydajność półfabrykatów (%),
- $V_p$  – miąższość półfabrykatów ( $m^3$ ),
- $V_t$  – miąższość tarcicy ( $m^3$ ).

### **4.5. Analiza technologiczna pozyskania tarcicy na elementy konstrukcyjne lite i klejone z różnych stref na przekroju poprzecznym drewna okrągłego**

Uwzględniając cel niniejszej pracy i porównawczy charakter badań drewna sosny zwyczajnej pochodzącego z wybranych krain przyrodniczo-leśnych, dokonano podziału badanych próbek ze względu na ich położenie na przekroju poprzecznym kłody. W celu pozyskania próbek litych wyprodukowano tarcicę nieobrzynaną pochodzącą z przetarcia blokowego części odziomkowej przyjętych do badań dłużyc sosnowych z podziałem na tarcicę rdzeniową i bezrdzeniową. Tę ostatnią podzielono dodatkowo na dwie grupy: z przebiegiem promieniowym usłojenia (pozyskane z części środkowej kłody) i z przebiegiem stycznym (pozyskane z części bocznej kłody).

### **4.6. Oznaczenie właściwości fizycznych drewna sosny**

#### **4.6.1. Oznaczenie udziału części twardej drewna**

Inną cechą charakteryzującą jakość drewna sosny przeznaczonego do badań jest udział części twardej drewna, który oznaczano poprzez kolejne pomiary średnicy na końcach kłód (mierzonej bez kory) oraz średnicy twardej zawartych w tych sztukach. Dokładność pomiarowa wynosiła 1 mm, wyniki zaokrąglano do pełnych centymetrów. Jeżeli przekrój pnia był eliptyczny, dokonywano dwóch pomiarów prostopadłych

do siebie, otrzymując wartość średnią. Procentowy udział części twardej drewna sosnowego oznaczano wg wzoru (3).

$$U_{V_{tw}} = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{\frac{\pi \times d_{tw}^2}{4}}{\frac{\pi \times d_k^2}{4}} \times 100 = \frac{d_{tw}^2}{d_k^2} \times 100 \quad (3)$$

gdzie:

$U_{V_{tw}}$  – udział twardej części (%),

$V_{tw}, V_k$  – miąższość strefy twardej i całej kłody ( $m^3$ ),

$d_{tw}, d_k$  – średnica twardej części i średnica kłody (m).

#### 4.6.2. Oznaczenie gęstości drewna

Wyznaczenie gęstości przeprowadzono zgodnie z normą PN-77/D-4101 „Drewno. Oznaczanie gęstości”. Badane próbki laboratoryjne pozyskano z części środkowej próbek wielkowymiarowych litych, natomiast dla elementów klejonych pobrano jedną próbkę z każdej warstwy poklejonych na wysokość wstęg. W zależności od ilości łączonych warstw z każdej próbki wielkogabarytowej przebadano 6 próbek laboratoryjnych odpowiednio dla elementów z grup wymiarowych 150 mm. Badanie gęstości przeprowadzono metodą stereometryczną za pomocą suwmiarki, gdzie dokładność pomiarowa wynosiła 0,01 mm. Z kolei masę próbek określano na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,1 g. Gęstość badanych próbek wyznaczono na podstawie zależności (4):

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \times b_w \times l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (4)$$

gdzie:

$\rho_w$  – gęstość drewna o wilgotności „w” w chwili badania ( $kg/m^3$ ),

$m_w$  – masa próbki laboratoryjnej o wilgotności „w” (g),

$a_w, b_w, l_w$  – wymiary liniowe przekroju poprzecznego i długości próbki laboratoryjnej o wilgotności „w” (mm),

$V_w$  – objętość próbki laboratoryjnej o wilgotności „w” ( $mm^3$ ).

Średnią gęstość wyznaczono jako średnią arytmetyczną gęstości poszczególnych próbek laboratoryjnych w danej próbie z dokładnością do 1  $kg/m^3$ . Następnie dokonano przeliczenia gęstości drewna uzyskanej podczas pomiarów na wartość przy wilgotności odniesienia równej 12% wilgotności bezwzględnej, kierując się wytycznymi z normy PN-EN 384, zgodnie z zapisami normowymi: „Gdy wilgotność jest większa niż 12%, gęstość należy zmniejszyć o 0,5% dla każdego punktu procentowego różnicy wilgotności, a gdy wilgotność jest mniejsza niż 12%, gęstość należy zwiększyć o 0,5% dla każdego punktu procentowego różnicy w zawartości wilgoci”.



#### 4.6.3. Oznaczenie wilgotności bezwzględnej drewna

Badanie wilgotności przeprowadzono dwiema metodami: zgodnie z normą PN-EN 13183-1:2004 „Wilgotność sztuki tarcicy – część 1: Oznaczenie wilgotności metodą suszarkowo-wagową” oraz normą PN-EN 13183-2 „Wilgotność sztuki tarcicy – część 1: Oznaczenie wilgotności metodą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego”. Podczas badań z wykorzystaniem pierwszej z metod próbki suszyły się w suszarce w temperaturze 103°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Po uzyskaniu stałej masy zostały ponownie zważone na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,1 g. Następnie wyznaczono wartości wilgotności próbek za pomocą wzoru (5):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5)$$

gdzie:

$w$  – wilgotność bezwzględna badanej próbki (%),

$m_w$  – masa próbki przed suszeniem (g),

$m_0$  – masa próbki po suszeniu (g).

Wilgotność sosnowego drewna litego wyznaczono jako wartość średnią poszczególnych wilgotności badanych próbek w danej próbie. Dla próbek wykonanych z drewna klejonego obliczono wilgotność średnią jako wartość uśrednienia wilgotności kolejnych warstw, z których poklejono próbki wielkowymiarowe.

W celu oznaczenia wilgotności metodą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego użyto wilgotnościomierza typu HIT3.

#### 4.6.4. Oznaczenie wybranych cech na przekrojach poprzecznych kłód

Badanie słoistości przeprowadzono na podstawie wymagań normy: PN-82/D-94021 „Tarcica iglasta konstrukcyjna sortowana metodami wytrzymałościowymi” przy użyciu przyrostomierza BEPD-1A firmy Biotronik oraz lupki Brinella. Do badań przeznaczono zarówno próbki lite, jak i klejone w obu grupach wymiarowych. Badania wykonano na pełnych przekrojach poprzecznych próbek pozyskanych ze środkowych części badanych elementów konstrukcyjnych. Dla zwiększenia dokładności pomiarowej analizowana długość pomiarowa przekraczała 75 mm. Dla próbek klejonych stanowiła wartość średniej słoistości z każdej warstwy poklejonych wstęg (Smykała, 1959; Tomczak i in., 2009).

Przeciętną słoistość obliczono z dokładnością 0,1 mm na podstawie zależności (6):

$$S = l / N \quad (6)$$

gdzie:

$S$  – przeciętna szerokość przyrostu rocznego (mm),

$N$  – liczba słoików zawartych w długości odcinka pomiarowego (szt.),

$l$  – długość odcinka pomiarowego (mm).

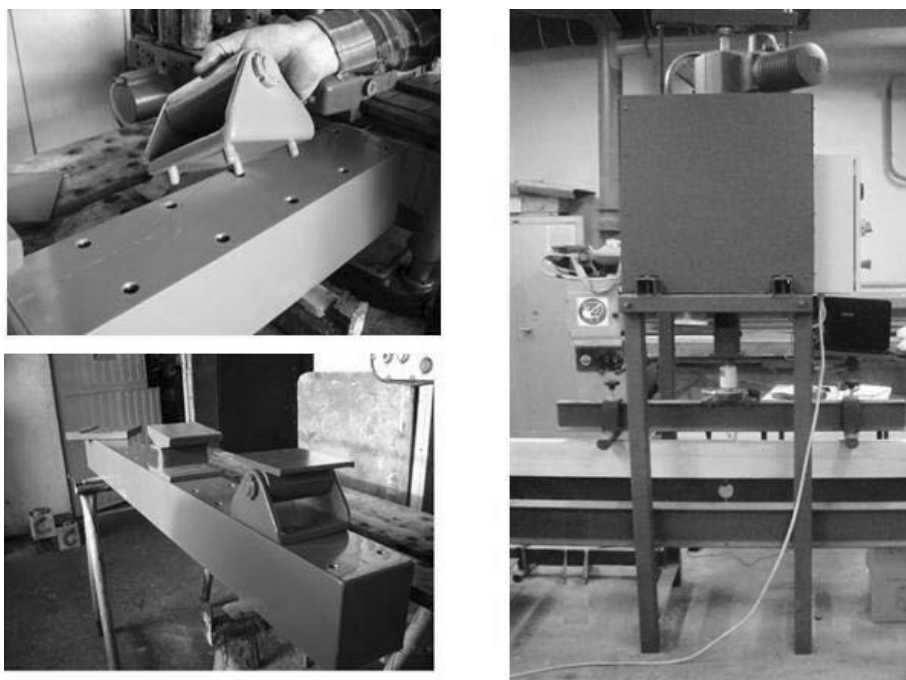
Na tym samym stanowisku badawczym oznaczono także udział drewna wczesnego i późnego dla kolejnych próbek.

## 4.7. Oznaczenie właściwości mechanicznych drewna sosny

### 4.7.1. Oznaczenie modułu sprężystości przy zginaniu elementów wielkowymiarowych

Pomiary właściwości mechanicznych badanego materiału zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej typu DM 2214 i aparaturze pomiarowej dostępnych na Wydziale Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Badanie modułu sprężystości przy zginaniu wykonano zgodnie z PN-EN 380:1998, PN-EN 408:2004.

Dla potrzeb pracy wykonano prototypowe urządzenie wytrzymałościowe oraz specjalnie skonstruowane oprzyrządowanie do badań pełnowymiarowych próbek, które zostało zamontowane na maszynie wytrzymałościowej DM 2214 oraz SAM (ryc. 6).



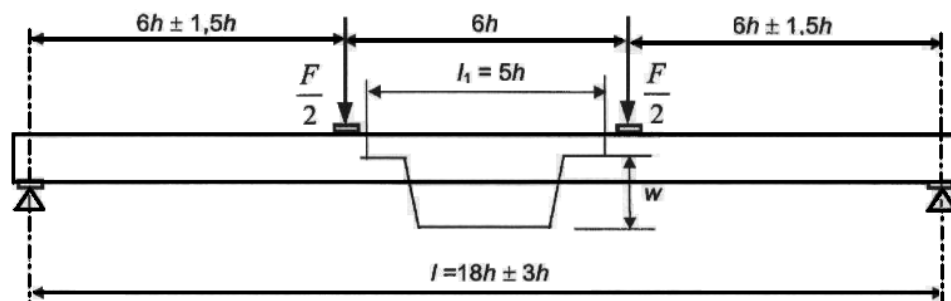
Ryc. 6. Oprzyrządowanie pomocnicze do badań wytrzymałościowych przeprowadzonych na próbkach pełnowymiarowych wykonanych z drewna sosny  
Fig. 6. Auxiliary tooling for strength tests carried out on full-sized samples made of pine wood

Moduł sprężystości materiału badawczego dla celów porównawczych wyznaczony został z pomiaru ugięć dwoma metodami, przy cztero- i trójpunktowym zginaniu. Próby przeprowadzone zostały na maszynie wytrzymałościowej zbudowanej w ramach projektu oraz z wykorzystaniem urządzenia typu DM 2214 oraz na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z050.

Badanie modułu sprężystości przy zginaniu przeprowadzono pod wpływem siły obciążenia przyłożonego dwupunktowo przy rozstawie  $l = 5h$  wysokości badanych próbek i rozstawie podpór  $l = 18h (\pm 3)$  zgodnie z PN-EN 408:2012 „Konstrukcje drewniane – Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo – Oznaczenie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych”.

Dla prób wielkowymiarowych drewna litego i klejonego na wysokości punktów podparcia zamocowana była szyna, do której przymocowany deflektometr określał strzałkę ugięcia z dokładnością  $\pm 0,01$  mm. Punkt mocowania deflektometru znajdował się w połowie odległości między podporami, w osi obojętnej przekroju tarcicy. Próbki obciążone wstępnie siłą 100 N. Badania modułu sprężystości przy zginaniu przeprowadzone były pod wpływem obciążenia przyłożonego dwupunktowo do badanych próbek i przy rozstawie podpór uzależnionym od ograniczeń sprzętowych, dążono do zgodności z PN-EN 408:2004 „Konstrukcje drewniane – Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo – Oznaczenie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych”. W badaniu zastosowano rozstaw podpór oraz rozstaw napór obciążających uzależniony od wymiarów badanych belek klejonych oraz litych modelowych zapewniający w części środkowej badanego materiału czyste zginanie (Dzbeński 1984, Krzosek 1995, Żur 2002). Przyrost obciążenia zadawany był równomiernie aż do granicy proporcjonalności.

Badania współczynnika sprężystości przy zginaniu (ryc. 7 i 8) przeprowadzono dla metody 4-punktowej, zgodnie z normą PN-EN 408:2012.



Ryc. 7. Schemat obciążania elementu w badaniu modułu sprężystości metodą 4-punktową wg PN-EN 408:2012

Fig. 7. Load diagram for elements in the elastic modulus test using the 4-point method according to PN-EN 408:2012

Współczynnik sprężystości obliczano ze wzoru zgodnego z normą PN-EN 408:2012 (7).

$$E_m = \frac{a \times l^2 \times (F_2 - F_1)}{16 \times I \times (w_2 - w_1)} \quad (7)$$

gdzie:

$E_m$  – współczynnik sprężystości przy zginaniu ( $\text{N/mm}^2$ ),

$a$  – odległość miejsca przyłożenia siły obciążającej od najbliższej podpory (mm),

$l$  – długość pomiarowa próbki przy oznaczaniu współczynnika sprężystości (mm),

$l_1$  – długość odcinka pomiarowego przy oznaczaniu odkształcenia (mm),

$I$  – moment bezwładności przekroju ( $\text{mm}^4$ ),  
 $F_2 - F_1$  – przyrost obciążenia (N),  
 $w_2 - w_1$  – przyrost odkształcenia odpowiadający przyrostowi obciążenia  $F_2 - F_1$  (mm).



Ryc. 8. Sposób przeprowadzenia badań na maszynie wytrzymałościowej wytworzonej w ramach projektu UP w Poznaniu  
 Fig. 8. The testing procedure on a strength testing machine manufactured within a PULS project

Przeliczenie wartości współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym próbki o wilgotności rzeczywistej  $W$  (%) na wartość współczynnika sprężystości próbki o wilgotności  $W = 12\%$  zgodnie z wymaganiami PN-EN 408:2012 wykonano wg wzoru (8):

$$E_{g12} = E_{gw} (1 + \alpha(W - 12)) \quad (8)$$

gdzie:

$E_{gw}$  – moduł sprężystości przy wilgotności „ $w$ ” ( $\text{N/mm}^2$ ),

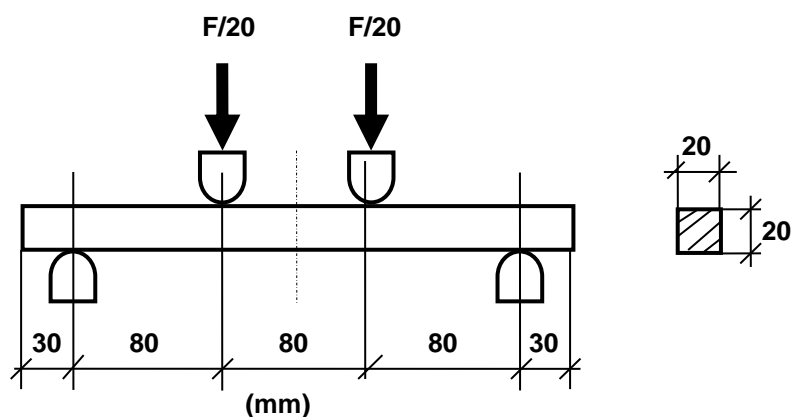
$\alpha$  – współczynnik przeliczeniowy,  $\alpha = 0,02$  (zgodnie z PN-63/D-04117),

$w$  – wilgotność bezwzględna próbki (%).

Moduł sprężystości na zginanie statyczne ustalony na podstawie powyższych wzorów został poddany weryfikacji do wartości charakterystycznych: zgodnie z PN-EN 384 oraz PN-EN 14080 „Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo – Klasy wytrzymałości i określenie wartości charakterystycznych”, określającej system klasyfikacji wytrzymałościowej dla drewna klejonego warstwowo.

#### 4.7.2. Oznaczenie właściwości mechaniczne próbek laboratoryjnych

Po zakończeniu prób związanych z właściwościami mechanicznymi elementów wielkogabarytowych badania wybranych cech drewna powtórzono na próbkach laboratoryjnych, które zostały wycięte z próbek wielkowymiarowych.



Ryc. 9. Sposób przeprowadzenia badań wytrzymałościowych próbek laboratoryjnych: schemat Zwick/Roell Z050

Fig. 9. Strength tests of laboratory samples using the Zwick/Roell Z050 testing machine

Pozyskane próbki o wymiarach  $300 \times 20 \times 20$  mm badano kolejno na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z050 (ryc. 9). Na podstawie normy PN-B-03156:1997 wyznaczono współczynnik sprężystości przy zginaniu statycznym. Otrzymane wyniki badań próbek laboratoryjnych były automatycznie generowane przez specjalistyczne oprogramowanie maszyny wytrzymałościowej. Podobnie jak poprzednio dokonano przeliczenia otrzymanych wyników na wartości odniesienia, korzystając z przeliczników.

#### 4.8. Klasyfikacja wytrzymałościowa klejonych elementów konstrukcyjnych wykonanych z drewna sosny zwyczajnej

W ramach prac badawczych zweryfikowano obowiązujące normy przedmiotowe związane z klasyfikacją wytrzymałościową drewna iglastego znajdującego swoje zastosowanie w szeroko rozumianym budownictwie. Zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 338:2016 klasyfikacja wytrzymałościowa drewna konstrukcyjnego odbywa się na podstawie trzech wskaźników: modułu sprężystości i wytrzymałości podczas zginania oraz gęstości badanego drewna. Wartości pozostałych właściwości mogą być odczytane z tablicy zamieszczonej w EN 338:2016 (tab. 1). Klasyfikacja wytrzymałościowa drewna konstrukcyjnego odbywa się na podstawie porównania tzw. „wartości charakterystycznych” wymienionych cech z zapisami normowymi (PN-EN 338:2016; PN-EN 14080). Wartość charakterystyczna dla wytrzymałości na zginanie i gęstości opiera się na rozkładzie statystycznym otrzymanych wyników i stanowi wartość 5% kwantyla z danej próby. Z kolei wartość charakterystyczna dla modułu sprężystości stanowi wartość średnią z próby (Krzosek, 2009; Pajchrowski i in., 2009). Dokładny sposób oznaczania wartości charakterystycznych opisuje norma PN-EN 384 „Drewno konstrukcyjne. Oznaczenie i oznaczenie wartości charakterystycznych”.

czanie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości”. Zapisy tej normy określają także minimalną liczbę próbek w próbie tj. zbiorze zawierającym próbki tej samej populacji o jednakowych wymiarach przekroju poprzecznego, wynoszącą minimum 40 szt. Pomimo że próbki należące do danej próby pochodziły z tych samych miejsc na przekroju poprzecznym kłody, przeprowadzone badania wytrzymałościowe wykazały znaczne różnice otrzymanych wartości cech sprężysto-wytrzymałościowych. W takim stanie, klasyfikacja wytrzymałościowa oparta na opisanych wartościach charakterystycznych prowadziłaby do przypisania klasy wytrzymałości C odpowiadającej relatywnie niskim wynikom z danej próby (5% kwantyl).

Przyjęta metodyka umożliwiła również porównanie właściwości badanych elementów sosnowych na podstawie wyników badań laboratoryjnych elementów wielkowymiarowych z wynikami klasyfikacji przeprowadzonej oceny jakości surowca w badaniach próbek laboratoryjnych.

Rozwój technologii inżynierskiej wyzwolił zmiany w strukturze wytworzenia konstrukcji drewnianych klejonych. Aspekt ten ma szczególne znaczenie w wykorzystaniu tarcicy o niższych przedziałach grubości oraz z zdefiniowanym zakresem kumulacji wad. Do grupy materiałów tartych o powyższej charakterystyce zaliczana jest tarcica obstawy bocznej. Jest ona materiałem wykorzystywanym często do produkcji sortymentów klejonych.

Możemy wyodrębnić dwie zasadnicze metody wytwarzania drewna klejonego:

- a) metody połączeń surowca jednorodnego niepowodujące zmiany schematu statycznego,
- b) metody wzmocnienia stref przyobwodowych powodujące zmianę schematu statycznego konstrukcji (Jasieńko, 2003; Jasieńko i in., 2006, 2009; Wilczyński, 2008).

Uwzględniając wprowadzenie dodatkowych elementów do układu konstrukcyjnego, można wymienić niezależne wzmocnienie konstrukcji w przypadku zastosowania spoin klejowych (Korzeniowski, 1965a, 1965b; Nożyński, 1987; Wilczyński, 1988; Wilczyński i in., 2008; Rapp, 2015, 2017). Uzyskana częściowa eliminacja układu budowy jednorodnej drewna pozwala na przeniesienie obciążeń oraz poprawę stateczności wyrobu (Faryniak i Żaboklicki, 1986; Jasieńko, 2003; Jasieńko i in., 2009).

Do metod wzmocnień polegających na wprowadzeniu dodatkowych elementów należy również podwieszenie istniejącego układu konstrukcyjnego. Rozwiązanie to stosowane jest najczęściej w przypadku groźby zniszczenia stropu drewnianego wynikającej z jego zaawansowanej degradacji. Zadaniem układu podwieszonoego jest przeniesienie obciążeń użytkowych oraz obciążeń własnych pierwotnie istniejącego stropu, jak również likwidacja nadmiernych ugięć.

Wśród najbardziej powszechnych technik inżynierskich uwzględniających wprowadzenie dodatkowych elementów do konstrukcji można wymienić wykonanie wzmocnienia współpracującego z istniejącym układem. Systemy te są podatne na wzmacnianie z zastosowaniem licznych tworzyw kompozytowych (Biblis, 1965; Spaun, 1981; Jeruzal i Przeddecki, 1983; Kropf i Meierhofer, 2000; Mielczarek i Śliwka, 2000; Jasieńko, 2001; Jasieńko, 2002; Masłowski i Spizewska, 2002; Jasieńko, 2003; Herzog i in., 2003; Lange i Orłowicz, 2004; Rudziński, 2010; Raftery i in., 2012; Rapp, 2015, 2017). Zaobserwowany układ geometryczny wytworzonego wyrobu warstwowego jest złożeniem wy-

padkowych wskaźników wytrzymałości elementów składowych (drewno/spoina klejowa). Jednakże ze względu na zdecydowany wpływ udziału objętościowego w grupie parametrów mechanicznych drewna klejonego na koncentrację naprężeń wpływa zastosowany materiał drzewny (Brol, 2005).

Tabela 2. Klasy wytrzymałości dla iglastego drewna konstrukcyjnego (wg PN-EN 338:2016)  
Table 2. Strength classes for coniferous structural timber (according to PN-EN 338: 2016)

Właściwości wytrzymałościowe	Klasy gatunków iglastych											
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Zginanie	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Rozciąganie wzdłuż włókien	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Rozciąganie w poprzek włókien	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ściskanie wzdłuż włókien	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Ściskanie w poprzek włókien	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Ścinanie	1,7	1,8	2	2,2	2,4	2,5	2,8	3	3,4	3,8	3,8	3,8
Średni moduł sprężystości wzdłuż włókien $\times 10^3$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16
Średni moduł sprężystości w poprzek włókien $\times 10^3$	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,37	0,4	0,43	0,43	0,47	0,5	0,53
Gęstość charakterystyczna	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Średnia gęstość	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Dobór przekroju pozwalającego zapewnić najlepsze wykorzystanie tarcicy bocznej stanowiącej produkt uboczny przerobów tartacznych oparty jest na założeniu racjonalnego kształtowania przekroju poprzecznego elementu konstrukcyjnego gwarantującego równomierny rozkład naprężeń w przekroju obciążanych produktów. Próby takiego rozkładu pojawiają się w badaniach dla przekrojów dwuteowych (Brzoska, 1972; Mielczarek, 1994; Dyląg i in., 1997).

W przypadku kształtowania przekroju z jednakowej grubości warstw tarcicy, dokonuje się ustaleń wskaźnika wytrzymałości wyrobu klejonego jako składowej modułu sprężystości drewna klejonego warstwowo, wynikającej z indywidualnych modułów sprężystości tarcicy, z której wykonano ten materiał. Dla pozyskanych elementów war-

stwowego przy  $n$ -tej liczbie warstw wykorzystuje się uproszczony wzór (Dzbeński i Czuczeło, 2000; Czuczeło i Dzbeński, 2004) (9):

$$E = k_1 E_1 + k_2 E_2 + k_3 E_3 + k_4 E_4 + k_5 E_5 + k_6 E_6 + \dots + k_n E_n \quad (9)$$

gdzie:

$E$  – moduł sprężystości elementów klejonych,

$E_n$  – moduł sprężystości  $n$ -tej warstwy ( $n = 1, \dots, n_x$ ),

$k_n$  – współczynnik przeliczeniowy  $n$ -tej warstwy ( $n = 1, \dots, n_x$ ) jako pochodna modułu sprężystości warstwowy  $n$ -tego elementu.

W przypadku obciążania elementów prostopadle do płaszczyzny sklejenia warstwy mają określony ( $k_n$ ) wpływ na wartość modułu sprężystości tarcicy skleionej warstwowo. Inaczej jest w przypadku, gdy obciążenie zostaje przyłożone w płaszczyźnie równoległej do warstwy klejowej. W przypadku tym współczynnik jest dzielnikiem liczby warstw (Grabowski, 1979; Dzbeński i Czuczeło, 2000; Czuczeło i Dzbeński, 2004).

Założenie indywidualnego pomiaru modułów sprężystości poszczególnych warstw tarcicy bocznej z powierzchni badawczych jest rozpatrywane tylko w ujęciu teoretycznym. Badania prowadzone są również przy warunkowym pominięciu wpływu spoiny klejowej na moduł sprężystości elementów klejonych.

Nośność belek drewnianych może być szacowana wieloma sposobami. Można wśród nich wymienić metody analityczne (obliczeniowe), numeryczne, jak również nieniszczące badania służące klasyfikacji jakościowej. Metody analityczne i numeryczne pozwalają na prowadzenie optymalizacji modeli przekrojów. Mimo to zdecydowanie największe znaczenie mają badania praktyczne w tym metody nieniszczące, a w szczególności weryfikacja modułu sprężystości statycznej oraz dynamicznej (sonicznej). Forma badań nieniszczących stanowi centralny punkt weryfikacji użyteczności tarcicy i dostępna jest w zakresie pozwalającym na zachowanie nienaruszonej struktury ocenianych materiałów tartych. Zauważalny jest silny wzrost zainteresowania przemysłowego oraz zastosowania tych rozwiązań w sortowaniu drewna konstrukcyjnego w powiązaniu z weryfikacją tomograficzną struktury drewna (Guertin i Arnold, 2001; Chang i Gazo, 2009; Lin i Wang, 2012; Berglund i in., 2013; Kozakiewicz i Krzosek, 2013; Stängle i in., 2014; Jacquin i in., 2017).

## 4.9. Badania metodą ultradźwiękową

W celu wzbogacenia badań jakości drewna o zyskujące coraz większe znaczenia podczas sortowania i klasyfikacji tarcicy oraz elementów konstrukcyjnych metody nieniszczące przeprowadzono badania z uwzględnieniem metody ultradźwiękowej (Kollmann i Krech, 1960; Burmester, 1965; Yiannos i Taylor, 1967; Dzbeński, 1984; Niemz i in., 1997; Moliński i in., 2000; Moliński i Fabisiak, 2001; Kokociński, 2001; Fabisiak, 2007). Badania te zostały wykonane na przygotowanym zgodnie z wymaganiami technicznymi aparatury zestawie materiałów i próbek stosowanych do oznaczeń w warunkach laboratoryjnych.



Do pomiaru prędkości propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien drzewnych zastosowana została impulsowa metoda pomiaru fali przechodzącej, przy użyciu defektoskopu ultradźwiękowego DI 60, produkcji Zakładu Aparatury Elektronicznej AZ-Industrie w Warszawie. Defektoskop wyposażony jest w głowicę nadawczą oraz odbiorczą o częstotliwościach 0,1 i 0,4 MHz. W celu zapewnienia odpowiedniego sprzężenia głowic ultradźwiękowych z badanym materiałem powierzchnie materiału poddawane badaniom zostały wygładzone pokryte oraz substancją sprzęgającą (krem silikonowy). Pomiar polegał na przesłaniu impulsu ultradźwiękowego przez badany materiał umieszczony między głowicami i pomiarze czasu jego przejścia od głowicy nadawczej do głowicy odbiorczej. Oprogramowanie defektoskopu umożliwia automatyczne obliczenie prędkości propagacji fali ultradźwiękowej po wcześniejszym wprowadzeniu do pamięci urządzenia długości próbki.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz znajomości gęstości drewna próbek obliczona zostanie wartość tzw. „sonicznego” modułu sprężystości. Do obliczeń tych wykorzystany został podstawowy związek fizyczny w postaci (10):

$$E_L = C_L^2 \times \rho \quad (10)$$

gdzie:

$C_L$  – prędkość propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej (m/s),

$E_L$  – „soniczny” moduł sprężystości wzdłuż włókien (N/mm<sup>2</sup>),

$\rho$  – gęstość drewna (kg/m<sup>3</sup>).

Powyższy wzór jest słuszny w przypadku materiałów izotropowych. W przypadku materiałów anizotropowych, a do takich należy drewno, rozprzestrzeniająca się fala podłużna w wyniku poprzecznego oddziaływania sąsiednich elementów ulega pewnemu zniekształceniu, które sprowadza się do zmiany charakteru fali podłużnej na poprzeczną. W tej sytuacji konieczne jest wprowadzenie poprawki ( $p$ ) uwzględniającej poprzeczne do kierunku propagacji fali podłużnej drgania ośrodka (11).

$$p = \frac{(1-k)}{(1+k) \times (1-2k)} \quad (11)$$

gdzie:

$k$  – zredukowany współczynnik Poissona.

Dla drewna wartość zredukowanego współczynnika Poissona przyjęto w oparciu o dotychczasowe badania (Marcinkowska i Moliński, 2005, 2006) jako  $k = 0,3$ . Uwzględniając zatem powyższą wartość „sonicznego” modułu sprężystości, obliczono (12):

$$E_L = C_L^2 \times \rho \times 0,743 \times 10^{-6} \quad (12)$$

gdzie:

$10^{-6}$  – współczynnik wynikający z przeliczenia mianownika.

## 4.10. Statystyczne opracowanie wyników

W celu wykonania badań pomocniczych, objętych analizą statystyczną, wykorzystano metody wnioskowania statystycznego pozwalające obliczyć wartości charakteryzują-

ce większy zbiór otrzymanych wyników na podstawie próby losowej (Gren, 1982; Wójcik, 1987).

W poniższych wzorach zastosowano następujące oznaczenia:

- $n$  – liczebność próby,
- $x_i$  – pojedynczy wynik próby losowej, zmienna niezależna ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),
- $y_i$  – zmienna zależna ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),
- $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna próby losowej lub zmiennych niezależnych,
- $\bar{y}$  – średnia arytmetyczna zmiennych zależnych,
- $\bar{y}_i$  – wartość średniej zmiennej zależnej wyznaczonej na podstawie równania regresji.

Obliczanymi parametrami dla  $n$ -elementowej próby były następująco definiowane miary rozkładu:

- *średnia arytmetyczna* (13):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (13)$$

- *wariancja* – miara zmienności utożsamiana ze zróżnicowaniem zbiorowości (14):

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (14)$$

- *odchylenie standardowe* – miara rozproszenia średnich z prób wokół średniej wartości z populacji równa pierwiastkowi kwadratowemu wariancji (15):

$$S = \sqrt{S^2} \quad (15)$$

- *współczynnik zmienności* wyrażający w procentach średnią arytmetycznej wartość odchylenia standardowego (Krzysik, 1978; Starecki, 1998) (16):

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (16)$$

Ponieważ badane parametry wykazywały wzajemną zależność liniową oraz nieliniową, analizę statystyczną oparto na określeniu zależności badanych cech, określając regresję prostoliniową, co pozwala wyznaczyć następujące cechy decydujące o wzajemnych powiązaniach:

- *współczynnik korelacji* – określa stopień liniowej zależności pomiędzy zmienną niezależną  $x_i$  i zmienną zależną  $y_i$  (17):

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

W zależności od przedziału wartości wyróżnia się następujące skorelowanie zmiennych:  $R \in < 1; 0,9 >$  – bardzo silna korelacja,  $R \in < 0,89; 0,8 >$  – silna korelacja,  $R \in < 0,79; 0,7 >$  – umiarkowanie silna korelacja,  $R \in < 0,69; 0,6 >$  – istotna korelacja,  $R \leq 0,59$  – słaba korelacja.

- *współczynnik determinacji* wynoszący kwadrat współczynnika korelacji ( $R^2$ ), będący miarą dopasowania modelu do danych empirycznych  $(x_i, y_i)$ , określa udział zróżnicowania zmiennej zależnej za pomocą dopasowanego modelu w całkowitym jej zróżnicowaniu zaobserwowanym w próbie.



## 5. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

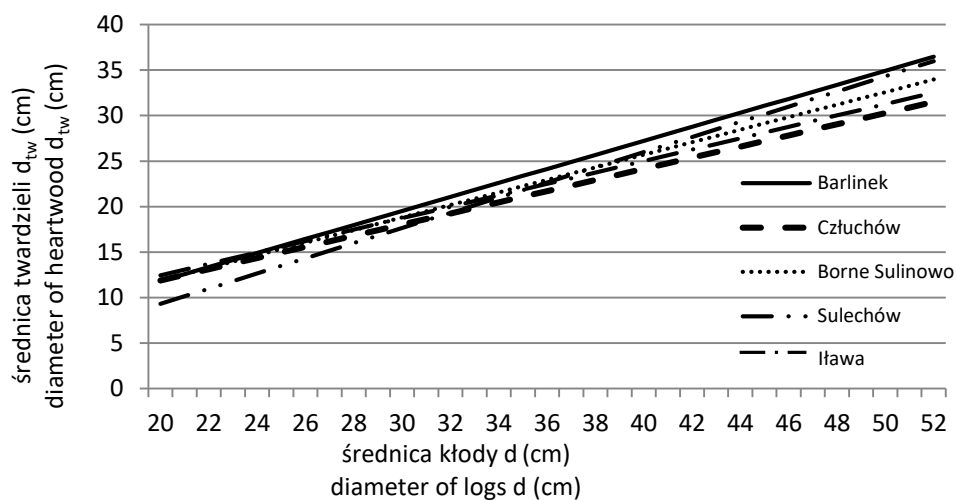
### 5.1. Udział części twardzielowej w surowcu przeznaczonym do badań

Aby określić przydatność badanego drewna sosny, wyznaczono udział drewna twardzielowego w pozyskanym surowcu doświadczalnym. Dla uzyskania tego celu dokonano pomiaru kłód sosnowych pozyskanych z dłużyc modelowych oraz stref drewna twardzielowego. Na tej podstawie obliczono procentowy udział strefy twardzielowej dla każdej średnicy badanej kłody. Przykładowe zestawienie wyników zamieszczono na rycinach 10 i 11.

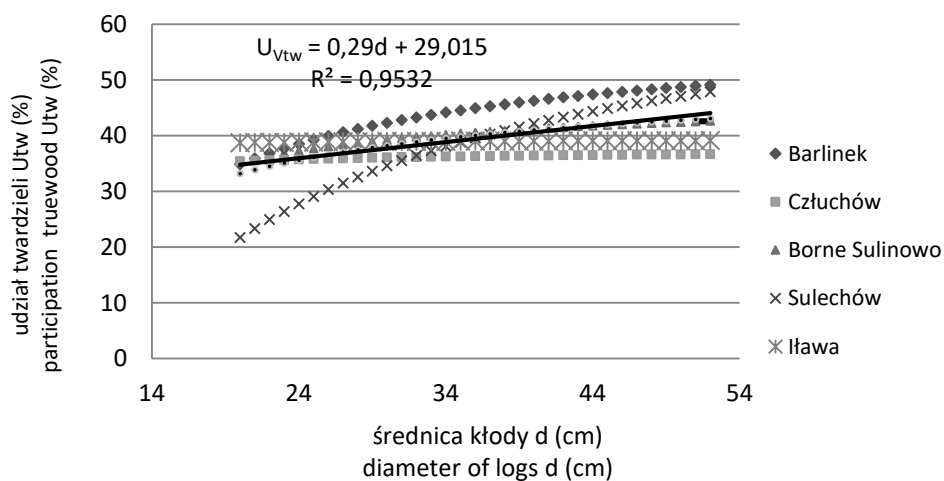
Na podstawie analizy wyników pomiarów stwierdzono liniową zależność średnicy twardzieli ( $d_{tw}$ ) od średnicy kłód ( $d$ ) w badanym drewnie sosny pochodzącej z badanych obszarów pięciu powierzchni na terenie Polski Zachodniej. Wraz ze wzrostem grubości badanego drewna proporcjonalnie wzrastała także średnica twardzieli w poszczególnych kłodach. Zależność średnicy twardzieli ( $d_{tw}$ ) od średnicy kłód ( $d$ ) w badanym drewnie sosny pochodzącej z Barlinka opisuje równanie  $d_{tw} = f(d) = 0,77d - 3,58$ ;  $R^2 = 0,78$ . Zależność średnicy twardzieli od średnicy kłody dla surowca z rejonu Bornego Sulinowa można przedstawić za pomocą funkcji:  $d_{tw} = f(d) = 0,689d - 1,87$ . Współczynnik determinacji  $R^2 = 0,971$  wskazuje na bardzo silną korelację otrzymanych wyników z prostą opisaną powyższym wzorem (ryc. 10). Zależność średnicy twardzieli ( $d_{tw}$ ) od średnicy kłód ( $d$ ) w badanym drewnie sosny pochodzącej z Sulechowa opisuje równanie  $d_{tw} = f(d) = 0,8332d - 7,3437$ ;  $R^2 = 0,991$ . Zależność średnicy twardzieli  $d_{tw}$  od średnicy kłód ( $d$ ) w badanym drewnie sosny pochodzącej z Człuchowa opisuje równanie  $d_{tw} = f(d) = 0,6123d - 0,3452$ ;  $R^2 = 0,761$ . Zależność średnicy twardzieli  $d_{tw}$  od średnicy kłód ( $d$ ) w badanym drewnie sosny pochodzącej z Iławy opisuje równanie  $d_{tw} = f(d) = 0,6274d - 0,097$ ;  $R^2 = 0,817$ .

Próbę zbiorczego zestawienia wyników oraz identyfikacji wspólnego wskaźnika średnicowego udziału twardzieli opisuje równanie  $d_{tw} = f(d) = 0,6222d + 0,2215$ ;  $R^2 = 0,865$ .

Wyniki przeprowadzonych pomiarów w badanych powierzchniach dla przykładowego pochodzenia kłód sosnowych, dotyczących średnicy twardzieli i grubości ścianki bielastej, pozwoliły określić procentowy udział drewna twardzielowego w funkcji kwadratu średnicy przerabianych kłód sosnowych (ryc. 11). Udział objętościowy twardzieli mieścił się w przedziale 21-49%. Wzrost średnicy kłód (powyżej 36-39 cm) wiąże się ze wzrostem udziału strefy twardzielowej. Zależność tę można przedstawić za pomocą funkcji  $U_{v_{tw}} = 0,29d + 29,01$ ;  $R^2 = 0,953$ . Zaprezentowana formuła opisująca udział procentowy twardzieli, daje rzeczywiste i minimalne wyniki rozkładu tej cechy w badanym drewnie sosnowym Polski Zachodniej.



Ryc. 10. Zależność średnicy twardzieli ( $d_{tw}$ ) od średnicy kłód ( $d$ ) drewna sosny  
Fig. 10. Dependence of heartwood diameter ( $d_{tw}$ ) from the diameter ( $d$ ) of pine wood

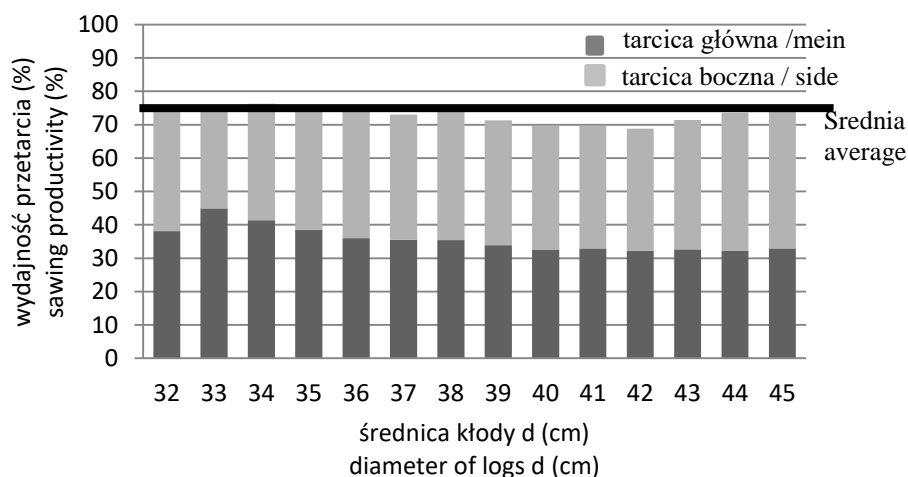


Ryc. 11. Udział twardzieli ( $U_{v_{tw}}$ ) jako funkcja średnicy kłód ( $d$ ) drewna sosny z weryfikowanych baz surowcowych  
Fig. 11. The share of heartwood ( $U_{v_{tw}}$ ) as a function of log diameter ( $d$ ) of pine wood from verified raw material bases

## 5.2. Wydajność materiałowa

### 5.2.1. Wydajność materiałowa przetarcia

Zgodnie z założeniami metodycznymi tarcicę pozyskano z przetarcia kłód uzyskanych z dłużyc modelowych i przeznaczono do przerobu wtórnego. W procesie manipulacji pozyskano kłody sosnowe o długości 2,5-3,5 m i średnicach w cieńszym końcu większych niż 14 cm. W wyniku przetarcia z każdej sztuki wydzielono: 1 bal rdzeniowy, 2 bale styczne, a także od 4 do 10 desek. Grubość bali w stanie mokrym wynosiła 50 mm, a desek bocznych 25 mm. Weryfikacja wydajności materiałowej przetarcia wynika z przyjętej technologii rozkroju wzdłużnego drewna okrągłego. Przy uwzględnieniu procesów opartych na pozyskaniu tarcicy nieobrzynanej na pilarkach ramowych i wielotarczowych określono szczegółowe wyniki wydajnościowe zamieszczone na rycinie 12.



Ryc. 12. Całkowita wydajność materiałowa przetarcia z uwzględnieniem udziału tarcicy głównej i tarcicy bocznej z przeznaczeniem na elementy klejone

Fig. 12. Total recovery rate of sawn assortments taking into account the share of core timber and side boards intended for production of glued elements

Na podstawie wyników prowadzonych badań przetarcia można stwierdzić, że maksymalną wydajność tarcicy 76% uzyskano dla przerobu kłód o średnicy około 34 cm. Z kolei po przekroczeniu średnicy 36 cm dla badanego sprzęgu wydajność tarcicy głównej zmniejsza się w zależności od procentowego udziału produktów przetarcia. Zauważalny jest wpływ zwiększenia wydajności tarcicy bocznej grubości 25 mm wraz ze wzrostem średnicy przecieranego materiału.

Wartość średnia wydajności przetarcia wyniosła 73%, co – zważywszy na duży udział tarcicy bocznej – stanowi o racjonalnym poziomie wykorzystania przerabianego

drewna okrągłego (Dzbeński i Korczewski, 1973; Hruzik, 1979, 1993, 2001a, 2001b, 2006; Krzosek, 1995; Wieruszewski i in., 2009, 2011, 2010, 2013).

### 5.2.2. Wydajność materiałowa przerobu wtórnego

Materiały tarte skierowane do badań po zakończonym procesie suszenia tarcicy do wilgotności 12%, zarówno bale 50 mm, jak i tarcica 25 mm, zostały poddane dalszemu przerobowi. Bale przeznaczone na konstrukcyjne materiały lite o nominalnych wymiarach przekroju poprzecznego 40 × 150 mm. Z kolei tarcicę boczną o grubości 25 mm skierowano do obróbki na konstrukcyjne elementy klejone o równorzędnych parametrach wymiarowych przekroju poprzecznego, używane w praktyce jako elementy konstrukcje domów szkieletowych.

Średnia wydajność materiałowa na etapie przerobu tarcicy w stanie suchym 25 mm (tarcica boczna) na elementy klejone wyniosła 52,5%. Po zestawieniu ze wskazaną wydajnością przetarcia kłód daje to ogólną wydajność materiałową surowca konstrukcyjnego na poziomie 38%. Na taki wynik wpływała restrykcyjna selekcja jakościowa surowca podczas pozyskiwania łąt konstrukcyjnych. Przyjęta technologia wykorzystania tarcicy bocznej sprzyja produkcji materiałów przeznaczeniowych o wyrównanej jakości.

Wydajność materiałowa w przerobie surowca badawczego strefy centralnej w postaci elementów sosnowych litych wyniosła około 55%. Finalna wydajność obliczeniowa próbek litych odniesiona do miąższości pozyskanego sosnowego surowca okrągłego wyniosła około 40%.

## 5.3. Właściwości fizyczne drewna sosny

### 5.3.1. Wilgotność bezwzględna drewna

W celu weryfikacji parametrów wytrzymałościowych oraz podstawowych właściwości fizycznych dokonano oceny wilgotności bezwzględnej drewna sosny pochodzącego z badanych powierzchni doświadczalnych. Pomiaru wilgotności dokonano bezpośrednio po badaniach wytrzymałościowych (pozyskując próbki laboratoryjne ze strefy środkowej elementów wielkowymiarowych poddanych zginaniu) dla określenia modułu sprężystości. Wilgotność oznaczono, podając wartości średnie dla całego przekroju próbek litych, oraz jako średnie przedziały wilgotności kolejnych warstw próbek klejonych przedstawiono w tabeli 3.

Jak wskazują uzyskane wyniki pomiarów wilgotności bezwzględnej próbek wielkogabarytowych wykonanych z litego (tarcica główna) i klejonego (tarcica boczna) drewna sosny z badanych powierzchni doświadczalnych, rozrzut mierzonych wartości na wszystkich próbkach z grup wynosił maksymalnie 6 punktów procentowych. Pomiaru średniej wilgotności bezwzględnej dla próbek sosnowych wykonanych z drewna obstawy bocznej kierowanego do klejenia wykazywały znacznie mniejszą rozbieżność.



Tabela 3. Zestawienie wyników pomiaru wilgotności drewna sosny zwyczajnej po procesie sezonowania  
Table 3. Comparison of the pine wood moisture contents after air drying

Oznaczenie powierzchni Surface marking	Wilgotność bezwzględna drewna litego/klejonego w kolejnych warstwach dla danej grupy (%) Absolute humidity of solid wood / glued wood in subsequent layers for a given group (%)	Średnia wilgotność Mean moisture content (%)
I	min 8,7.....max 14,6	10,8
II	min 9,4.....max 13,8	12,4
III	min 10,2.....max 13,6	11,5
IV	min 7,9.....max 11,2	9,7
V	min 8,2.....max 14,0	11,1

Wynika to z równomiernego rozkładu wilgotności na przekroju w procesie suszenia. Średnie wartości wilgotności dla próbek wielkowymiarowych różniły się zaledwie o 3 punkty procentowe. Większą rozbieżność uzyskanych wyników wilgotności drewna można było przypisać średniej gęstości poszczególnych warstw. Tarcica przeznaczona na poszczególne grupy próbek (tarcica główna i boczna) była suszona w tych samych warunkach (program do suszarni komorowej SECOTERM), co wpływa zasadniczo na zbliżone wyniki średnich wilgotności. Dodatkowym pozytywnym czynnikiem wpływającym na niską zmienność uzyskanych wyników jest zasada sezonowania przygotowanych próbek w temperaturze 20°C oraz względnej wilgotności powietrza 65%, które przeprowadzono przed badaniami wytrzymałościowymi.

Zapisy normy PN-EN 14080 wskazują, że tarcica wykorzystywana do produkcji konstrukcji, a w szczególności klejonych warstwowo, powinna posiadać wilgotność  $8 \pm 15\%$ , sprawdzoną i potwierdzoną bezpośrednio przed skierowaniem jej do procesu technologicznego. Wymaga się także, aby wilgotność kolejnych warstw elementu była zbliżona i mieściła się w przedziale tolerancji 4% (PN-EN 386, Canadian Wood Council). Dlatego pomimo zachowania tolerancji wilgotności bezwzględnej podczas klejenia warstwowego (8-15%), należy zadbać, aby różnica wilgotności pomiędzy dwoma klejonymi ze sobą elementami nie była zbyt duża. Jest to związane bezpośrednio z powstającymi naprężeniami desorpcyjnymi, które dodatkowo obciążają spoinę klejową. Podczas instalacji danego elementu w konstrukcji budowlanej może dojść do sytuacji, gdy wypadkowa naprężeń desorpcyjnych i obciążenia mechaniczne będą działać w jednym kierunku. Zachodzi wówczas zjawisko tzw. superpozycji, czyli sumowanie się naprężeń. W skrajnych wypadkach stan taki może doprowadzić do zerwania spoiny klejowej, pomimo braku przekroczeń krytycznych naprężeń niszczących, wynikających z obciążenia użytkowego elementu.

### 5.3.2. Słoistość i udział drewna późnego w przyrostach rocznych

Szerokość słoików rocznych (przyrosty roczne) i udział drewna późnego w przyrostach rocznych mogą stanowić praktyczny wskaźnik technicznych i użytkowych właściwości drewna stosowanego do celów konstrukcyjnych. W badaniach próbek wielkowy-

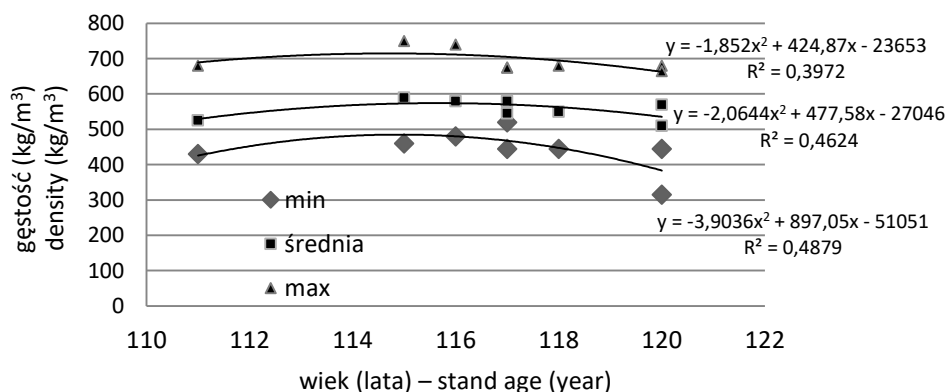
miarowych oznaczono średnie wartości szerokości przyrostów rocznych badanego drewna sosnowego. Próbkę do badań pozyskano z drzew IV i V klasy wieku (około 90-120 letnich) drzewostanów znajdujących się na terenie 5 rejonizacji: Barlinek – I, Człuchów – II, Borne Sulinowo – III, Sulechów – IV, Ława – V. Opisując przygotowany materiał doświadczalny, pozyskany na wysokości 1 m od odziomka dłuźcy – odpowiadającej miejscu pomiaru średnicy znamionowej (interpretowane jako pierśnica w drzewie stojącym) na promieniach południowo-północnym, dokonano pomiarów i określono następujące cechy:

- wiek drzewa,
- szerokość przyrostów rocznych i udział drewna późnego w przyroście rocznym,
- długość promienia oraz średnicę drzewa,
- udział twardzieli na średnicy,
- gęstość drewna.

Powyższe zestawienia szerokości przyrostów rocznych zawarto w tabelach 4-13 (odnoszących się do materiału badawczego, kolejno na przekroju S – południowym i N – północnym, pozyskanego z poszczególnych nadleśnictw) oraz w tabeli zbiorczej 14 (dla surowca reprezentującego drewno z wszystkich 5 nadleśnictw).

#### Zestawienie wyników dla I powierzchni badawczej – Nadleśnictwo Barlinek

W tabeli 4 oraz na rycinie 13 przedstawiono parametry charakteryzujące pozyskane do badań drewno z drzew pochodzących z powierzchni I. Pozyskane drzewa z Nadleśnictwa Barlinek, w wieku od 111 do 120 lat, charakteryzowały się średnicami od 420 mm (111 i 117 lat) do 566 mm (120 lat). Średnia gęstość drewna na wysokości pierśnicy dla poszczególnych drzew wyniosła od 505 kg/m<sup>3</sup> (111 lat) do 595 kg/m<sup>3</sup> (116 lat).



Ryc. 13. Zmiana struktury gęstości drewna dla surowca sosnowego z I powierzchni badawczej  
Fig. 13. Change in the wood density structure for raw pine timber from experimental site I

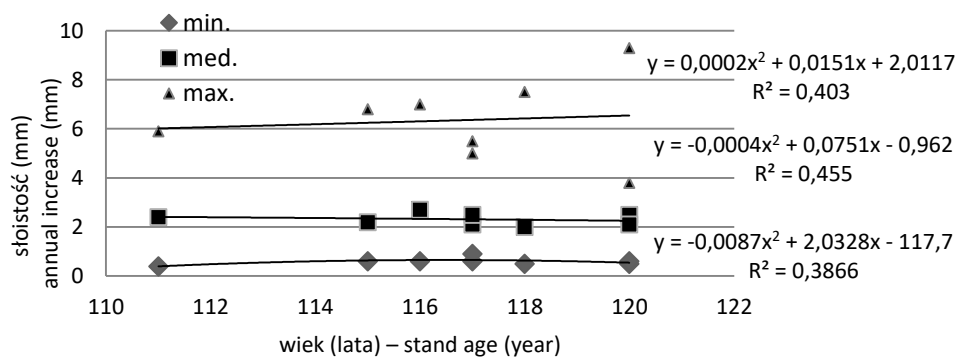
W tabeli 5 oraz na rycinie 14 przedstawiono dane dotyczące parametrów makrostrukturalnych, szerokości przyrostów rocznych oraz udziału drewna późnego w przyroście

Tabela 4. Zestawienie charakterystyki drzew z I powierzchni badawczej – Barlinek  
Table 4. Characteristics of trees from the experimental site I – Barlinek

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Pierśnica Diameter at breast height (mm)	Średnia gęstość drewna Average wood density (kg/m <sup>3</sup> )	Gęstość drewna na długości promienia Wood density along the radius (kg/m <sup>3</sup> )					Długość promienia Radius length (mm)	Udział twardejzieli na przekroju Share of heartwood (%)
			min	średnia average	max	±S	V (%)		
111	480,0	530	430	525	680	170	32	258,3	54
			450	530	625	53	10	221,7	
115	517,6	595	460	590	750	184	31	315,7	51
			460	595	725	105	17	201,9	
116	420,6	560	480	580	740	198	34	244,2	45
			430	540	730	89	16	176,4	
117	546,2	560	520	580	675	167	28	302,3	46
			470	535	600	41	7	243,9	
117	482,1	540	445	545	675	165	30	294,0	58
			420	530	645	82	15	187,9	
118	433,1	570	445	550	680	185	33	231,9	45
			455	590	640	81	13	201,2	
120	465,6	575	445	570	680	178	31	253,6	61
			300	585	725	127	21	212,0	
120	420,7	505	315	510	665	164	32	260,5	62
			445	500	550	45	9	160,2	

S – odchylenie standardowe cechy – standard deviation

V – współczynnik zmienności – coefficient of variation



Ryc. 14. Zmiana struktury przyrostów rocznych dla surowca sosnowego z I powierzchni badawczej  
Fig. 14. Changes in the structure of annual increments for pine timber from experimental site I

Tabela 5. Zestawienie charakterystyki drzew modelowych z I powierzchni badawczej – Barlinek  
Table 5. Characteristics of trees from the experimental site I – Barlinek

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Szerokość przyrostu rocznego na długości promienia Width of annual growth over the radius (mm)					Udział drewna późnego w przyroście rocznym na długości promienia Share of late wood in annual growth over the radius (%)				
	min	średnia average	max	±S	V (%)	min	średnia average	max	±S	V (%)
116	0,6	<b>2,7</b>	7,0	1,3	46	7	<b>38</b>	73	13	34
	0,6	<b>1,7</b>	4,5	0,7	41	7	<b>35</b>	76	12	34
117	0,6	<b>2,1</b>	5,5	0,9	44	4	<b>35</b>	69	12	36
	0,4	<b>1,6</b>	3,8	0,7	42	7	<b>41</b>	75	14	35
115	0,6	<b>2,2</b>	6,8	1,1	47	6	<b>35</b>	64	12	34
	0,7	<b>1,9</b>	4,8	0,8	40	6	<b>35</b>	60	13	36
120	0,5	<b>2,5</b>	9,3	1,5	58	4	<b>42</b>	71	13	31
	0,6	<b>2,0</b>	6,0	0,9	42	5	<b>36</b>	62	12	32
120	0,6	<b>2,1</b>	3,8	0,7	33	6	<b>35</b>	62	14	40
	0,3	<b>1,8</b>	4,3	0,8	43	5	<b>38</b>	69	15	38
111	0,4	<b>2,4</b>	5,9	1,0	41	5	<b>36</b>	67	15	42
	0,4	<b>1,5</b>	4,2	0,8	58	5	<b>30</b>	65	13	42
117	0,9	<b>2,5</b>	5,0	0,9	34	7	<b>33</b>	81	14	42
	0,6	<b>1,6</b>	3,5	0,7	42	5	<b>29</b>	54	11	40
118	0,5	<b>2,0</b>	7,5	1,2	61	4	<b>33</b>	71	12	37
	0,3	<b>1,7</b>	5,1	0,7	43	5	<b>29</b>	59	11	39

rocznym. Średnia wartość szerokości przyrostu rocznego dla rozpatrywanych przekrojów poprzecznych w kierunku pomiarów południowych i północnych nie przekracza granicy 3 mm. Można to drewno sklasyfikować jako wąskostoiste. Analizując wartości maksymalne, należy zauważyć, że są one większe od 3 mm, jednakże są to wartości typowe dla drewna młodocianego, znajdującego się w pobliżu rdzenia, kilka do kilkunastu przyrostów od rdzenia dla drewna sosny.

Analizując szerokość przyrostów rocznych na długości promienia południowego oraz północnego, należy zauważyć, że w rozważanych przypadkach zarówno średnia, jak i maksymalna szerokość przyrostu rocznego jest zawsze wyższa dla promienia południowego (dłuższego). Średnia wartość udziału drewna późnego w przyroście rocznym wynosi od 29% do 42%. Maksymalna wartość udziału drewna późnego w przyroście rocznym (ponad 50%) może świadczyć o występowaniu drewna reakcyjnego.

#### Zestawienie wyników dla II powierzchni – Człuchów

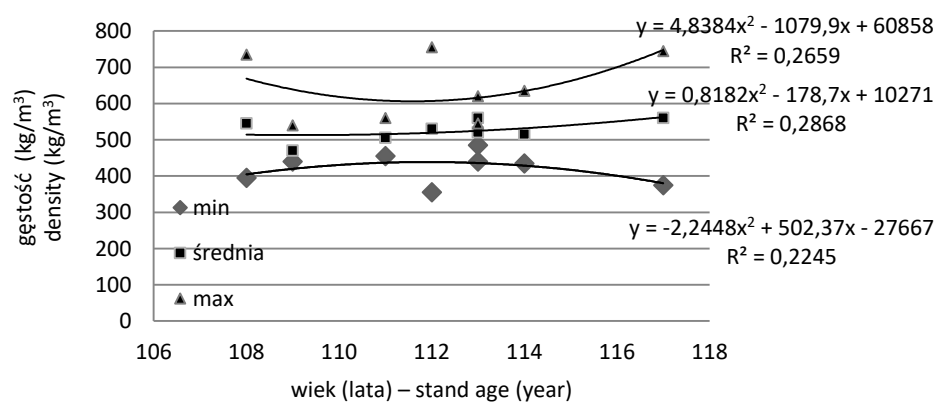
Drewno pozyskane do badań z Nadleśnictwa Człuchów (tab. 6 i 7) pochodziło z drzew modelowych w wieku od 108-117 lat, o średnicach (bez kory) od 467,9 mm do 516,3 mm, jednakże najczęściej średnice te nie przekraczały 500 mm. Udział części twardej na przekroju poprzecznym pnia wynosił ponad 50%, a nawet 73% w sztuce w wieku 113 lat.

Wyjątek stanowił sortyment w wieku 109 lat, w którym udział twardej części nie przekroczył 45%. Średnia gęstość drewna wynosiła od 495 kg/m<sup>3</sup> do 565 kg/m<sup>3</sup> (ryc. 15).

Tabela 6. Zestawienie charakterystyki drzew modelowych z II powierzchni badawczej – Człuchów  
Table 6. Characteristics of trees from the experimental site II – Człuchów

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Średnica Drzewa Diameter (mm)	Średnia gęstość drewna Average wood density (kg/m <sup>3</sup> )	Gęstość drewna na długości promienia Wood density along the radius (kg/m <sup>3</sup> )					Długość promienia Radius length (mm)	Udział twardzieli na średnicy Share of heartwood (%)
			min	średnia average	max	±S	V (%)		
114	516,3	515	435	515	635	75	15	293,3	55
			430	510	635	73	17	223,0	
113	467,9	565	490	570	650	52	9	285,1	64
			440	560	620	77	14	182,8	
111	473,3	520	455	505	560	39	8	226,5	55
			480	535	575	32	6	246,8	
108	484,6	560	435	575	735	120	21	263,3	66
			395	545	735	122	22	221,3	
113	480,3	530	485	520	545	22	4	293,0	73
			385	550	735	106	19	187,3	
117	498,1	525	375	560	745	109	19	311,8	64
			355	490	550	66	13	186,3	
112	486,0	510	355	530	755	130	24	290,6	60
			325	490	610	90	18	195,4	
109	496,7	495	440	470	540	30	6	284,5	44
			430	520	685	104	20	212,2	

Analizując długości promieni przekroju w kierunkach południowych oraz północnych – można stwierdzić, że w większości drzewa modelowe charakteryzowały się znaczną, bo około 100-milimetrową różnicą w długościach, a więc występowała mimośrodowość rdzenia, przejawiająca się również w różnicach gęstości, szerokości przyrostów rocznych oraz udziale drewna późnego w przyroście rocznym. Pomimo iż średnie wartości szerokości przyrostów rocznych nie przekraczają 3 mm i można stwierdzić, iż jest to drewno wąskosłojne, to maksymalne wartości szerokości przyrostów oraz wysoki współczynnik zmienności świadczą o małej równośloistości analizowanego drewna (ryc. 16).



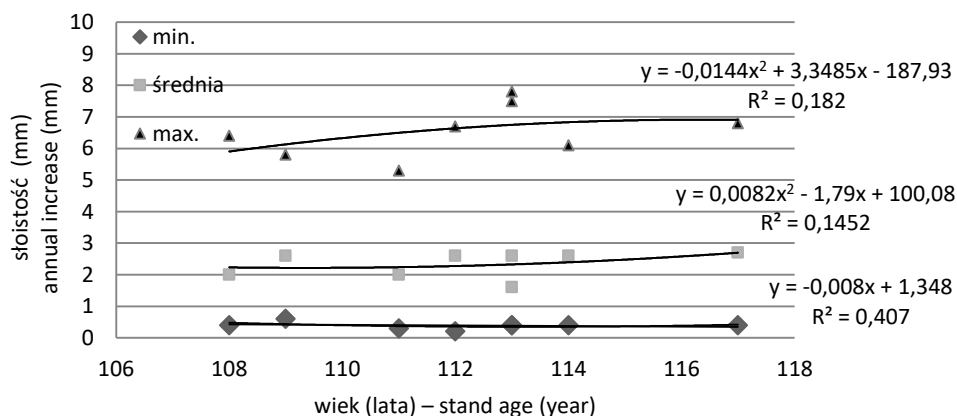
Ryc. 15. Zmiana struktury gęstości drewna dla surowca sosnowego z II powierzchni badawczej  
Fig. 15. Changes in wood density structure for pine timber from experimental site II

Tabela 7. Zestawienie charakterystyki drzew modelowych z II powierzchni badawczej – Człuchów  
Table 7. Characteristics of trees from the experimental site II – Człuchów

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Szerokość przyrostu rocznego na długości promienia Width of annual growth over the radius (mm)					Udział drewna późnego w przyroście rocznym na długości promienia Share of late wood in annual growth over the radius (%)				
	min	średnia average	max	±S	V (%)	min	średnia average	max	±S	V (%)
114	0,4	<b>2,6</b>	6,1	1,3	52	14	<b>38</b>	60	9	24
	0,4	<b>2,0</b>	5,5	1,1	57	4	<b>35</b>	75	12	34
113	0,2	<b>2,5</b>	6,5	1,1	43	6	<b>41</b>	70	13	32
	0,4	<b>1,6</b>	7,5	1,1	67	5	<b>42</b>	94	14	35
111	0,3	<b>2,0</b>	5,3	1,2	61	4	<b>35</b>	77	13	38
	0,3	<b>2,2</b>	6,5	1,3	58	4	<b>39</b>	75	15	37
108	0,5	<b>2,4</b>	4,9	0,9	38	2	<b>34</b>	93	13	38
	0,4	<b>2,0</b>	6,4	1,1	52	2	<b>36</b>	67	12	33
113	0,4	<b>2,6</b>	7,8	1,6	60	3	<b>41</b>	68	15	36
	0,3	<b>1,7</b>	5,1	1,1	65	4	<b>37</b>	69	14	38
117	0,4	<b>2,7</b>	6,8	1,3	49	3	<b>48</b>	86	16	33
	0,4	<b>1,6</b>	6,0	1,0	60	4	<b>39</b>	75	15	37
112	0,2	<b>2,6</b>	6,7	1,1	42	3	<b>38</b>	75	13	36
	0,5	<b>1,7</b>	7,7	1,1	62	3	<b>45</b>	75	13	30
109	0,6	<b>2,6</b>	5,8	1,1	40	6	<b>36</b>	67	12	34
	0,6	<b>1,9</b>	5,3	0,9	46	9	<b>39</b>	64	11	29

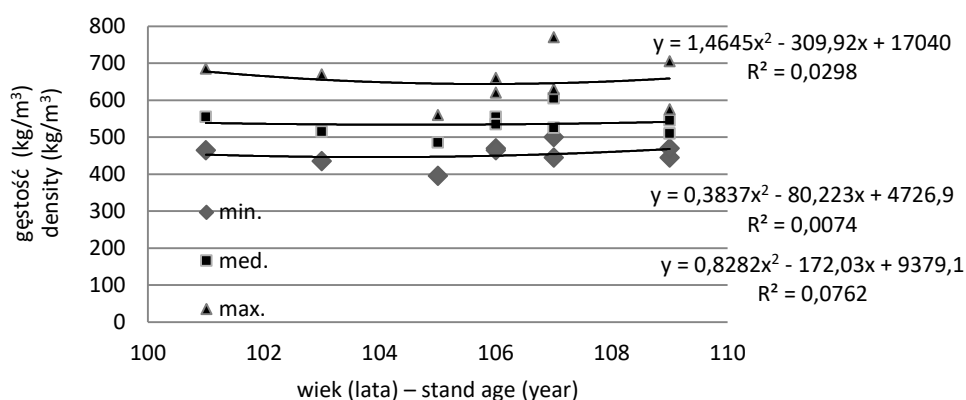
### Zestawienie wyników dla III powierzchni badawczej – Nadleśnictwo Borne Sulinowo

Z terenu Nadleśnictwa Borne Sulinowo pozyskano do badań drzewa modelowe w wieku od 101 do 109 lat o średnicach bez kory od 402,8 mm do 463,4 mm i udziale twardzieli na przekroju poprzecznym pnia od 32% do 64% (tab. 8). Średnia gęstość drewna poszczególnych drzew (ryc. 17) wyniosła od 490 kg/m<sup>3</sup> do 550 kg/m<sup>3</sup>.



Ryc. 16. Zmiana struktury przyrostów rocznych dla surowca z II powierzchni badawczej  
Fig. 16. Changes in the structure of annual increments for pine timber from experimental site II

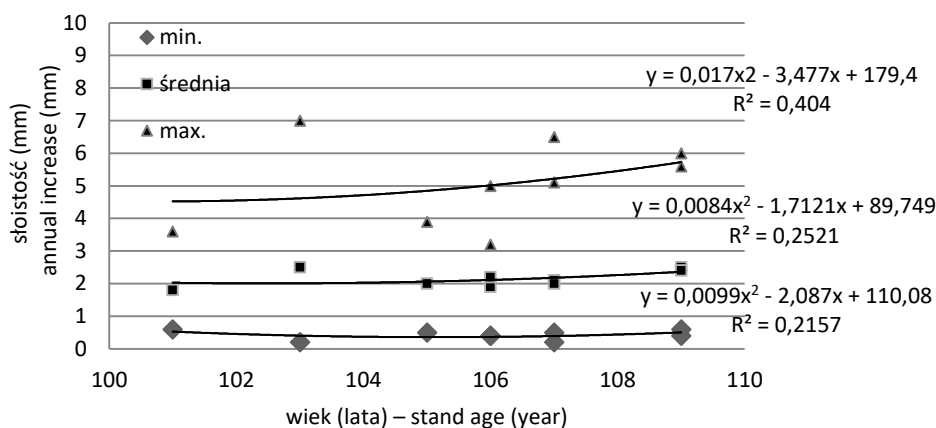
Analizując długości promieni południowych oraz północnych w obrębie przekroju poprzecznego poszczególnych drzew, można stwierdzić, że różnice w ich długościach zawierały się w przedziale od 10 mm do 100 mm, co wskazuje na występowanie mimośrodowości rdzenia w niektórych drzewach. Potwierdzeniem tego są również wartości średnich szerokości przyrostów rocznych promieni południowych i północnych w obrębie drzewa. Nie potwierdzono korelacji parametrów wieku i gęstości drewna w badanym przedziale wieku.



Ryc. 17. Zmiana struktury gęstości drewna dla surowca sosnowego z III powierzchni badawczej  
Fig. 17. Changes in wood density structure for pine timber from experimental site III

Tabela 8. Zestawienie charakterystyki drzew z III powierzchni badawczej – Borne Sulinowo  
Table 8. Characteristics of trees from the experimental site III – Borne Sulinowo

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Średnica Drzewa Diameter (mm)	Średnia gęstość drewna Average wood density (kg/m³)	Gęstość drewna na długości promienia Wood density along the radius (kg/m³)					Długość promienia Radius length (mm)	Udział twardej części na średnicy Share of heartwood (%)
			min.	średnia average	max.	±S	V (%)		
106	455,7	540	465	535	630	58	11	255,2	49
			470	555	660	76	14	201,3	
103	445,2	515	435	515	670	74	14	261,6	39
			440	510	645	79	15	183,6	
101	449,5	520	435	485	520	32	7	256,5	46
			465	555	685	90	16	184,0	
107	402,8	535	445	525	630	66	12	212,2	47
			455	540	605	63	12	190,6	
109	440,7	535	445	545	705	92	17	267,5	50
			365	520	660	130	25	173,2	
109	463,4	500	470	510	575	33	7	259,2	32
			415	485	585	54	11	204,2	
105	405,1	490	395	485	560	55	11	209,1	56
			440	495	540	35	7	196,0	
106	429,2	550	465	535	620	57	11	235,6	50
			475	560	640	78	14	193,6	
107	415,6	500	500	605	770	93	15	227,0	64
			495	550	690	63	11	188,6	



Ryc. 18. Zmiana struktury przyrostów rocznych dla surowca sosnowego z III powierzchni badawczej  
Fig. 18. Changes in the structure of annual increments for pine timber from experimental site III

Struktura wymiarowa przyrostów rocznych wahała się w przedziale wartości średnich 1,8-2,5 mm (tab. 9). Przy wzroście wieku drzew nie wzrastała średnia wielkość przyrostu rocznego, co potwierdza brak skorelowania gęstości z wiekiem surowca (ryc. 18).

Tabela 9. Zestawienie charakterystyki drzew z III powierzchni badawczej – Borne Sulinowo  
Table 9. Characteristics of trees from the experimental site III – Borne Sulinowo

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Szerokość przyrostu rocznego na długości promienia Width of annual growth over the radius (mm)					Udział drewna późnego w przyroście rocznym na długości promienia Share of late wood in annual growth over the radius (%)				
	min	średnia average	max	±S	V (%)	min	średnia average	max	±S	V (%)
106	0,3	<b>2,4</b>	4,0	0,8	31,6	10	<b>37</b>	65	12	32
	0,4	<b>1,9</b>	3,2	0,6	30,1	6	<b>35</b>	64	11	32
103	0,2	<b>2,5</b>	7,0	1,2	46,5	5	<b>33</b>	88	13	40
	0,4	<b>1,8</b>	4,5	0,9	48,0	6	<b>32</b>	69	13	42
101	0,7	<b>2,5</b>	6,3	1,1	43,2	7	<b>32</b>	72	12	37
	0,6	<b>1,8</b>	3,6	0,6	33,9	9	<b>36</b>	80	13	35
107	0,5	<b>2,0</b>	5,1	0,9	47,6	12	<b>38</b>	60	11	29
	0,5	<b>1,8</b>	4,5	0,6	35,6	10	<b>36</b>	60	10	29
109	0,6	<b>2,5</b>	5,6	0,8	34,6	4	<b>32</b>	65	12	37
	0,4	<b>1,6</b>	3,5	0,6	35,6	4	<b>33</b>	62	11	37
109	0,4	<b>2,4</b>	6,0	1,0	43,0	6	<b>36</b>	70	12	34
	0,6	<b>1,9</b>	4,2	0,9	45,7	7	<b>33</b>	64	12	36
105	0,5	<b>2,0</b>	3,9	0,7	36,9	9	<b>32</b>	76	12	37
	0,3	<b>1,9</b>	3,5	0,7	38,3	9	<b>34</b>	63	11	32
106	0,4	<b>2,2</b>	5,0	0,9	42,4	9	<b>40</b>	83	16	39
	0,3	<b>1,8</b>	5,0	1,0	57,3	6	<b>39</b>	70	14	35
107	0,2	<b>2,1</b>	6,5	1,2	56,3	6	<b>35</b>	71	15	43
	0,4	<b>1,8</b>	5,5	1,0	58,3	8	<b>42</b>	83	15	36

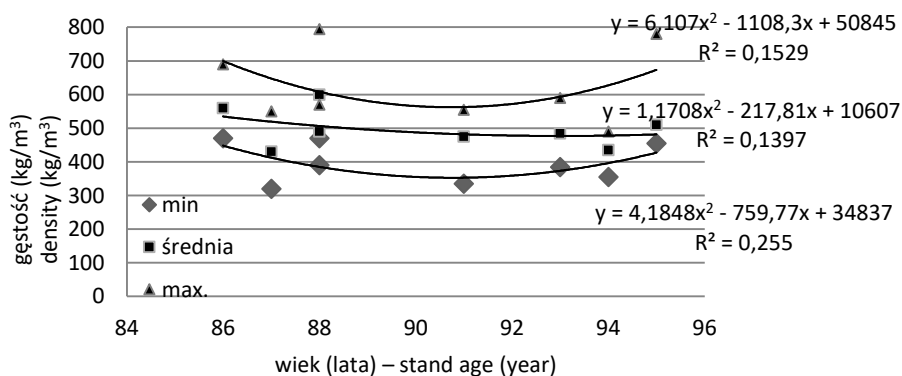


### Zestawienie wyników dla IV powierzchni badawczej – Nadleśnictwo Sulechów

Drzewa modelowe pochodzące z Nadleśnictwa Sulechów (tab. 10 i 11) charakteryzowały się średnicami, nieprzekraczającymi 500 mm i wiekiem w przedziale 80-100 lat. Udział twardzieli na przekroju poprzecznym pnia w każdym z badanych drzew przekraczał 50%, a średnia wartość to 60%. Średnia gęstość drewna poszczególnych drzew modelowych wynosiła od 450 kg/m<sup>3</sup> do 605 kg/m<sup>3</sup>.

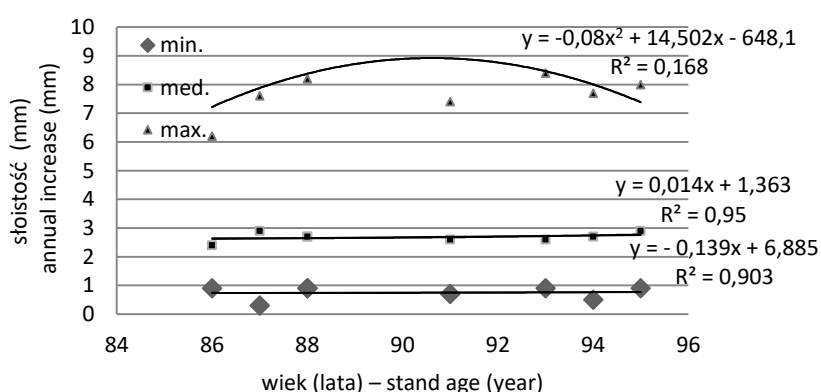
Tabela 10. Zestawienie charakterystyki drzew z IV powierzchni badawczej – Sulechów  
Table 10. Characteristics of trees from the experimental site IV – Sulechów

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Średnica Drzewa Diameter (mm)	Średnia gęstość drewna Average wood density (kg/m <sup>3</sup> )	Gęstość drewna na długości promienia Wood density along the radius (kg/m <sup>3</sup> )					Długość promienia Radius length (mm)	Udział twardzieli na średnicy Share of heart-wood (%)
			min	średnia average	max	±S	V (%)		
95	472,8	515	455	510	780	36	7	272,4	57
			490	520	565	28	5	200,4	
91	436,5	470	335	475	555	74	15	233,4	59
			335	470	570	84	17	203,1	
94	453,6	450	355	435	490	40	9	250,0	61
			355	470	555	66	14	203,6	
93	406,4	485	385	485	590	71	15	242,2	63
			395	485	545	50	10	164,2	
88	466,4	605	470	600	795	92	15	234,8	64
			500	605	785	95	15	231,6	
86	408,9	560	470	560	690	79	14	209,0	60
			470	560	720	93	16	199,9	
87	432,9	460	320	430	550	90	20	253,2	62
			430	490	520	26	5	179,7	
88	407,6	475	390	490	570	50	10	239,1	56
			370	460	505	50	10	168,5	



Ryc. 19. Zmiana struktury gęstości drewna dla surowca sosnowego z IV powierzchni badawczej  
Fig. 19. Changes in wood density structure for pine timber from experimental site IV

W większości badanych drzew średnie gęstości na długości promienia były zbliżone (ryc. 19), tylko w kilku różnice przekroczyły 30 kg/m<sup>3</sup>. Różnice w długościach promieni południowego i północnego przekroju poprzecznego w połowie drzew wynosiły ponad 70 mm, co znalazło odzwierciedlenie w różnicach średniej szerokości przyrostów rocznych, które wyniosły 0,8 mm. Analizując udziały drewna późnego w przyrostach rocznych, zarówno średnie ich wartości, jak i maksymalne, wyraźnie zaobserwowano występowanie i wpływ tkanki naciskowej (twardzicy).



Ryc. 20. Zmiana struktury przyrostów rocznych dla surowca sosnowego z IV powierzchni badawczej  
Fig. 20. Changes in the structure of annual increments for pine timber from experimental site IV

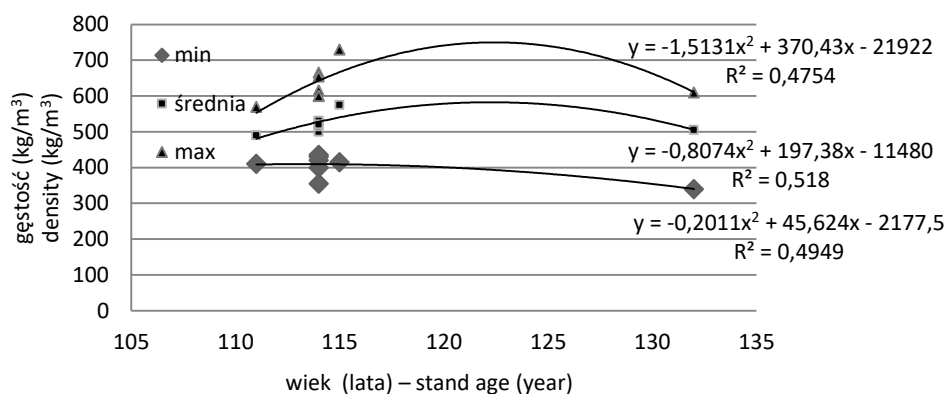
Tabela 11. Zestawienie charakterystyki drzew z IV powierzchni badawczej – Sulechów  
Table 11. Characteristics of trees from the experimental site IV – Sulechów

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Szerokość przyrostu rocznego na długości promienia Width of annual growth over the radius (mm)					Udział drewna późnego w przyroście rocznym na długości promienia Share of late wood in annual growth over the radius (%)				
	min	średnia average	max	±S	V (%)	min	średnia average	max	±S	V (%)
95	0,9	<b>2,9</b>	8,0	1,6	56	5	<b>36</b>	93	16	44
	0,4	<b>2,1</b>	7,8	1,4	65	4	<b>41</b>	93	14	35
91	0,7	<b>2,6</b>	7,4	1,5	58	4	<b>37</b>	89	14	35
	0,6	<b>2,2</b>	7,0	1,3	58	6	<b>38</b>	89	13	33
94	0,5	<b>2,7</b>	7,7	1,1	42	9	<b>31</b>	88	12	39
	0,4	<b>2,2</b>	7,7	1,2	55	3	<b>33</b>	88	15	45
93	0,9	<b>2,6</b>	8,4	1,1	41	5	<b>31</b>	74	12	38
	0,4	<b>1,8</b>	6,6	1,0	58	6	<b>38</b>	78	12	33
88	0,9	<b>2,7</b>	11,1	1,6	59	19	<b>46</b>	91	14	30
	1,3	<b>2,6</b>	8,0	1,3	48	10	<b>40</b>	91	13	32
86	0,9	<b>2,4</b>	6,2	1,0	42	5	<b>40</b>	81	13	33
	0,5	<b>2,3</b>	8,7	1,2	52	6	<b>43</b>	81	13	30
87	0,3	<b>2,9</b>	7,6	1,3	44	7	<b>36</b>	76	12	35
	0,3	<b>2,1</b>	7,6	1,7	82	6	<b>35</b>	76	11	32
88	0,9	<b>2,7</b>	8,2	1,5	53	14	<b>41</b>	86	12	28
	0,4	<b>1,9</b>	8,2	1,3	69	10	<b>37</b>	86	14	36

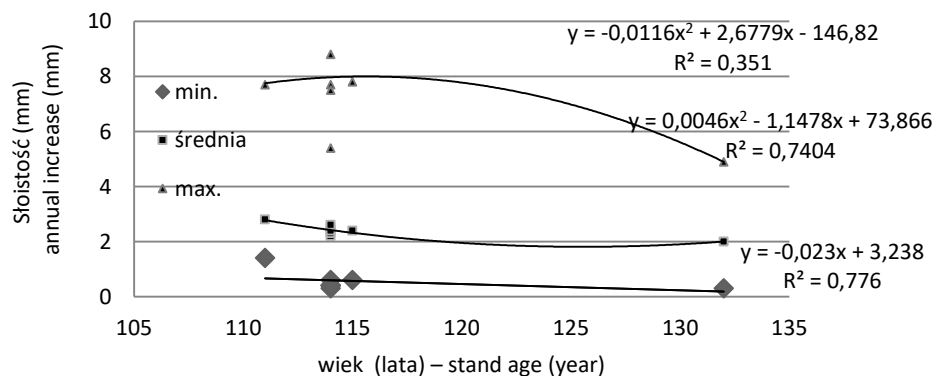
Rozkład szerokości przyrostów rocznych charakteryzował się zbliżonym poziomem dla wartości średnich (ryc. 20), a zarazem wskazano na udział drewna reakcyjnego w przypadku znaczącego udziału drewna późnego.

#### Zestawienie wyników dla V powierzchni badawczej – Nadleśnictwo Iława

W tabelach 12 i 13 przedstawiono dane dotyczące charakterystyki drzew modelowych z Nadleśnictwa Iława. Wiek drzew pozyskanych z tego obszaru wynosił 111-132 lat. Podobnie jak w nadleśnictwie Barlinek nie można jednoznacznie skorelować wieku drzew i ich średnicy, bowiem najstarsze drzewo (132 lata) posiadało średnicę niższą w stosunku do sztuki w wieku 114 lat (560 mm). Średnie gęstości drzew zawierały się w przedziale 495-555 kg/m<sup>3</sup>. Średnie gęstości na długości promieni południowych i północnych w obrębie jednego drzewa różnią się maksymalnie o 40 kg/m<sup>3</sup>. W obrębie analizowanych drzew wystąpiła mimośrodowość rdzenia o maksymalnej wartości 110 mm, przy czym ma to wyłącznie odzwierciedlenie w szerokości przyrostów rocznych i udziale w ich drewna późnego, co związane jest w występowaniem tkanki reakcyjnej. Udział twardzieli zabarwionej na przekroju poprzecznym pnia wynosił ponad 50% we wszystkich analizowanych drzewach.



Ryc. 21. Zmiana struktury gęstości drewna dla surowca sosnowego z V powierzchni badawczej  
Fig. 21. Changes in wood density structure for pine timber from experimental site V



Ryc. 22. Zmiana struktury przyrostów rocznych dla surowca sosnowego z V powierzchni badawczej  
Fig. 22. Changes in the structure of annual increments for pine timber from experimental site V

Tabela 12. Zestawienie charakterystyki drzew z V powierzchni badawczej – Ilawa  
Table 12. Characteristics of trees from the experimental site V – Ilawa

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Średnica Drzewa Diameter (mm)	Średnia gęstość drewna Average wood density (kg/m <sup>3</sup> )	Gęstość drewna na długości promienia Wood density along the radius (kg/m <sup>3</sup> )					Długość promienia The radius length (mm)	Udział twardej części na długości średnicy Share of heartwood (%)
			min	średnia average	max	±S	V (%)		
114	539,0	505	420	505	555	46	9	282,7	55
			400	500	615	76	15	256,3	
111	516,9	495	410	490	570	59	12	313,0	62
			415	495	580	66	13	203,9	
114	526,0	535	450	535	660	78	15	263,4	65
			430	530	665	77	14	262,6	
114	560,4	515	420	530	655	84	16	315,1	55
			345	495	620	106	22	245,3	
114	496,0	515	355	515	600	84	16	273,6	71
			360	515	590	69	13	222,4	
115	485,4	555	415	575	730	115	20	274,0	63
			425	535	690	105	20	211,4	
114	518,3	525	435	520	600	58	11	297,9	65
			435	530	655	73	14	220,4	
132	471,8	495	340	505	610	82	16	258,8	63
			355	480	550	71	15	213,0	

Tabela 13. Zestawienie charakterystyki drzew z V powierzchni badawczej – Ilawa  
Table 13. Characteristics of trees from the experimental site V – Ilawa

Wiek drzewa (lata) Tree age (years)	Szerokość przyrostu rocznego na długości promienia Width of annual growth over the radius (mm)					Udział drewna późnego w przyroście rocznym na długości promienia Share of late wood in annual growth over the radius (%)				
	min	średnia average	max	±S	V (%)	min	średnia average	max	±S	V (%)
114	0,6	<b>2,5</b>	7,0	1,0	39	2	<b>31</b>	62	11	36
	0,4	<b>2,2</b>	5,4	0,9	42	5	<b>31</b>	60	11	37
111	1,4	<b>2,8</b>	7,7	1,2	43	2	<b>36</b>	67	13	36
	0,4	<b>1,8</b>	6,9	1,2	63	2	<b>29</b>	53	12	41
114	0,5	<b>2,3</b>	6,5	1,2	51	2	<b>32</b>	63	12	37
	0,4	<b>2,3</b>	7,7	1,3	54	7	<b>31</b>	69	11	36
114	0,6	<b>2,5</b>	7,5	1,2	44	6	<b>36</b>	66	12	34
	0,5	<b>2,2</b>	5,7	1,1	48	6	<b>35</b>	75	12	34
114	0,3	<b>2,4</b>	8,8	1,7	70	6	<b>42</b>	70	14	34
	0,3	<b>2,0</b>	7,3	1,4	69	7	<b>40</b>	92	15	38
115	0,6	<b>2,4</b>	7,8	1,3	55	7	<b>36</b>	63	13	36
	0,6	<b>1,8</b>	8,0	1,1	60	7	<b>33</b>	70	12	36
114	0,4	<b>2,6</b>	10,7	2,0	75	3	<b>31</b>	68	13	41
	0,4	<b>1,9</b>	8,1	1,3	67	4	<b>33</b>	58	12	35
132	0,3	<b>2,0</b>	4,9	0,9	47	8	<b>27</b>	67	11	42
	0,4	<b>1,6</b>	4,0	0,8	47	9	<b>31</b>	67	11	37

Wskazane w tabeli 13 i na rycinie 22 wielkości przyrostów rocznych i udział drewna późnego prezentują wartości średnie dostosowane do poziomu tarcicy o dobrych parametrach jakościowych. Na uwagę zasługuje znaczny poziom wariancji dla badanych udziałów drewna późnego osiągający 42%.

Surowiec sosnowy z terenów Polski Zachodniej został scharakteryzowany poprzez zbiorcze zestawienie zmienności rozkładu wartości średnich gęstości drewna (tab. 14). W wyniku pomiarów uzyskano wskaźniki świadczące o dojrzałości drzewostanów skierowanych do badania oraz o porównywalnej gęstości drewna sosny zwyczajnej, która osiągała wartość  $500 \text{ kg/m}^3$ . W ogólnym procesie weryfikacji wartości średnich pomiarów przyrostów rocznych nie przekroczyły one 2,5 mm, a udział drewna późnego określony na próbkach modelowych kształtował się na poziomie 33-39%.

Analizując wyniki zawarte w tabeli 14, należy zauważyć, że najstarsze drzewostany reprezentowały Nadleśnictwo Barlinek oraz Iława (ponad 115 lat), natomiast najmłodsze Nadleśnictwo Sulechów. Jednakże wiek drzewostanów nie jest bezpośrednio związany z osiąganą przez nie średnicą strzał. Największymi średnimi średnicami (ponad 500 mm) charakteryzowały się drzewa z Nadleśnictwa Iława. Pozostałe drzewostany charakteryzowały się pierśnicą w przedziale 434 mm (dla najmłodszych) do 488 mm w przypadku porównywalnych wiekowo drzewostanów z powierzchni I i II.

Tabela 14. Zbiorcza zestawienie charakterystyki drzew z badanych nadleśnictw  
Table 14. Summary list of trees characteristics from forest district

Nadleśnictwo Forest District	Wiek drzew (lata) Tree age (years)	Średnica Diameter (mm)	Udział twar- dzieli Share of heartwood (%)	Średnia gęstość drewna Average wood densi- ty ( $\text{kg/m}^3$ )	Średnia szerokość przyrostu rocznego Annual increase width over the radius (mm)	Udział drewna późnego w przy- roście rocznym Share of late wood in annual growth on the radius (%)
Barlinek	117	470	52	555	2,2	35
Człuchów	112	488	60	530	2,1	39
Borne Sulino- nowo	106	434	48	520	2,1	35
Sulechów	90	435	60	500	2,4	37
Iława	116	514	62	515	2,1	33

Surowiec który pozyskano z powierzchni V, miał średnią gęstość drewna ( $515 \text{ kg/m}^3$ ) o  $40 \text{ kg/m}^3$  niższą od średniej gęstości dla drewna z powierzchni I mimo zbliżonego wieku. Najniższą średnią gęstość ( $500 \text{ kg/m}^3$ ) miały drzewa najmłodsze (90 lat) z Nadleśnictwa Sulechów. Średnie gęstości badanego materiału odpowiadają danym literaturowym dla sosny (Krzysik, 1974; Giefing i Jabłoński, 1989; Krzosek, 1998b; Kokociński, 2002; Fabisiak, 2005; Wagenführ, 2007). Ponad 50-procentowy udział twardej tarczy na przekroju poprzecznym pnia występuje w drewnie pozyskanym z nadleśnictw: Barlinek, Sulechów, Człuchów i Iława, natomiast w drewnie z Nadleśnictwa Borne Sulino-  
nowo

zauważalna jest znaczna zmienność tego parametru. Zdecydowanie pozytywne wyniki potwierdzono w zakresie średniej szerokości przyrostów rocznych dla drzew z poszczególnych nadleśnictw, które są zbliżone i wynoszą od 2,1 mm dla Nadleśnictwa Hława, Człuchów i Borne Sulinowo do 2,4 mm dla Nadleśnictwa Sulechów. Świadczy to o tendencji do wąskosłoistości przekładającej się na uzyskanie drewna o znacznej wytrzymałości.

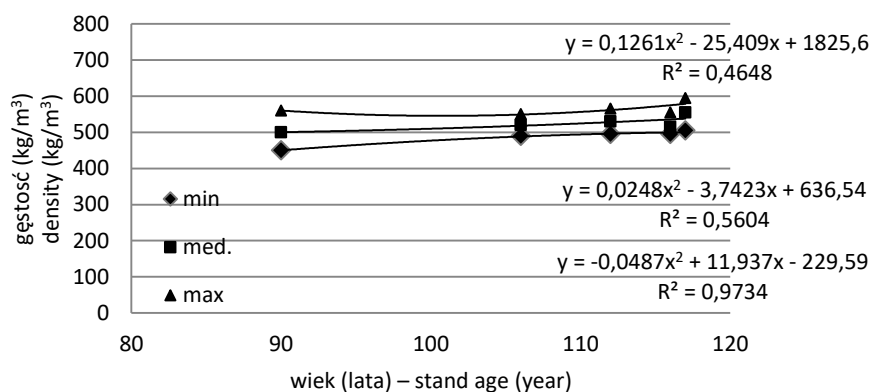
Wyniki tak zaprezentowanych badań, świadczą o niewielkim zróżnicowaniu średniej szerokości przyrostów rocznych w badanym drewnie z drzewostanów sosnowych. Największe różnice zanotowano podczas badań próbek w strefie rdzeniowych. Wyższe wartości przyrostów rocznych dla próbek rdzeniowych są zjawiskiem normalnym, gdyż szerokość słoju zmniejsza się ku obwodowi pnia. Dlatego słoje roczne zewnętrzne są węższe od słoju przyrdzeniowych (Krzysik, 1978; Białobok, 1993; Kokociński, 2002; Fabisiak i Moliński, 2009).

Podczas badań oznaczono także udział drewna późnego na szerokości słoja rocznego. Większy udział drewna późnego wpływa korzystnie na podwyższenie właściwości wytrzymałościowych drewna. Jednakże w drewnie sosny, podobnie jak u innych gatunków iglastych, ze wzrostem cienkościennego drewna wczesnego wzrasta nieznacznie szerokość strefy drewna późnego. Stąd w drewnie wąskosłoistym proporcja drewna późnego do wczesnego jest korzystniejsza. Udział drewna późnego w drewnie gatunków iglastych ma wpływ na właściwości mechaniczne drewna, co potwierdzono w licznych badaniach dla drewna pochodzącego z polskich drzewostanów (Krzysik, 1978; Połubojarinow, 1976; Pazdrowski i Spława-Neyman, 1996; Moliński i Krauss, 2008). Z analizy wyników badań udziału drewna późnego w przyrostach rocznych sosny pospolitej pochodzącej z badanych powierzchni wynika, że otrzymane średnie udziału drewna późnego (35-39%) przekraczają wartości reprezentujące dane literaturowe, które wynoszą dla drzew iglastych w Polsce od 5% do 35% (Krzysik, 1978; Sell, 1989; Farruggia i Perre, 2000; Fabisiak i in., 2007). Udział ten może świadczyć o potencjalnie wyższych właściwościach wytrzymałościowych drewna pochodzącego z badanych dzielnic przyrodniczo-leśnych. Powodem tak kształtującego się udziału drewna późnego jest występowanie przewagi drewna dojrzałego na przekroju. W miarę oddalania się ku obwodowi udział drewna późnego rośnie (Krzysik, 1978; Fabisiak i Moliński, 2009).

### 5.3.3. Gęstość drewna

Gęstość to jedna z podstawowych cech fizycznych drewna, która powiązana z jego strukturą obrazuje właściwości mechaniczne drewna. W oparciu o ustalone w metodyce badań metody pomiaru gęstości dokonano zestawienia wyników dla próbek wielkowieściowych, co ukazuje zestawienie na rycinie 23.

Z analizy danych zamieszczonych na rycinie wynika, że średnia gęstość dla wszystkich elementów wynosiła  $560 \text{ kg/m}^3$ . Gęstość drewna z badanego surowca wahała się w granicach od  $424 \text{ kg/m}^3$  do  $725 \text{ kg/m}^3$  dla całego przekroju badanego surowca przy odniesieniu do wilgotności 12%.



Ryc. 23. Uśrednione gęstości próbek w skali wieku drzew sosnowych  
Fig. 23. Average density of samples on the age scale of pine trees

Wyniki badań gęstości drewna sosny podano w tabeli 15. Wartości liczbowe zostały poddane przeliczeniu dla wilgotności odniesienia równej 12% (PN-EN 384:2018). Liczba próbek w próbie była równa lub większa od 40, zgodnie z PN-EN 384. Uzyskane wyniki wskazują, że drewno sosny zwyczajnej pozyskane w granicach Nadleśnictwa Człuchów charakteryzowało się średnią gęstością 551 kg/m<sup>3</sup>. Natomiast próbki przyobwodowe wykonane z drewna o tym samym pochodzeniu wykazywały się średnią gęstością 552 kg/m<sup>3</sup>. Zatem drewno strefy przyobwodowej na tej samej bazie surowca sosnowego wykazywało zbliżoną gęstość. Uzyskane wyniki wskazują, że drewno sosny zwyczajnej pozyskane w granicach Nadleśnictwa Barlinek charakteryzowało się średnią gęstością 566 kg/m<sup>3</sup>. Klejone elementy konstrukcyjne wykonane z tarcicy bocznej o tym samym pochodzeniu wykazywały średnią gęstość 571 kg/m<sup>3</sup>. Zatem drewno modyfikowane na bazie surowca sosnowego wykazywało zbliżoną gęstość średnią (różnica 5 kg/m<sup>3</sup>).

Uzyskane wyniki wskazują, że drewno sosny zwyczajnej pozyskane w granicach Nadleśnictwa Borne Sulinowo charakteryzowało się średnią gęstością 556 kg/m<sup>3</sup>. Klejone elementy wykonane z tarcicy bocznej o tym samym pochodzeniu wykazywały się średnią gęstością 543 kg/m<sup>3</sup>. Zatem drewno obstawy bocznej surowca sosnowego wykazywało zbliżoną gęstość średnią (różnica 13 kg/m<sup>3</sup>).

Uzyskane wyniki dla drewna sosny zwyczajnej pozyskane w granicach Nadleśnictwa Iława wskazują, że charakteryzowało się ono średnią gęstością 567 kg/m<sup>3</sup>. Elementy tarcicy bocznej wykonane z drewna o tym samym pochodzeniu wykazywały się średnią gęstością 563 kg/m<sup>3</sup>. Drewno sosny pozyskane w granicach Nadleśnictwa Sulechowo charakteryzowało się średnią gęstością 557 kg/m<sup>3</sup>, a elementy obstawy bocznej wykazywały się średnią gęstością 559 kg/m<sup>3</sup>. Zatem drewno na bazie tarcicy bocznej sosnowej wykazywało jednakową gęstość średnią.

Według danych literaturowych (Połubojarinow, 1976; Krzysik, 1978; Pazdrowski i Splawa-Neyman, 1996; Kokociński, 2004; Moliński i Krauss, 2008) średnia gęstość dla wilgotności odniesienia 12% u sosny kształtuje się na poziomie 510 kg/m<sup>3</sup>. Można stwierdzić, że gęstość badanego drewna sosny zwyczajnej jest nieco wyższa od przyjętych średnich wartości dla tego gatunku, jednak uzyskane wyniki w badanych drzewo-

stanach są bardzo zbieżne. Wyższa średnia gęstość badanego drewna sosny może wynikać z relatywnie wysokiego udziału drewna późnego w przyrostach rocznych.

Tabela 15. Uśrednione gęstości dla badanego surowca sosnowego w przeliczonej wilgotności 12%  
Table 15. Averaged densities for the studied pine raw material in converted humidity of 12%

Pochodzenie próbek z powierzchni The origin of samples from experimental site	Wartości przeciętne gęstości surowca Average value of raw material density (kg/m <sup>3</sup> )	
I – Barlinek	min	466
	średnia average	566
	max	661
II – Człuchów	min	466
	średnia average	551
	max	645
III – Borne Sulinowo	min	502
	średnia average	556
	max	697
IV – Sulechów	min	424
	średnia average	557
	max	661
V – Iława	min	425
	średnia average	567
	max	725

Drewno z części centralnej badanych dłużyc wykazywało zróżnicowaną gęstość w zależności od miejsca pochodzenia na przekroju poprzecznym pnia. Badania wykazały, że próbki pozyskane ze strefy rdzeniowej odznaczają się wysoką gęstością na poziomie około 540 kg/m<sup>3</sup>. Fakt ten można tłumaczyć występowaniem niewielkiego udziału drewna młodocianego (Vacchiano i in., 2008; Fabisiak i Moliński, 2009) w tej części pnia, które może wykazywać niższą gęstość. Z kolei próbki o usłojeniu promieniowym (bez zawartości miękiszu rdzeniowego) wykazywały gęstość średnią odpowiednio dla nadleśnictw Człuchów, Barlinek, Borne Sulinowo, Iława i Sulechów: 515, 556, 546, 564 i 564 kg/m<sup>3</sup>. Najwyższą gęstość osiągnęły elementy pozyskane z bocznej części kłody, o stycznym usłojeniu, uzyskując gęstości średnie: 549, 556, 579, 576 i 572 kg/m<sup>3</sup>.

Dla sosnowych elementów konstrukcyjnych wykonanych z drewna klejonego wartości gęstości wykazywały niewielkie zróżnicowanie w poszczególnych warstwach na pionowym przekroju poprzecznym.

Dokonując weryfikacji wytrzymałościowej surowca sosnowego, można odnieść uzyskane wyniki gęstości do ich zakresów według obowiązującej normy PN-EN 338 (tab. 2). Norma ta, wskazując minimalne wartości dopuszczalnej gęstości charakterystycznej oraz



średniej gęstości drewna w warunkach temperatury powietrza 20°C i jego wilgotności na poziomie 65%, pozwala na wstępną ocenę tarcicy w klasyfikacji wytrzymałościowej. Dla rozpatrywanych pięciu powierzchni badawczych materiały tarte z surowca sosnowego osiągały wskazania gęstości średniej, odpowiednie dla klasy wytrzymałości C45 i C50. Wartości dla gęstości minimalnych tego drewna, które zostały odniesione do gęstości charakterystycznej wymaganej w danej klasie wytrzymałości według wymagań PN-EN 338, osiągały wskazania przypisane dla klasy C40 (surowiec z IV i V powierzchni badawczej) i C50 (surowiec z I, II i III powierzchni badawczej). Potwierdzono tym samym wysokie walory techniczne drewna sosnowego, reprezentowane wskaźnikiem gęstości.

## 5.4. Właściwości mechaniczne próbek wielkowymiarowych

### 5.4.1. Moduł sprężystości przy zginaniu

Dla lepszego zobrazowania badań nieniszczących dokonanych na próbkach wielkowymiarowych pozyskanych z surowca sosnowego reprezentującego drzewostany w analizowanych rejonach Polski Zachodniej postanowiono uzyskane wyniki wartości modułów sprężystości zobrazować z podziałem rejonizacyjnym zaprezentowanym w dalszej części opracowania.

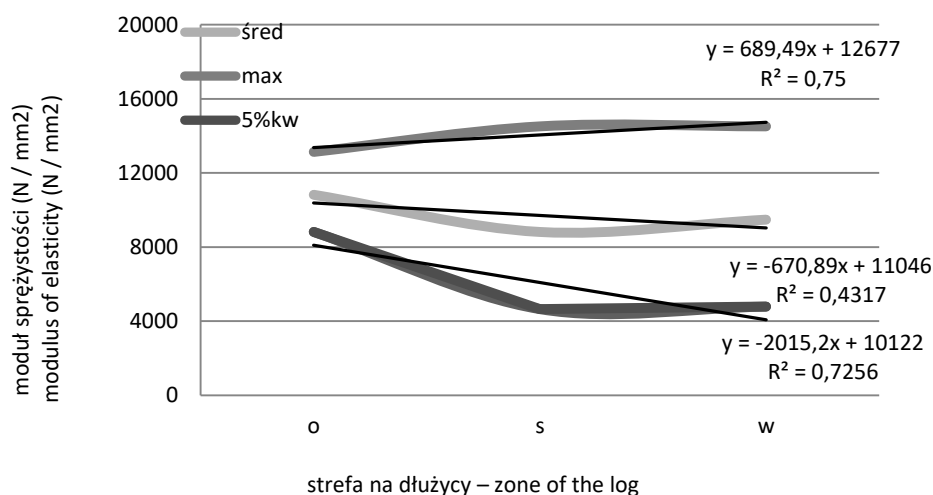
#### **Powierzchnia I – Nadleśnictwo Barlinek**

Moduł sprężystości jest jedną z głównych właściwości pozwalających na klasyfikację tarcicy konstrukcyjnej dla budownictwa drewnianego. Wyniki badań wytrzymałościowych przedstawione na rycinie 24 dotyczą elementów wielkowymiarowych z tarcicy bocznej. Analizując powyższe dane dla materiału z tarcicy bocznej drzew modelowych, stwierdzono, że największa wartość modułu sprężystości przy wilgotności 12% wyniosła 14 515 N/mm<sup>2</sup>, najniższa tylko 4661 N/mm<sup>2</sup>. Na rycinie zestawiono wyniki otrzymane w badaniu ze średnią dla grupy, która wyniosła 9434 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym na poziomie 2159 N/mm<sup>2</sup>.

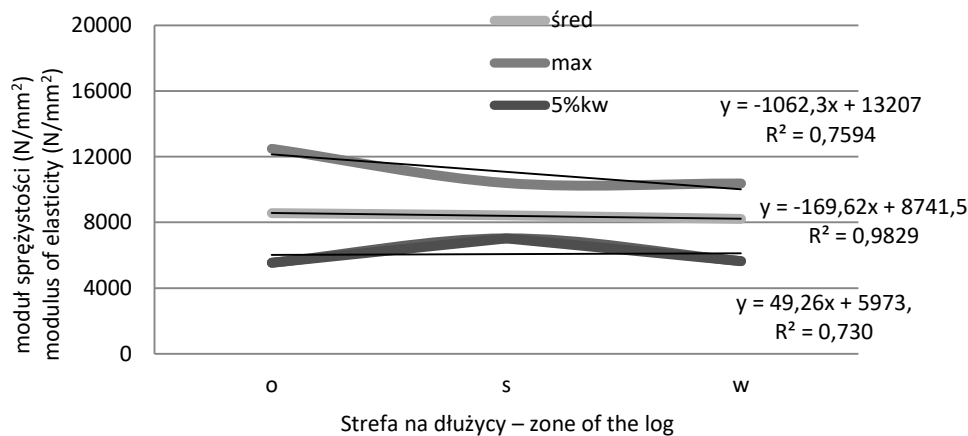
Najwyższą wartość średnią modułu sprężystości uzyskano dla wyrobów ze strefy odziomkowej 10 819 N/mm<sup>2</sup>, najniższą 8815 N/mm<sup>2</sup> w strefie środkowej. Średnia próbek litych ze strefy wierzchołkowej wyniosła 9478 N/mm<sup>2</sup> przy obliczonym odchyleniu standardowym na poziomie 1444 N/mm<sup>2</sup>.

Jak wynika z zestawienia na rycinie 25 obrazującej wyniki badań materiału strefy centralnej, wartości modułu sprężystości próbek o promieniowym układzie słoju rocznych wahały się od 5678 N/mm<sup>2</sup> do 12 797 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wszystkich próbek o takim układzie słoju wyniosła 8428 N/mm<sup>2</sup>.

Przebadane próbki charakteryzowało odchylenie standardowe na poziomie 1470 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 24. Porównanie modułu sprężystości próbek obstawy bocznej – Barlinek  
Fig. 24. Comparison of the modulus of elasticity of the side samples – Barlinek



Ryc. 25. Moduł sprężystości dla próbek promieniowych – Barlinek  
Fig. 25. Modulus of elasticity for radial samples – Barlinek

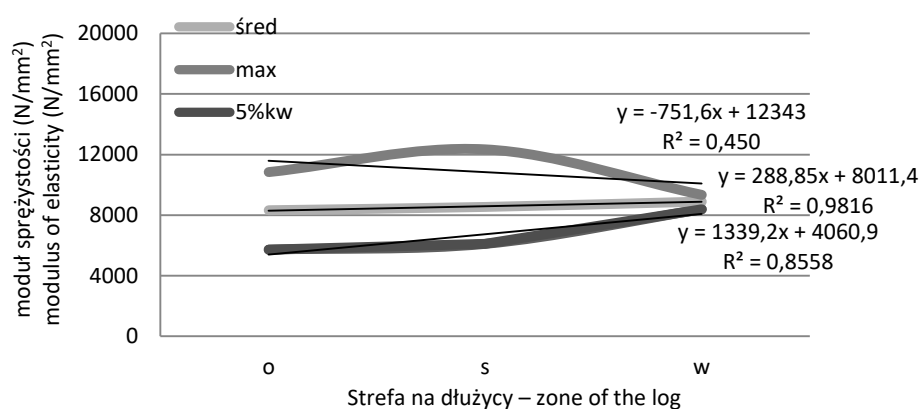
Wyniki badań zaprezentowane na rycinie 26 wskazują, że przebadane próbki o stycznym układzie słoików rocznych charakteryzowały się modułem sprężystości w przedziale od 5718 N/mm<sup>2</sup> do 12 340 N/mm<sup>2</sup>. Średnia dla elementów stycznych wyniosła 8544 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym sięgającym 1439 N/mm<sup>2</sup>.

Ryciny od 24 do 26 prezentujące wskaźniki dla elementów wielkowymiarowych z Nadleśnictwa Barlinek wskazują, że największy średni moduł sprężystości osiągnęły próbki o stycznym układzie słoików rocznych 8544 N/mm<sup>2</sup>, nieznacznie niższy wskaźnik 8428 N/mm<sup>2</sup> charakteryzował próbki o promieniowym przebiegu włókien.

Dla badanych belek litych strefy centralnej średnia wartość modułu kształtowała się na poziomie 8485 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1444 N/mm<sup>2</sup>.

Najniższą zmiennością modułu sprężystości cechował się surowiec badawczy pochodzący ze strefy wierzchołkowej, osiągając relatywnie zbliżone właściwości jak drewno ze stref odziomkowej i środkowej.

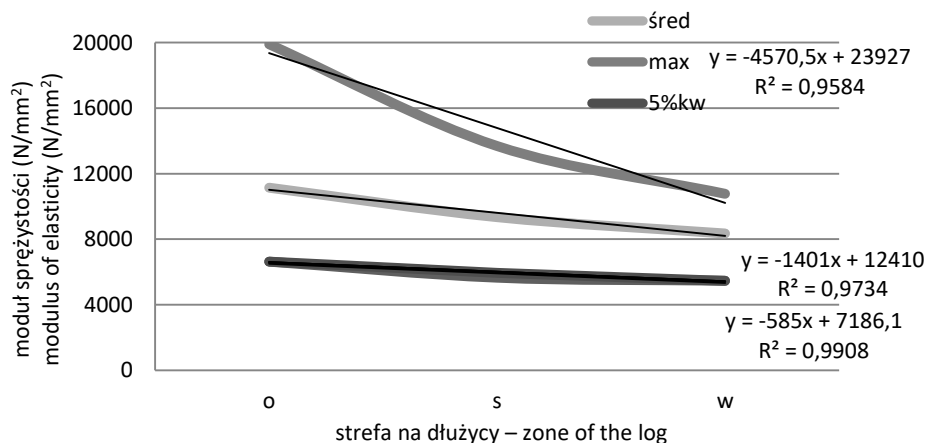
Wartości średnie dla wszystkich rozważanych stref były stabilne w przedziale 8323-8900 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 26. Moduł sprężystości dla próbek stycznych – Barlinek  
Fig. 26. Modulus of elasticity for tangential samples – Barlinek

#### Powierzchnia II – Nadleśnictwo Człuchów

Moduł sprężystości przedstawiony na rycinie 27 stanowi wynik badań przeprowadzonych na surowcu doświadczalnym z powierzchni II, pochodzącym z obstawy bocznej przeznaczonej do produkcji elementów klejonych.



Ryc. 27. Wyniki badań modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej – Człuchów  
Fig. 27. Comparison of the modulus of elasticity of the side samples – Człuchów

Analizując zaprezentowane na powyższej rycinie 27 wyniki, stwierdzono, że największą wartość modułu sprężystości wynoszącą 19 907 N/mm<sup>2</sup> osiągnęły próbki z surowca strefy odziomkowej, a najniższa wartość modułu wynosiła 5464 N/mm<sup>2</sup>. Był to moduł elementów ze strefy wierzchołkowej. Zaprezentowano wyniki otrzymane w badanej grupie tarczycy bocznej, pozwoliły na ustalenie średniego modułu, który wyniósł 9519 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1777 N/mm<sup>2</sup>. Przedstawione wartości dla próbek wielkowymiarowych zostały przeliczone dla założonej wilgotności 12%. Wykres krzywej modułów w zależności od pochodzenia długości dłużyć wskazuje na nieznaczny spadek modułu sprężystości dla badanego surowca ze stref środkowej oraz wierzchołkowej.

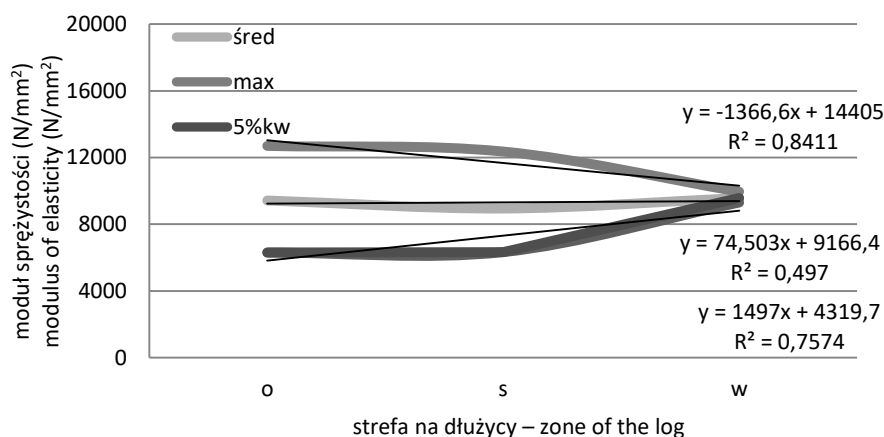
Najwyższą wartość modułu sprężystości wynoszącą 13 681 N/mm<sup>2</sup> uzyskano w trakcie badań próbek litych strefy centralnej o promieniowym przekroju przyrostów rocznych (ryc. 28), a najniższą 5174 N/mm<sup>2</sup> w próbkach ze strefy wierzchołkowej. Średni moduł sprężystości elementów litych wyniósł 8550 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1956 N/mm<sup>2</sup>. Na rycinie 28 przedstawiono krzywą obrazującą stopniowy spadek średnich wartości modułu poczynając od odziomkowej strefy dłużyć modelowych przy wartości 9400 N/mm<sup>2</sup> do strefy wierzchołkowej o module 8279 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 28. Moduł sprężystości dla próbek promieniowych – Człuchów  
Fig. 28. Modulus of elasticity for radial samples – Człuchów

Jak wynika z danych zaprezentowanych na rycinie 29, przebadane elementy styczne ze strefy centralnej charakteryzował moduł sprężystości w przedziale od 6306 N/mm<sup>2</sup> do 12 696 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wszystkich próbek o badanym przekroju stycznym wyniosła 9300 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym sięgającym 1843 N/mm<sup>2</sup>.

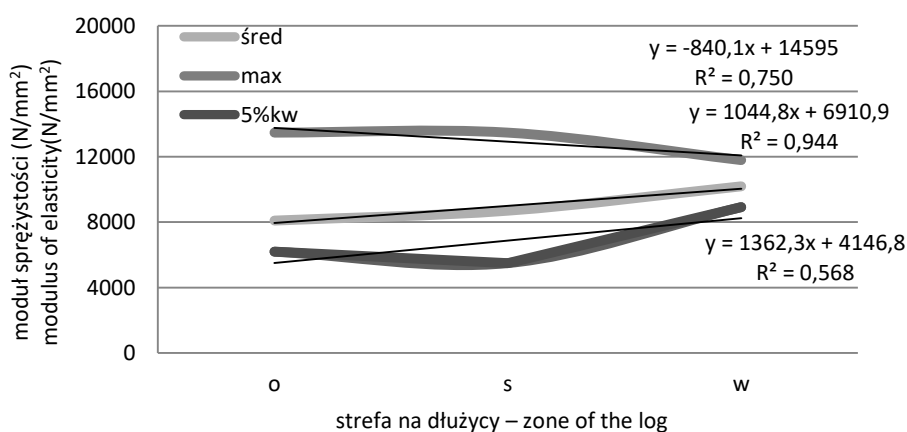
Analizując wyniki badań surowca z Nadleśnictwa Człuchów przedstawione na rycinach 28-29, stwierdzamy, że największy średni moduł sprężystości 9300 N/mm<sup>2</sup> wykazały elementy o stycznym układzie przyrostów rocznych, a najniższy (8291 N/mm<sup>2</sup>) próbki o promieniowym układzie przyrostów. Dla badanej rejonizacji średnia wartość modułu sprężystości kształtowała się na poziomie 8550 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1956 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 29. Moduł sprężystości dla próbek stycznych – Człuchów  
Fig. 29. Modulus of elasticity for tangential samples – Człuchów

### Powierzchnia III – Nadleśnictwo Borne Sulinowo

Moduł sprężystości drewna z powierzchni III zaprezentowano na rycinach 30-32. Wyniki przeprowadzonych badań dla próbek wielkowymiarowych z tarczy bocznej przedstawione na rycinie 30 wskazują, że średnia wartość modułu wyniosła 8779 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym na poziomie 2010 N/mm<sup>2</sup>. Przedstawione wyniki wskazują na tendencję wzrostu modułu sprężystości badanych próbek wraz z oddalaniem się od odziomka.



Ryc. 30. Porównanie modułu sprężystości próbek strefy przyobwodowej – Borne Sulinowo  
Fig. 30. Comparison of the modulus of elasticity of the side samples – Borne Sulinowo

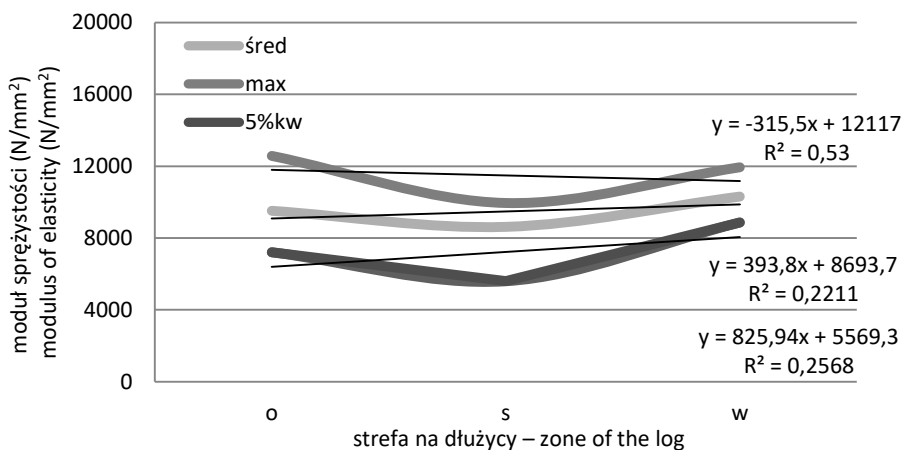
Analizując średnie wyniki modułu sprężystości zaprezentowane na rycinie 31, stwierdzono, że największą wartość (10 192 N/mm<sup>2</sup>) uzyskano w strefie wierzchołkowej, zaś najniższe wskazania prezentował surowiec ze strefy odziomkowej (8102 N/mm<sup>2</sup>).



Ryc. 31. Moduł sprężystości dla próbek promieniowych – Borne Sulinowo

Fig. 31. Modulus of elasticity for radial samples – Borne Sulinowo

Na rycinach 31 i 32 zaprezentowano wyniki badania surowca strefy centralnej przekroju poprzecznego. W wyniku badań próbek litych promieniowych (ryc. 31) określono maksymalną wartość modułu sprężystości wynoszącą 15794 N/mm<sup>2</sup> oraz wartość najniższą w strefie środkowej dłuźyc (5599 N/mm<sup>2</sup>). Średni moduł dla elementów promieniowych wyniósł 9642 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2052 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 32. Moduł sprężystości dla próbek stycznych – Borne Sulinowo

Fig. 32. Modulus of elasticity for tangential samples – Borne Sulinowo

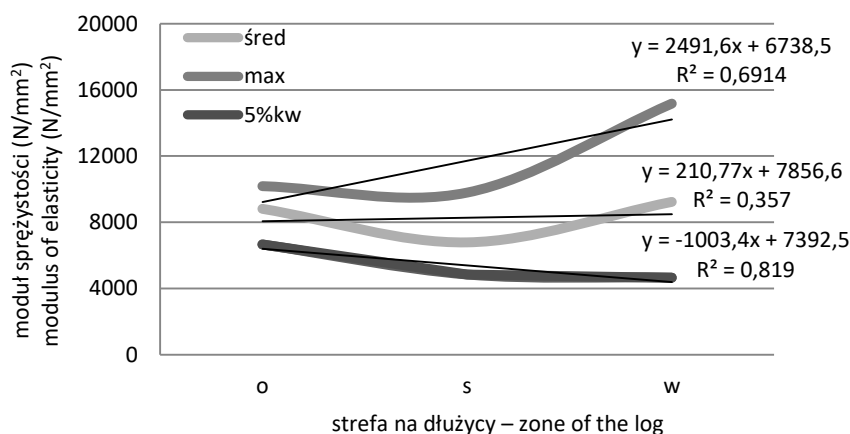
Wyniki zaprezentowane na rycinie 32 dotyczą próbek o stycznym przebiegu słołów rocznych i wskazują, że moduł sprężystości mieścił się w przedziale od 6554 N/mm<sup>2</sup> do 15 794 N/mm<sup>2</sup>. Średnia przebadanych próbek stycznych wyniosła 10 130 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2184 N/mm<sup>2</sup>.

Powyższe ryciny 31 i 32 prezentują wyniki surowca z drzew modelowych Nadleśnictwa Borne Sulinowo i wskazują, że najwyższy średni moduł sprężystości posiadały

próbki styczne 10130 N/mm<sup>2</sup>. Elementy promieniowe osiągnęły średni moduł 9154 N/mm<sup>2</sup>. Wielkość średniego modułu sprężystości badanych elementów litych strefy centralnej dla rejonizacji III kształtowała się na poziomie 9642 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2052 N/mm<sup>2</sup>.

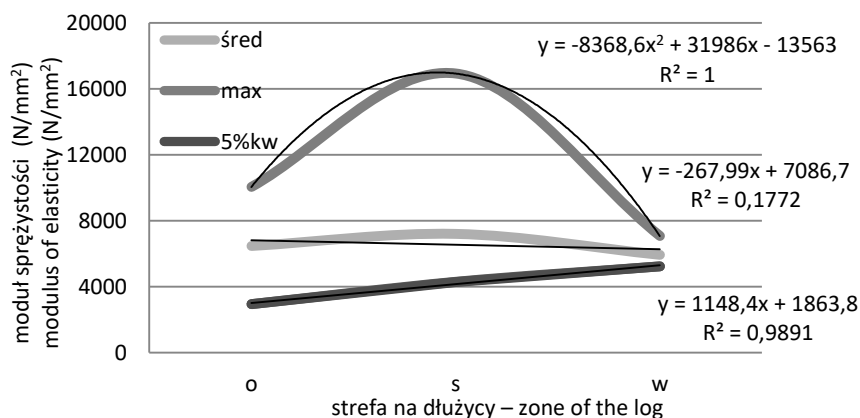
#### Powierzchnia IV – Nadleśnictwo Sulechów

Kolejne badania przeprowadzono na surowcu doświadczalnym z powierzchni IV, pochodzącym z różnych stref, na przekroju podłużnym i poprzecznym dźwicy modelowych. Wyniki badań próbek z tarczy bocznej przeznaczone na elementy klejone zaprezentowano na rycinie 33. Najwyższy rozrzut wartości modułu sprężystości osiągnęły elementy w strefie wierzchołkowej. Średnie wyniki modułu wynosiły 7888 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2257 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 33. Porównanie modułu sprężystości próbek strefy przyobwodowej – Sulechów  
Fig. 33. Comparison of the modulus of elasticity of the side samples – Sulechów

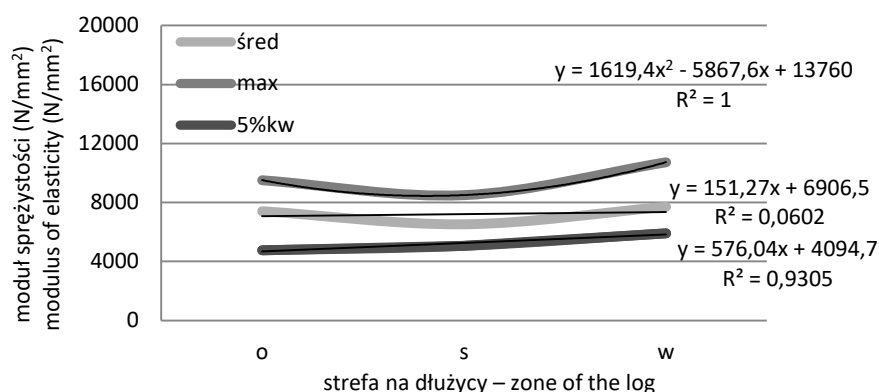
W badaniach próbek litych strefy centralnej dźwicy modelowych otrzymano wyniki zaprezentowane na rycinach 34 i 35.



Ryc. 34. Moduł sprężystości dla próbek promieniowych – Sulechów  
Fig. 34. Modulus of elasticity for radial samples – Sulechów

Na rycinie 34 przedstawiono zmienność modułu sprężystości próbek o przebiegu promieniowym, który wahał się od 4299 N/mm<sup>2</sup> do 16935 N/mm<sup>2</sup>. Średnia dla próbek o tym przekroju wyniosła 6942 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1397 N/mm<sup>2</sup>.

Moduł sprężystości dla próbek o przebiegu promieniowym (bez obecności rdzenia) osiągał poziom od 4494 N/mm<sup>2</sup> do 16935 N/mm<sup>2</sup>. Średnia próbek o takim przebiegu słoików wyniosła 7298 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2615 N/mm<sup>2</sup>. Cała partia próbek promieniowych osiągnęła średni moduł sprężystości 6452 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1473 N/mm<sup>2</sup>.



Ryc. 35. Moduł sprężystości dla próbek stycznych – Sulechów  
Fig. 35. Modulus of elasticity for tangential samples – Sulechów

Zaprezentowane na rycinie 35 wyniki modułu sprężystości próbek o stycznym przebiegu słoików rocznych mieściły się w przedziale od 4762 N/mm<sup>2</sup> do 10 731 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wartość modułu stycznych elementów wielkowymiarowych wyniosła 7084 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym na poziomie 1576 N/mm<sup>2</sup>. Stwierdzono rosnące wartości wytrzymałościowe próbek wraz z oddalaniem się od odziomka.

Analizując dane zaprezentowane na rycinach 34 do 35, stwierdzono, że średni moduł sprężystości 7084 N/mm<sup>2</sup> próbek stycznych jest zbliżony z modułem próbek promieniowych o wartości 7109 N/mm<sup>2</sup>. Wskazuje to na równomierny rozkład wytrzymałości drewna strefy centralnej pochodzącego z Nadleśnictwa Sulechów.

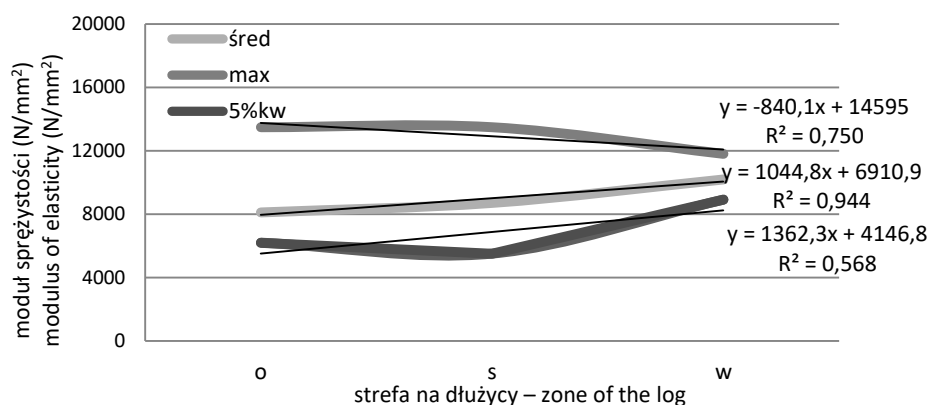
#### Powierzchnia V – Nadleśnictwo Ilawa

Na rycinie 36 zobrazowano wartości modułu sprężystości charakteryzujące elementy z tarcicy przyobwodowej pozyskane na powierzchni doświadczalnej z Nadleśnictwa Ilawa.

Stwierdzono największą zmienność wartości modułu sprężystości próbek strefy środkowej dłuźyc, które mieściły się w przedziale od 6155 N/mm<sup>2</sup> do 13 474 N/mm<sup>2</sup>. Zastawienie średnich wyników w badaniu dla surowca przyobwodowego osiąga wartość 10 526 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1777 N/mm<sup>2</sup>. Jednocześnie średnia wartość wskaźnika wytrzymałości materiału badawczego wzrastała wraz z oddalaniem się od odziomka.



Wyniki modułu sprężystości próbek promieniowych zaprezentowane na rycinie 37 wahały się od 5908 N/mm<sup>2</sup> do 12 448 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wartość modułu wyniosła 8400 N/mm<sup>2</sup>, a odchylenie standardowe kształtowało się na poziomie 1799 N/mm<sup>2</sup>. Zmienność średniego modułu sprężystości opisano funkcją  $y = -911,82x + 10\,334$  na poziomie zmienności  $R^2 = 0,7406$ .



Ryc. 36. Porównanie modułu sprężystości próbek strefy przyobwodowej – ława  
Fig. 36. Comparison of the modulus of elasticity of the side samples – ława



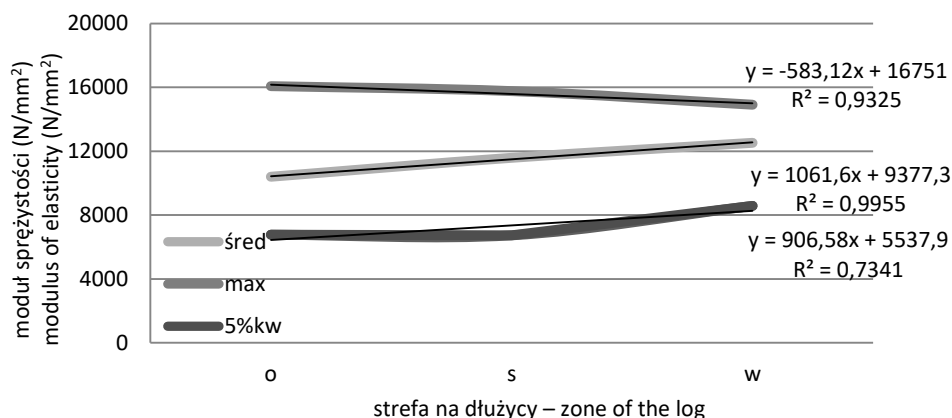
Ryc. 37. Moduł sprężystości dla próbek promieniowych – ława  
Fig. 37. Modulus of elasticity for radial samples – ława

Wyniki zaprezentowane na rycinie 38 charakteryzowały moduł sprężystości próbek stycznych, który mieścił się w przedziale od 6721 N/mm<sup>2</sup> do 16077 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wartość modułu elementów stycznych wyniosła 11 115 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2866 N/mm<sup>2</sup>. Wartość średnia modułu miała charakter funkcji rosnącej, uzyskując wyższe wartości dla surowca ze stref wierzchołkowych w porównaniu do drewna strefy odziomkowej.

Zaprezentowane na rycinach 37, 38 wyniki średniego modułu sprężystości wskazują, że najwyższe właściwości miały próbki styczne (11 115 N/mm<sup>2</sup>), a najniższe próbki promieniowe (8400 N/mm<sup>2</sup>). W zestawieniu wyników badań surowca centralnej strefy

przekroju (tarcica główna) średnia wartość modułu kształtuje się na poziomie 10 075 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 2864 N/mm<sup>2</sup>.

W tabeli 16 zestawiono wyniki średnich modułów sprężystości oraz średnie gęstości drewna z badanych litych belek sosnowych, dla analizowanych powierzchni doświadczalnych.



Ryc. 38. Moduł sprężystości dla próbek stycznych – ława  
Fig. 38. Modulus of elasticity for tangential samples – ława

Tabela 16. Zestawienie przeciętnych wartości modułu sprężystości z badanych powierzchni  
Table. 16. Comparison of the average values of the elastic modulus from experimental sites

Pochodzenie próbek z nadleśnictwa The origin of samples from the forest district		Średnie gęstości surowca Average raw material density (kg/m <sup>3</sup> )	Średni moduł sprężystości Average modulus of elasticity (N/mm <sup>2</sup> )
I – Barlinek	min	466	4661
	średnia average	566	8845
	max	661	14 515
II – Człuchów	min	466	5174
	średnia average	551	8879
	max	645	19 907
III – Borne Sulinowo	min	502	5500
	średnia average	556	9210
	max	697	15 794
IV – Sulechów	min	424	4300
	średnia average	557	7274
	max	661	16 935
V – Ława	min	425	5908
	średnia average	567	10 284
	max	725	16 387

W zestawieniu wyników otrzymanych podczas badań modułu sprężystości podłużnej przy zginaniu dla grup badanych próbek z powierzchni doświadczalnych I-V (Nadleśnictwa Barlinek, Człuchów, Borne Sulinowo, Sulechów i Iława) określono wartości średnie i charakterystyczne 5% kwantylu modułu sprężystości, po uwzględnieniu współczynników poprawkowych (PN-EN 384; PN-EN 408). Wskazane wartości 5% kwantylu modułu sprężystości oraz średni moduł sprężystości zostały uwzględnione w klasyfikacji wytrzymałościowej badanego surowca zgodnej z PN-EN 338 i zaprezentowane w rozdziale 5.6. Stanowią one jeden z ważniejszych parametrów charakterystyki wytrzymałościowej surowca drzewnego bezpośrednio skorelowany z wytrzymałością na zginanie w konstrukcjach drewnianych.

Z analizy wyników badania modułu sprężystości oznaczonego podczas prób zginania wzdłuż włókien można stwierdzić, że najniższe wartości badanego parametru uzyskano dla elementów promieniowych zawierających rdzeń. Podobne wartości rozrzutu modułu sprężystości wykazano we wszystkich badanych grupach.

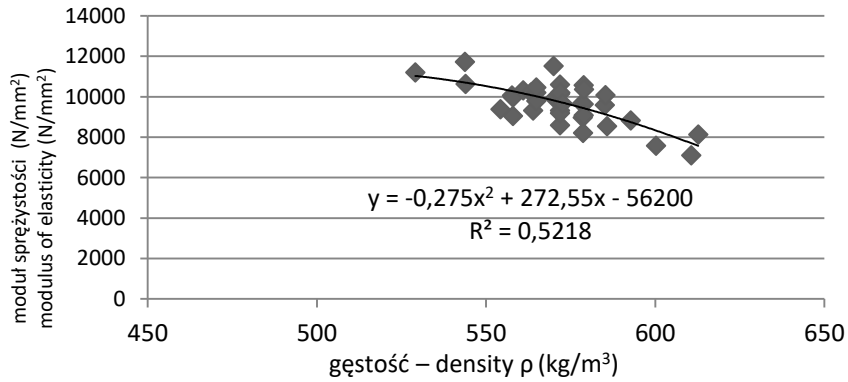
W grupie elementów pozyskanych z tarcicy głównej zdecydowanie najwyższe wyniki modułu sprężystości wykazały próbki styczne. Wysokie wartości modułu określono także dla materiału pochodzącego z tarcicy bocznej. Przykładowo w grupie próbek z Nadleśnictwa Iława uzyskano wartość średnią modułu sprężystości próbek litych na poziomie 10 284 N/mm<sup>2</sup>, a w grupie klejonych – 10 526 N/mm<sup>2</sup>. Uogólniając wyniki średnich wartości modułu uzyskane z tarcicy głównej, należy stwierdzić, że cechowały się one znacznym rozrzutem wartości, uzyskując wysoki współczynnik 28%. Wysokie wartości współczynnika zmienności badanych właściwości są wynikiem braku selekcji jakościowej surowca przeznaczonego do badań oraz ortotropowej zmienności naturalnych cech drewna.

Oprócz zadowalających wyników próbek z surowca obstawy bocznej o niejednorodnej budowie warstw, których średnie wartości wyniosły: dla grupy Barlinek 9434 N/mm<sup>2</sup>, dla grupy Człuchów 9519 N/mm<sup>2</sup>, dla grupy Borne Sulinowo 8779 N/mm<sup>2</sup>, dla grupy Sulechów 7889 N/mm<sup>2</sup> i dla grupy Iława 10526 N/mm<sup>2</sup>, rozrzuty wartości modułu sprężystości były zbliżone do próbek strefy centralnej (tarcia główna), osiągając odpowiednio współczynnik zmienności 22%, 28%, 22%, 21% i 16%. Zatem na podstawie badań cech sprężystych drewna sosny pochodzącego z wyznaczonych powierzchni Polski Zachodniej można stwierdzić, że drewno z obstawy bocznej (klejone) do zastosowań konstrukcyjnych cechuje mniejszy lub porównywalny rozrzut wyników w stosunku do drewna litego tarcicy głównej.

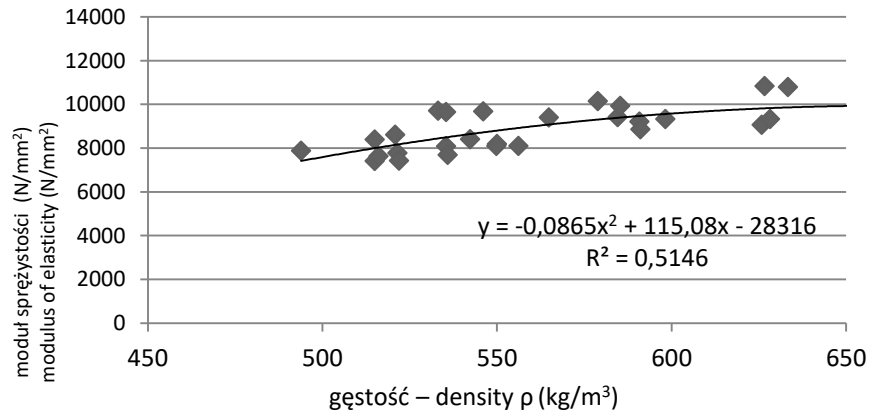
#### 5.4.2. Zależność modułu sprężystości od gęstości drewna

Zestawienie charakterystyki modułu sprężystości wzdłużnej podczas statycznego zginania odniesione do gęstości drewna zilustrowano na rycinach 39-43, zarówno w grupie próbek tarcicy głównej (elementy styczne i promieniowe), jak i bocznej (elementy klejone). Pomimo małego przedziału średniej gęstości, materiał badawczy z tej grupy osiągał znaczne rozrzuty właściwości sprężystych.

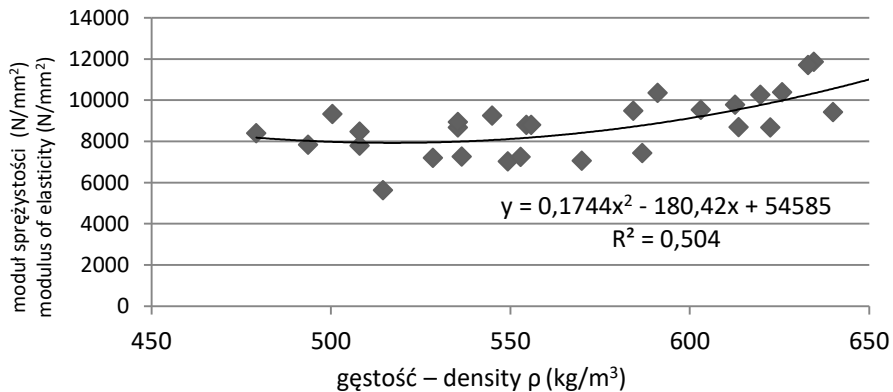
Graficzne opracowanie zależności pomiędzy modułem sprężystości a gęstością drewna sosny zobrazowano dla poszczególnych powierzchni badawczych przyjętych w metodyce. W przypadku prezentacji wyników dla elementów klejonych z powierzchni



Klejone – Glued



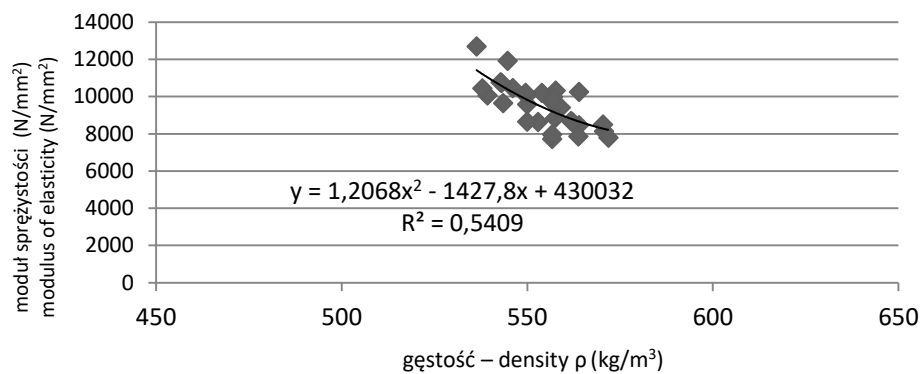
Styczne – Tangential



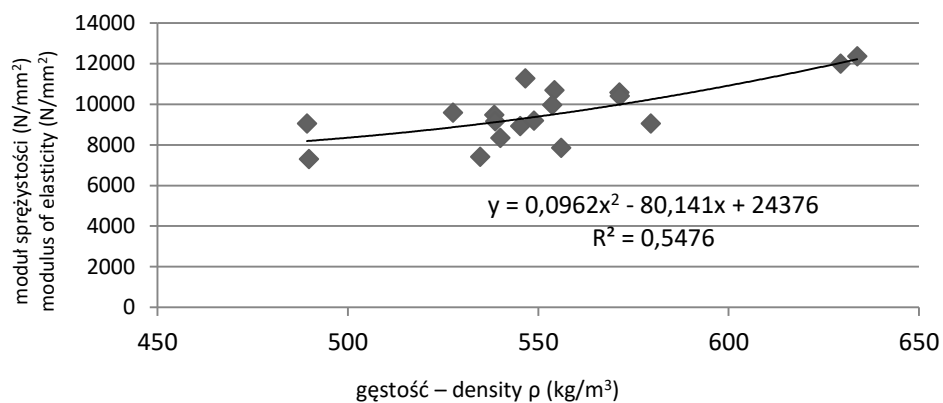
Promieniowe – Radial

Ryc. 39. Zależność pomiędzy średnim modulem sprężystości a średnią gęstością drewna sosny z powierzchni I – Barlinek

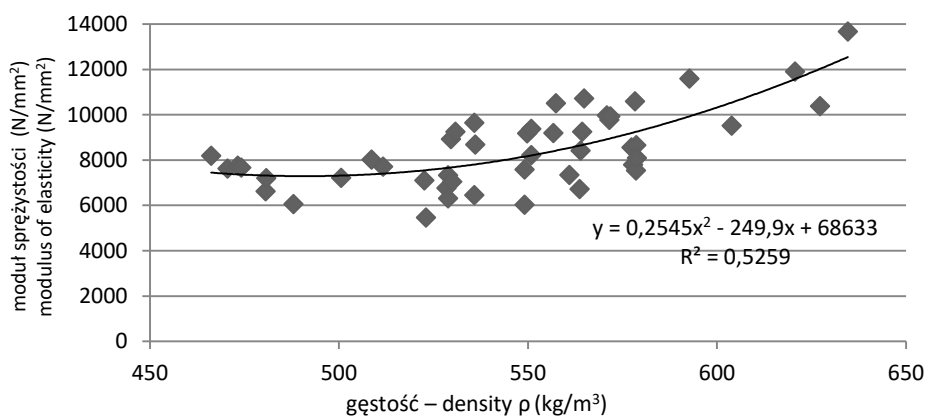
Fig. 39. The relationship between the mean modulus of elasticity and average density of pine timber for experimental site I – Barlinek



## Klejone – Glued

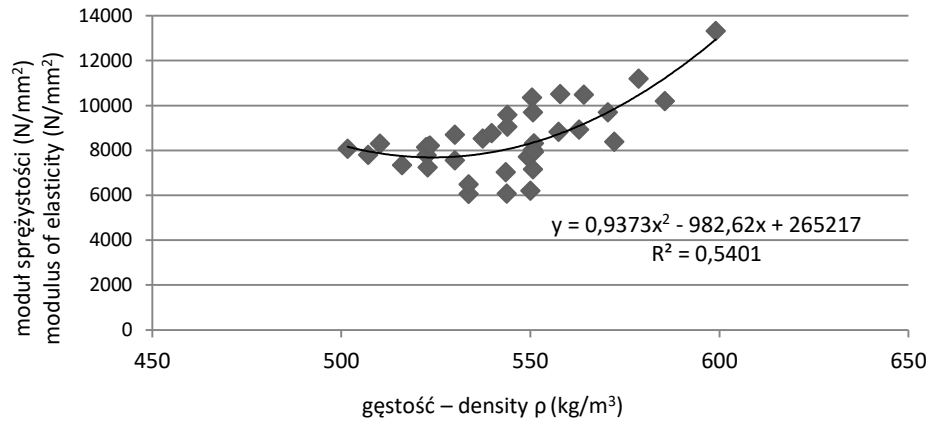


## Styczne – Tangential

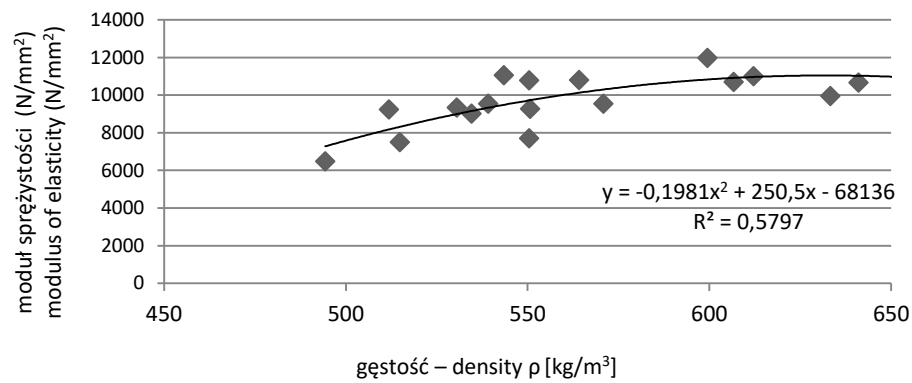


## Promieniowe – Radial

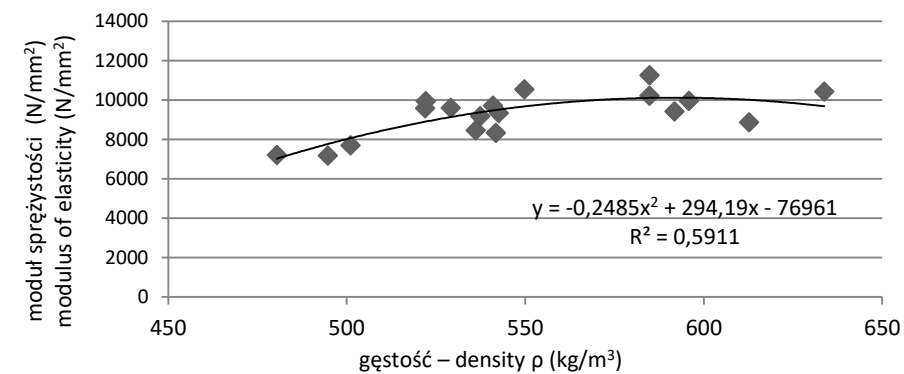
Ryc. 40. Zależność pomiędzy średnim modułem sprężystości a średnią gęstością drewna sosny dla powierzchni II – Człuchów  
Fig. 40. The relationship between the mean modulus of elasticity and average density of pine timber for experimental site II – Człuchów



Klejone – Glued

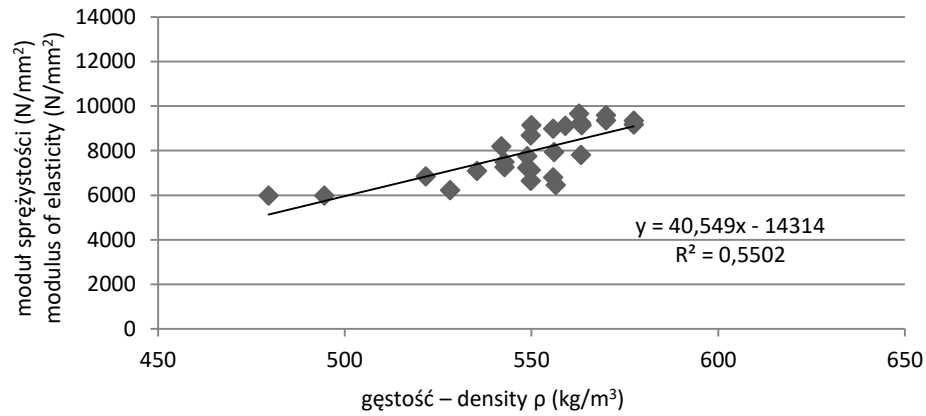


Styczne – Tangential

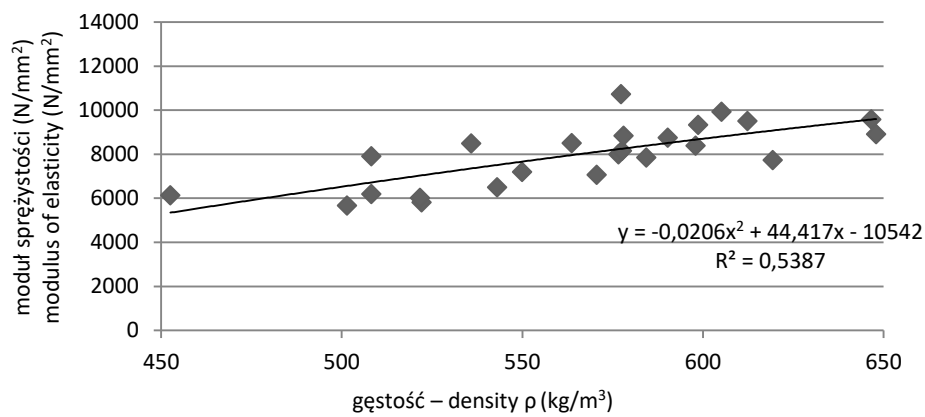


Promieniowe – Radial

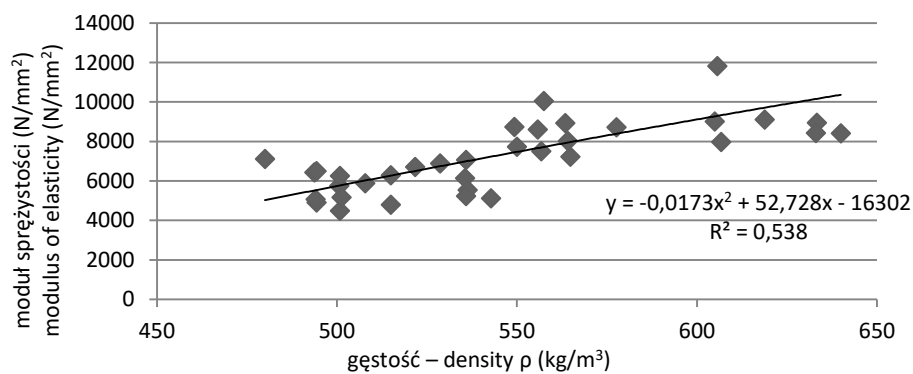
Ryc. 41. Zależność pomiędzy średnim modułem sprężystości a średnią gęstością drewna sosny dla powierzchni III – Borne Sulinowo  
Fig. 41. The relationship between the mean modulus of elasticity and average density of pine timber for experimental site III – Borne Sulinowo



Klejone – Glued

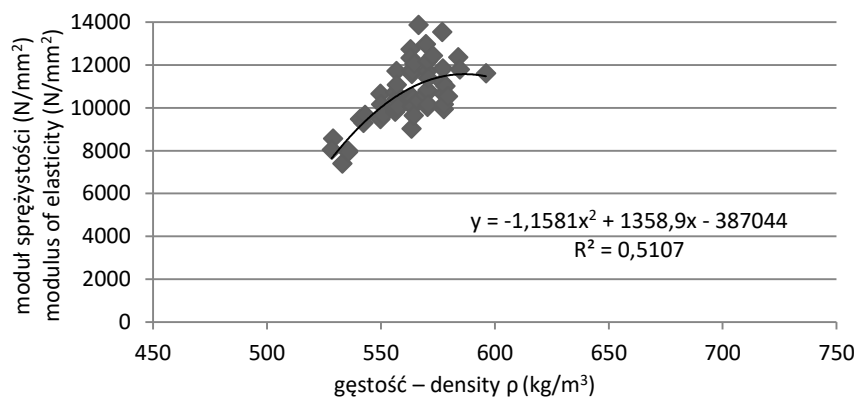


Styczne – Tangential

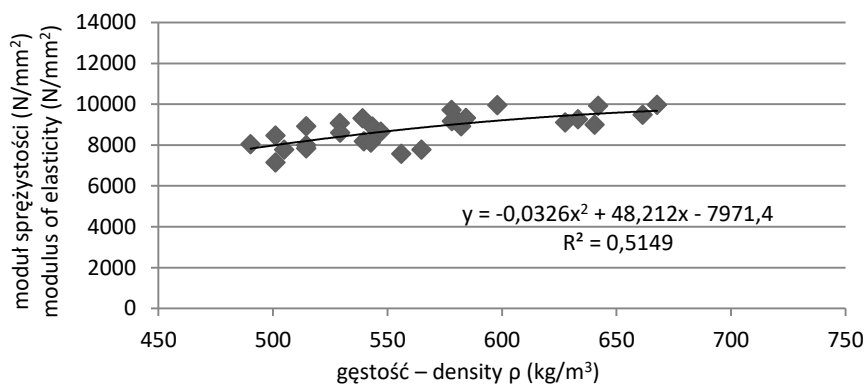


Promieniowe – Radial

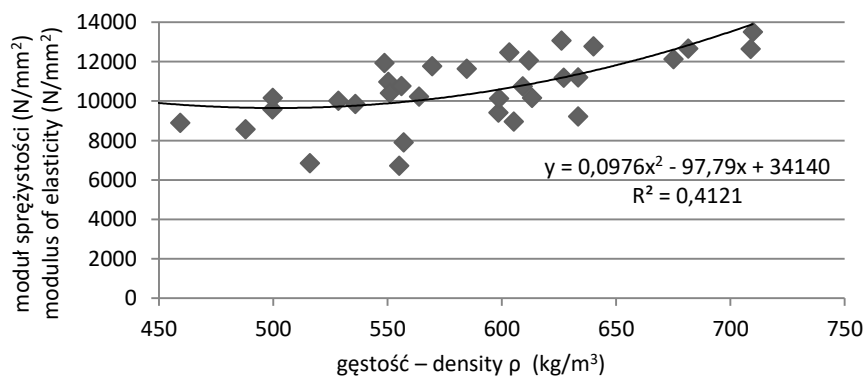
Ryc. 42. Zależność pomiędzy średnim modułem sprężystości a średnią gęstością drewna sosny z powierzchni IV – Sulechów  
Fig. 42. The relationship between the mean modulus of elasticity and average density of pine timber for experimental site IV – Sulechów



Klejone – Glued



Styczne – Tangential



Promieniowe – Radial

Ryc. 43. Zależność pomiędzy średnim modułem sprężystości a średnią gęstością drewna sosny dla powierzchni V – Iława

Fig. 43. The relationship between the mean modulus of elasticity and average density of pine timber for experimental site V – Iława



I i II (Nadleśnictwo Barlinek i Człuchów) stwierdzono spadek modułu sprężystości wraz ze wzrostem gęstości materiału. W pozostałych przypadkach, zarówno elementów klejonych z tarcicy bocznej, jak i dla tarcicy głównej, potwierdzono dodatnią korelację badanych parametrów w przedziale do około  $650 \text{ kg/m}^3$ . Dalszy wzrost gęstości, często spowodowany udziałem sęków, przekładał się na spadek modułu sprężystości.

## 5.5. Właściwości mechaniczne próbek laboratoryjnych

Badanie modułu sprężystości próbek laboratoryjnych zastosowano jako odniesienie do właściwości mechanicznych surowca. Dokonano go w celu porównania otrzymanych wyników materiałowych reprezentujących surowiec wielkowymiarowy. Podczas badań właściwości próbek laboratoryjnych ( $20 \times 20 \times 300 \text{ mm}$ ) z pozyskaniem materiału z próbek wielkowymiarowych w strefie czystego zginania oznaczono właściwości sprężyste istotne dla późniejszej klasyfikacji wytrzymałościowej sosnowego drewna konstrukcyjnego (PN-EN 338; PN-EN 384; PN-EN 1481).

Podczas badań laboratoryjnych posłużono się danymi literaturowymi (Cagle, 1977; Makowski i Noskowiak, 2009; Nehaus 2004) wskazującymi, że wartość uzyskanych wskaźników wytrzymałościowych próbek litego drewna sosny wykazuje zróżnicowanie w zależności od płaszczyzny działania siły w stosunku do kierunków budowy anatomicznej drewna. W przypadku ułożenia elementu obciążanego w kierunku stycznym osiąga się do kilkunastu procent większą wytrzymałość w stosunku do wartości otrzymanych w przypadku ułożenia w kierunku promieniowym.

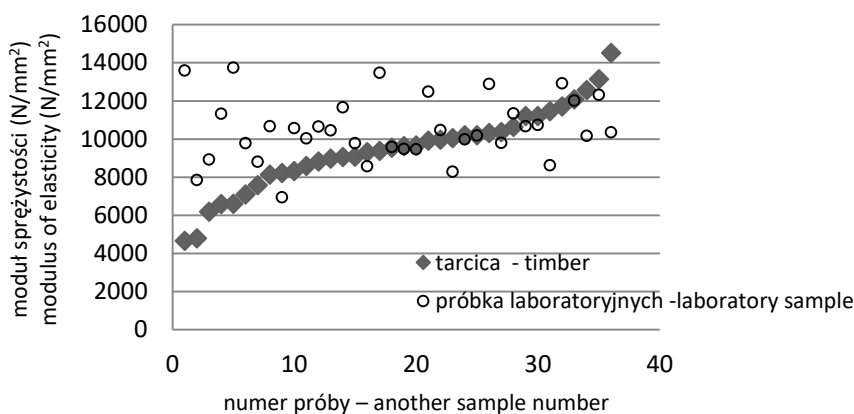
Dla poszczególnych próbek laboratoryjnych o określonej rejonizacji pozyskania dokonano zestawienia wyników i analizy jakościowej surowca poprzez określenie jego wskaźników wytrzymałościowych w badaniu modułu sprężystości przy zginaniu czteropunktowym.

### **Powierzchnia I – Nadleśnictwo Barlinek**

Moduł sprężystości określony podczas badań wytrzymałościowych próbek laboratoryjnych surowca obstawy bocznej z Nadleśnictwa Barlinek przedstawiono na rycinie 44.

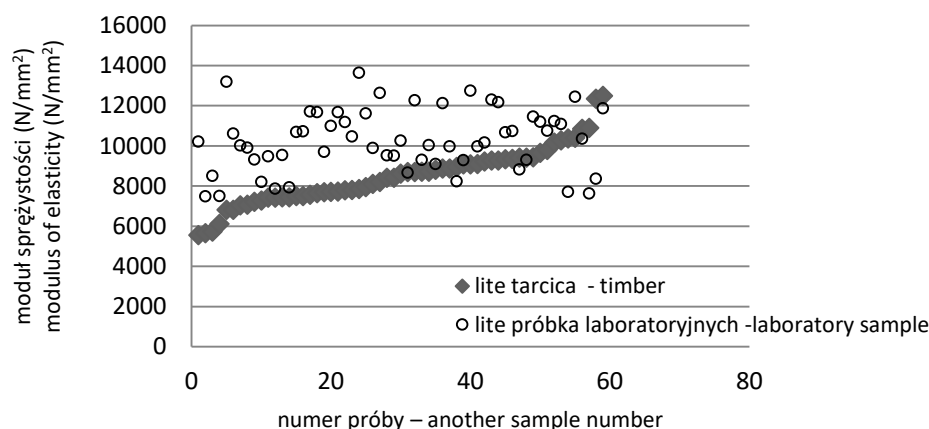
Analizując wyniki zaprezentowane na rycinie 44, można stwierdzić, że dla próbek laboratoryjnych wartość modułu wynosiła od  $6929 \text{ N/mm}^2$  do  $13\,757 \text{ N/mm}^2$ . Średnia wartość modułu sprężystości próbek laboratoryjnych osiągnęła wartość  $10\,509 \text{ N/mm}^2$  przy odchyleniu standardowym na poziomie  $1652 \text{ N/mm}^2$ . Zmienność właściwości dla prób wielkowymiarowych (23%) nie była skorelowana z właściwościami drewna dla próbek małowymiarowych, które cechowały się 15% poziomem zmienności.

Badania próbek laboratoryjnych ze strefy centralnej (ryc. 45), reprezentującej tarcicę główną, osiągały wartość modułu sprężystości w przedziale od  $7480 \text{ N/mm}^2$  do  $13\,641 \text{ N/mm}^2$ . Średnia wartość modułu sprężystości dla przeprowadzonych prób laboratoryjnych wynosiła  $10\,259 \text{ N/mm}^2$  przy odchyleniu standardowym  $1535 \text{ N/mm}^2$  o współczynniku zmienności 15%.



Ryc. 44. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej przekroju z I powierzchni badawczej

Fig. 44. Comparative results of the elastic modulus for side board samples from experimental site I



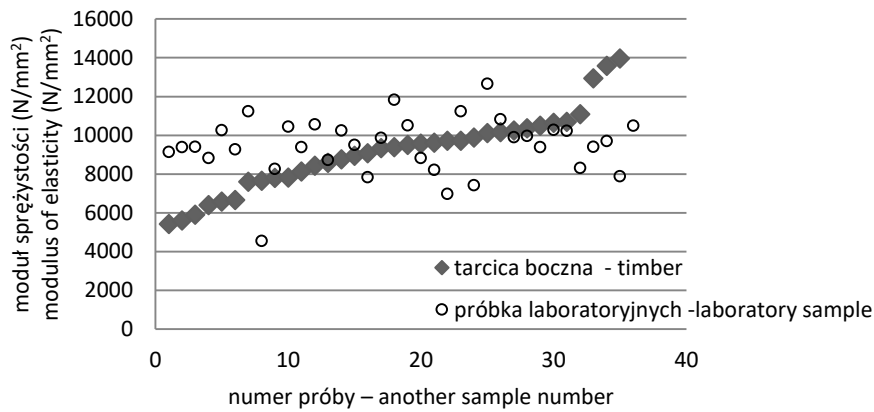
Ryc. 45. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek strefy centralnej przekroju z I powierzchni badawczej

Fig. 45. Comparative results of the elastic modulus for samples of the central zone section from experimental site I

### Powierzchnia II – Nadleśnictwo Człuchów

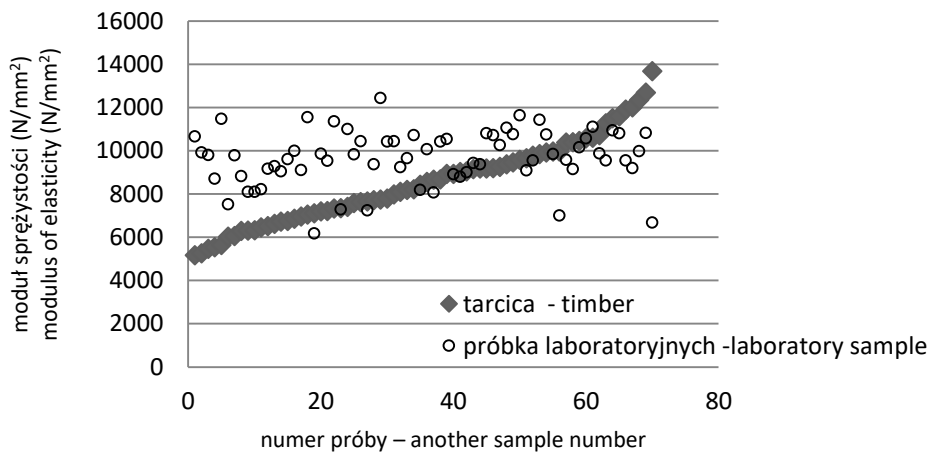
Podczas badań próbek laboratoryjnych oznaczono średni moduł sprężystości przy zginaniu statycznym zobrazowany na rycinach 46 i 47. Na rycinie 46 przedstawiono wyniki dla próbek laboratoryjnych pozyskanych z tarcicy bocznej dla surowca z Nadleśnictwa Człuchów.

Analizując wyniki przedstawione na rycinie 46, stwierdzono, że wartość modułu sprężystości próbek laboratoryjnych mieściła się w przedziale od 4534 N/mm<sup>2</sup> do 12 646 N/mm<sup>2</sup>. Średni moduł sprężystości dla całej grupy wyniósł 9465 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym na poziomie 1584 N/mm<sup>2</sup>. Przedstawione wyniki cechuje 15% współczynnik zmienności.



Ryc. 46. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej przekroju z II powierzchni badawczej

Fig. 46. Comparative results of the elastic modulus for side board samples from experimental site II



Ryc. 47. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek strefy centralnej przekroju z II powierzchni badawczej

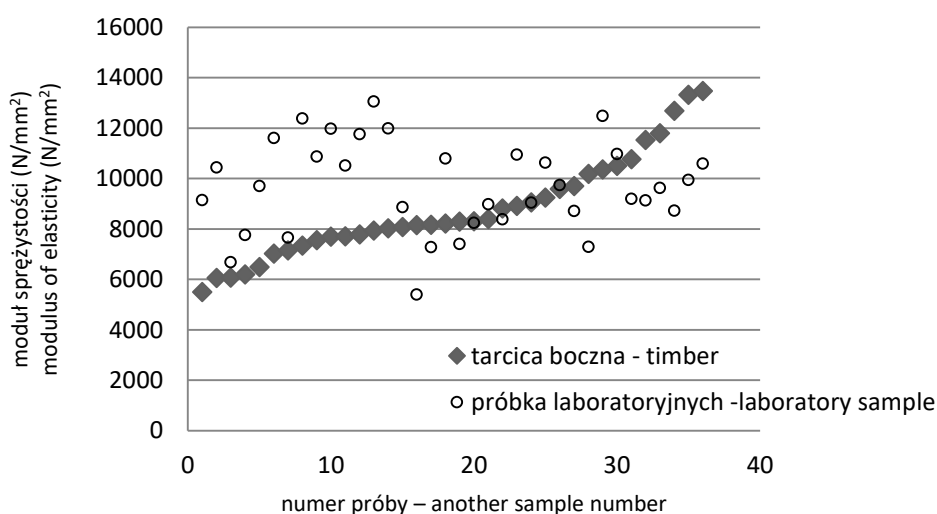
Fig. 47. Comparative results of the elastic modulus for samples of the central zone section from experimental site II

Wyniki otrzymane dla próbek laboratoryjnych z tarcicy głównej dla badanej powierzchni II przedstawiono na rycinie 47. Moduł sprężystości wahał się od 6180 N/mm<sup>2</sup> do 12 446 N/mm<sup>2</sup>. Średnia dla wszystkich próbek o takim przebiegu włókien wyniosła 9685 N/mm<sup>2</sup>. Wartości średnie były o około 1000 N/mm<sup>2</sup> wyższe od średniego modułu sprężystości próbek wielkowymiarowych.

Uzyskane wyniki modułu charakteryzowało odchylenie standardowe na poziomie 1253 N/mm<sup>2</sup> przy wskaźniku zmienności 13%. Zauważalny jest wyższy poziom wskaźników jakościowych dla próbek laboratoryjnych w odniesieniu do surowca wielkowymiarowego ze strefy centralnej.

### Powierzchnia III – Nadleśnictwo Borne Sulinowo

Moduł sprężystości dla próbek laboratoryjnych surowca przyobwodowego (tarcica boczna) z Nadleśnictwa Borne Sulinowo przedstawiono na rycinie 48 (dla próbek laboratoryjnych i wielkowymiarowych klejonych).



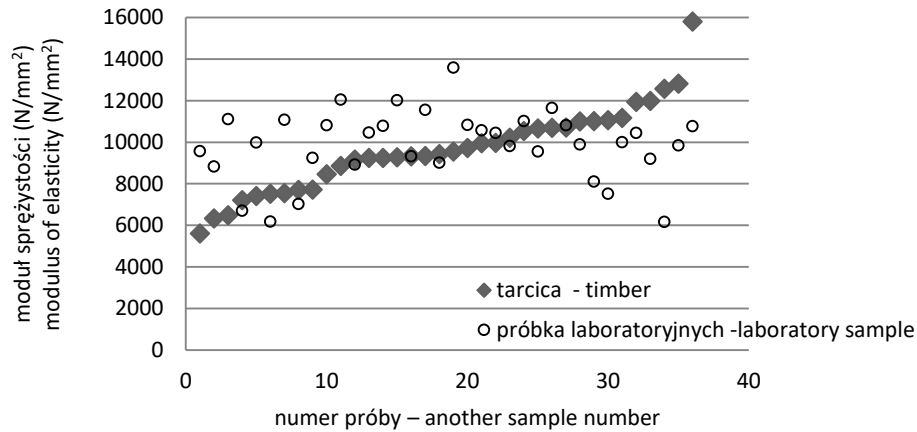
Ryc. 48. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej przekroju z III powierzchni badawczej

Fig. 48. Comparative results of the elastic modulus for side board samples from experimental site III

Wyniki zamieszczone na rycinie 48 wskazują, że największa wartość modułu sprężystości próbek laboratoryjnych przy wilgotności 12% to 13 047 N/mm<sup>2</sup>, a najniższa wynosiła 5391 N/mm<sup>2</sup>. Na rycinie 48 zestawiono wyniki otrzymane w badaniu dla całej grupy, a średnia wartość wynosi 9684 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym na poziomie 1799 N/mm<sup>2</sup> i współczynniku zmienności 16%. Przedstawione wyniki dla prób wielkowymiarowych odnoszą się do współczynnika zmienności 18%. Wartości te mieściły się w przedziale modułu charakteryzującym drewno wielkowymiarowe (5500-13 475 N/mm<sup>2</sup>).

Rycina 49 obrazuje wyniki modułu sprężystości dla próbek pobranych z belek centralnych, który wahał się od 6160 N/mm<sup>2</sup> do 13 583 N/mm<sup>2</sup>. Średnia dla wszystkich próbek o tym pochodzeniu z przekroju poprzecznego wyniosła 9854 N/mm<sup>2</sup>.

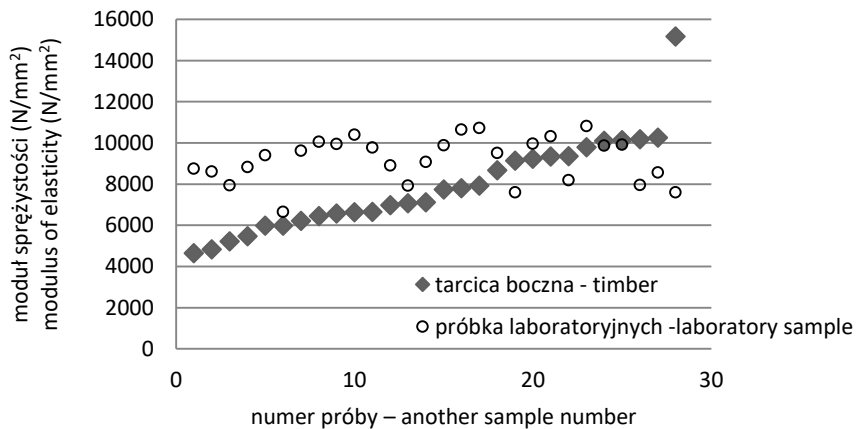
Przebadane próbki charakteryzowało odchylenie standardowe na poziomie 1669 N/mm<sup>2</sup> przy współczynniku zmienności 18%. Wartości modułu sprężystości dla zbadanych próbek wielkowymiarowych mieściły się w granicach 5599-12 812 N/mm<sup>2</sup>. Tak zweryfikowany przedział modułu sprężystości elementów jest zgodny z zakresem modułu potwierdzonym dla próbek laboratoryjnych.



Ryc. 49. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek strefy centralnej przekroju z III powierzchni badawczej  
 Fig. 49. Comparative results of the elastic modulus for samples of the central zone section from experimental site III

#### Powierzchnia IV – Nadleśnictwo Sulechów

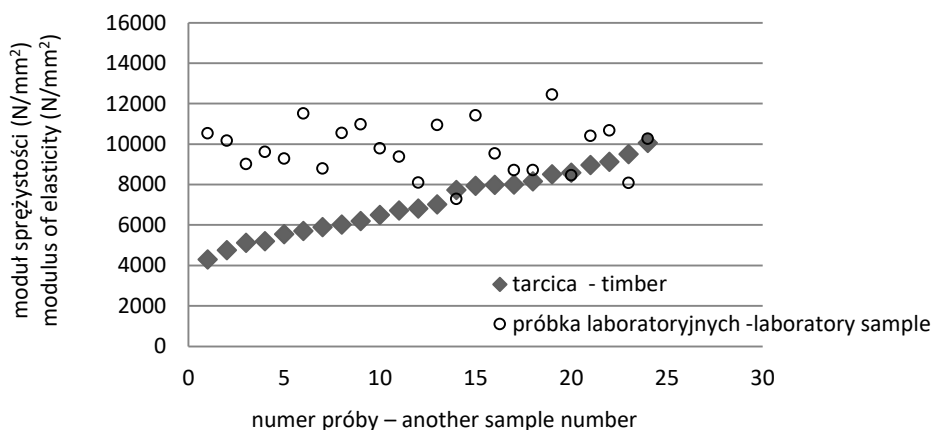
Wyniki badań porównawczych modułu sprężystości próbek laboratoryjnych i elementów wielkowymiarowych ze strefy przyobwodowej dla badanej powierzchni IV przedstawiono na poniższej rycinie 50.



Ryc. 50. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej przekroju z IV powierzchni badawczej  
 Fig. 50. Comparative results of the elastic modulus for side board samples from experimental site IV

Analizując powyżej zobrazowane wyniki dla próbek laboratoryjnych (ryc. 50), stwierdzono, że najniższa wartość modułu sprężystości to 6652 N/mm<sup>2</sup>, a najwyższa osiągnęła poziom 10 825 N/mm<sup>2</sup>. Średni moduł sprężystości dla całej grupy próbek laboratoryjnych pochodzących z tarcicy bocznej wyniósł 9203 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1093 N/mm<sup>2</sup> i wskaźniku zmienności 11%.

Wyniki badań modułu sprężystości próbek laboratoryjnych pochodzących ze strefy centralnej przekroju drewna okrągłego (ryc. 51) mieściły się w zakresie od 5415 N/mm<sup>2</sup> do 12 446 N/mm<sup>2</sup>. Średni moduł dla próbek małowymiarowych wyniósł 9402 N/mm<sup>2</sup> z wartością odchylenia standardowego 1476 N/mm<sup>2</sup> i przy współczynniku zmienności 16%. Wartości uzyskane dla próbek laboratoryjnych znacząco przekraczały górny zakres modułu sprężystości elementów wielkowymiarowych. Potwierdzono w ten sposób pogorszenie właściwości materiału wielkowymiarowego z tarcicy głównej w stosunku do właściwości w badaniach laboratoryjnych, jako efektu skali, generującego wyższą liczbę wad.



Ryc. 51. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek strefy centralnej przekroju z IV powierzchni badawczej

Fig. 51. Comparative results of the elastic modulus for samples of the central zone section from experimental site IV

#### Powierzchnia V – Nadleśnictwo Ilawa

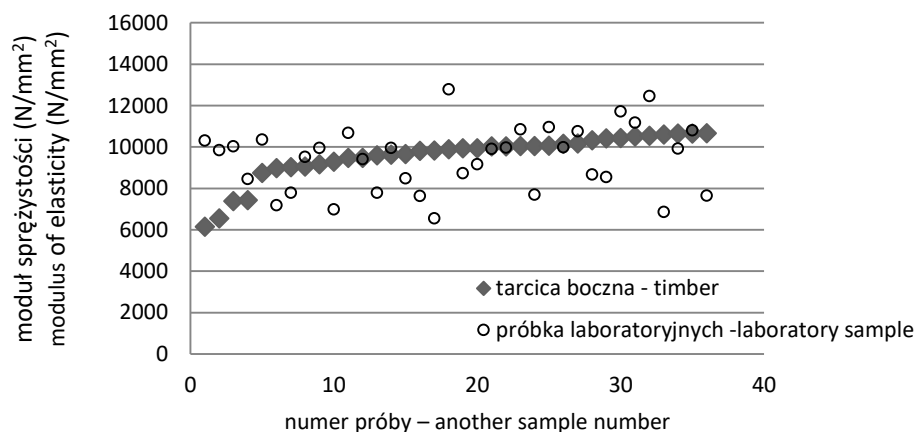
Moduł sprężystości surowca doświadczalnego strefy przyobwodowej z powierzchni V dla próbek laboratoryjnych zaprezentowano na rycinie 52.

Opisując wyniki przedstawione na rycinie 52, stwierdzono, że dla próbek laboratoryjnych największa wartość modułu sprężystości wynosiła 12 784 N/mm<sup>2</sup>, a najniższa 6232 N/mm<sup>2</sup>. Średni wynik modułu w badanej grupie wyniósł 9345 N/mm<sup>2</sup> przy odchyleniu standardowym 1653 N/mm<sup>2</sup>. Przedstawione wyniki dla prób wielkowymiarowych określono dla poziomu współczynnika zmienności 17 %.

Wyniki badań próbek laboratoryjnych pozyskanych z tarcicy głównej zamieszczono na rycinie 53.

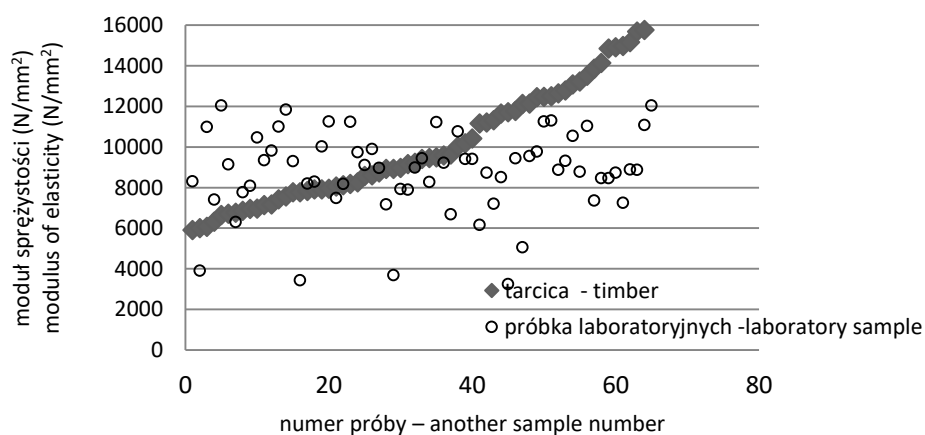
Badania próbek laboratoryjnych strefy centralnej pozwoliły ustalić wartości modułu sprężystości w przedziale od 3246 N/mm<sup>2</sup> do 12 050 N/mm<sup>2</sup>. Średni moduł dla wszystkich próbek pozyskanych z tarcicy głównej wyniósł 8795 N/mm<sup>2</sup>, a odchylenie standardowe kształtowało się na poziomie 2010 N/mm<sup>2</sup> przy wskaźniku zmienności 22%. Jednocześnie zwrócono uwagę, że wartości modułu w próbach laboratoryjnych nie osiągnęły maksymalnych wartości potwierdzonych dla próbek wielkowymiarowych. Może być to efektem doboru próbek w strefie obciążania nieniszczącego, generującego we-

wewnętrzne uszkodzenia struktury drewna oraz zmienności właściwości drewna na przekroju badanych elementów wielkowymiarowych. Zmienność ta jest nietypowa i wystąpiła tylko w przypadku rozpatrywanego materiału badawczego drewna sosny z powierzchni IV.



Ryc. 52. Wyniki porównawcze modułu sprężystości dla próbek obstawy bocznej przekroju z V powierzchni badawczej

Fig. 52. Comparative results of the elastic modulus for side board samples from experimental site V



Ryc. 53. Wyniki porównawczemodułu sprężystości dla próbek strefy centralnej przekroju z V powierzchni badawczej

Fig. 53. Comparative results of the elastic modulus for samples of the central zone section from experimental site V

Według źródeł literaturowych wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości podczas zginania dla drewna sosny o wilgotności około 12% wynoszą odpowiednio: 75-87 N/mm<sup>2</sup> i 12 000 N/mm<sup>2</sup> (Krzysik, 1978; Sell, 1989; Mielczarek, 1994; Pożgaj, 1982). Jednakże, ci sami i inni autorzy wskazują, że małe, pozbawione wad próbki dają znacznie wyższe wyniki niż próbki duże (pełnowymiarowe), które zawierają szereg wad

dopuszczalnych w tarcicy budowlanej. W celu oceny różnic właściwości sprężysto-wytrzymałościowych drewna sosny (w zależności od gabarytów badanych próbek) przeprowadzono analizę porównawczą otrzymanych wcześniej wyników. Ocena dotyczyła próbek małych i wielkogabarytowych pozyskanych z tych samych miejsc na przekroju poprzecznym kłody.

Badania warstw drewna wczesnego i późnego przyrostu rocznego (Farruggia i Perre, 2000) wskazują na różnice właściwości. Na przykład moduł sprężystości warstwy późnej słoja rocznego drewna sosnowego przy ścisaniu w kierunku promieniowym (około 1860 N/mm<sup>2</sup>) jest 2,56 razy większy od modułu warstwy wczesnej (722 N/mm<sup>2</sup>). Badania potwierdziły, że przy wzroście objętości próbek obserwuje się wpływ czynnika skali, jako efektu wzrostu różnicy właściwości drewna wczesnego i późnego (Bodig i Jayne, 1982; Madsen, 1990, 1992; Lam, 1987, 1990) na właściwości mechaniczne drewna. Główne znaczenie odgrywa tu zmiana długości próbki. Zjawisko to nosi nazwę tzw. efektu długości.

W tabeli 17 zestawiono wyniki średnich modułów sprężystości badanych próbek laboratoryjnych i elementów sosnowych dla surowca obstawy bocznej z analizowanych powierzchni doświadczalnych. Dla badanych powierzchni próbek laboratoryjnych uzyskano wyniki charakteryzujące się znacznym wskaźnikiem odchylenia standardowego modułu sprężystości. Jednocześnie wykazano niewielkie zróżnicowanie wartości średnich modułu sprężystości dla wyników badań laboratoryjnych drewna pochodzącego z obstawy bocznej. Średnie wartości modułu uzyskały zbliżone wielkości w przedziale od 9203 N/mm<sup>2</sup> do 10 354 N/mm<sup>2</sup>, co pozwala ocenić jakość techniczną surowca obstawy bocznej jako zrównoważoną, bez wpływu pochodzenia z wybranych lokalizacji (powierzchnie I-V).

W tabeli 18 zaprezentowano wartości modułu sprężystości określone zarówno dla elementów wielkowymiarowych ze strefy centralnej badanego surowca, jak i próbek laboratoryjnych z niego pozyskanych. Wskazano na uzyskane wartości średnie modułu sprężystości elementów małowymiarowych w przedziale 9237 N/mm<sup>2</sup> do 10 259 N/mm<sup>2</sup>. Średnie wartości w przypadku próbek laboratoryjnych pozyskanych zarówno ze strefy przyobwodowej, jak i materiału strefy centralnej posiadały zbliżone moduły sprężystości. Rozpatrywany odrębnie dla próbek małowymiarowych i wielkowymiarowych materiał z poszczególnych powierzchni nie wykazywał znacznych różnic średniej wartości modułu sprężystości. W analizie wyników indywidualnych lokalizacji doboru surowca doświadczalnego najwyższe parametry jakości technicznej dla postaci małowymiarowej posiadało drewno sosnowe z powierzchni I, a najniższe z powierzchni IV. Jednocześnie w przypadku elementów wielkowymiarowych najwyżej oceniony (najwyższe średnie moduły sprężystości) został surowiec z powierzchni V, zarówno ze strefy centralnej, jak i przyobwodowej.

Wyniki badań potwierdzone testami nieniszczącymi świadczą w sposób jednoznaczny, że właściwości sprężyste elementów stosowanych w praktyce przemysłowej a ich postacią małowymiarową (próbki laboratoryjne) różnią się wartościami. W przypadku litych próbek wielkowymiarowych średnia wartość modułu sprężystości jest niższa od wartości uzyskanych dla odpowiednich próbek laboratoryjnych, wyjątek stanowią jedynie materiały z Nadleśnictwa Iława.



Tabela 17. Zestawienie przeciętnych wartości modułu sprężystości próbek laboratoryjnych i wielkowymiarowych z surowca obstawy bocznej

Table 17. Comparison of average values of the modulus of elasticity of laboratory and large-size solid timber samples of side timber

Pochodzenie próbek z nadleśnictwa The origin of samples from the forest district		Moduł sprężystości elementów wielkowymiarowych z tarcicy bocznej o wilgotności 12% Modulus of elasticity of large size elements from side timber with 12% (N/mm <sup>2</sup> )	Moduł sprężystości próbek laboratoryjnych o wilgotności 12% Modulus of elasticity of laboratory samples with humidity of 12% (N/mm <sup>2</sup> )	Proporcja modułu sprężystości próbek laboratoryjnych do elementów wielkowymiarowych Proportion of the modulus of elasticity of laboratory samples to that of large-sized elements (%)
I – Barlinek	min	4661	6929	9,8
	średnia average	9434	10 354	
	max	14 515	13 747	
II – Człuchów	min	5464	4534	–0,6
	średnia average	9519	9465	
	max	19 907	12 646	
III – Borne Sulinowo	min	5500	5391	10,3
	średnia average	8779	9684	
	max	13 475	13 047	
IV – Sulechów	min	4654	6652	16,7
	średnia average	7888	9203	
	max	15 174	10 825	
V – Hława	min	6455	6232	–11,2
	średnia average	10 526	9345	
	max	16 387	12 784	

Dla próbek z belek litych różnice modułu sprężystości (efekt skali) wynosiły dla Barlinka 9%, dla Człuchowa –0,6%, dla Bornego Sulinowa 10,3 %, dla Sulechowa 16,7 % i (wyjątek) dla Hławy –11%. W przypadku próbek pozyskanych z drewna obstawy bocznej różnice średnich wartości modułu sprężystości wynosiły kolejno: dla Barlinka 16,0%, dla Człuchowa 9,1%, dla Bornego Sulinowa 6%, dla Sulechowa 29,3 % i (wyjątek) dla Hławy –10,2%. Charakterystyczny jest także brak zróżnicowania wartości odchylenia standardowego „wielkowymiarowe/laboratoryjne” dla próbek strefy centralnej surowca doświadczalnego.

Lepsze wyniki uzyskane z pomiaru właściwości sprężystych dla próbek laboratoryjnych można tłumaczyć znacznie większą jednorodnością materiału i prawie całkowitym brakiem anatomicznych wad drewna, które z kolei występowały w naturalnej ilości w próbkach pełnowymiarowych. Z kolei na podstawie analizy współczynników zmien-

ności wartości średnich można zauważyć, że pełnowymiarowe elementy wykazywały zbliżony rozrzut wyników.

Tabela 18. Zestawienie przeciętnych wartości modułu sprężystości próbek laboratoryjnych i wielkowymiarowych litych strefy centralnej  
Table 18. Comparison of the average values of the modulus of elasticity of laboratory and large-size solid timber of the central zone

Pochodzenie próbek z nadleśnictwa The origin of samples from the forest district		Moduł sprężystości elementów wielkowymiarowych strefy centralnej o wilgotności 12% Modulus of elasticity of large sized elements from central timber zone with a 12% moisture content (N/mm <sup>2</sup> )	Moduł sprężystości próbek laboratoryjnych o wilgotności 12% Modulus of elasticity of laboratory samples with 12% moisture content (N/mm <sup>2</sup> )	Proporcja modułu sprężystości próbek laboratoryjnych do elementów wielkowymiarowych Proportion of the modulus of elasticity of laboratory samples to that of large-sized elements (%)
I – Barlinek	min	4661	7480	16,0
	średnia average	8845	10 259	
	max	14 515	13 641	
II – Człuchów	min	5174	6180	9,1
	średnia average	8879	9685	
	max	19 907	12 446	
III – Borne Sulinowo	min	5500	5391	6,1
	średnia average	9210	9769	
	max	15 794	13 583	
IV – Sulechów	min	4300	5415	29,3
	średnia average	7274	9402	
	max	16 935	12 446	
V – Iława	min	5908	5060	–10,2
	średnia average	10 284	9237	
	max	16 387	12 784	

## 5.6. Klasy wytrzymałości

Przeprowadzone badania właściwości mechanicznych polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej pochodzącej z pięciu wybranych krain przyrodniczo-leśnych wskazują na możliwość przyporządkowania polskich klas sortowniczych do ich europejskich odpowiedników, podobnie jak zaprezentował to w swojej pracy Krzosek (2009). Ze względu na właściwości sprężysto-wytrzymałościowe klasie KW przypisano klasę C30, klasie KG

– C24, a klasie KG – C18. W oparciu o powyższe badania i klasyfikację wytrzymałościową tarcicy konstrukcyjnej normy PN-EN 338 postanowiono dokonać analizy wskazań jakościowych dla grup badanego surowca z poszczególnych nadleśnictw. Dokonano podziału wszystkich próbek litych na klasy wytrzymałościowe C (tab. 2), które obowiązują podczas obrotu drewnem konstrukcyjnym na rynku europejskim (PN-EN 338:2016).

Tabela 19. Spełnienie warunku klas wytrzymałości dla wyników modułu sprężystości grupy elementów litych promieniowych

Table 19. The elastic modulus of a group of radial solid elements in view of requirements for strength classes

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie partii próbek Designation of batches of samples				
	Barlinek	Człuchów	Borne Sulinowo	Sulechów	Iława
C14	S	S	S	–	S
C16	S	Mod	S	–	S
C18	–	–	S	–	5%
C20	–	–	5%	–	5%
C22	–	–	5%	–	5%
C24	–	–	5%	–	5%
C27	–	–	5%	–	5%
C30	–	–	–	–	–
C35	–	–	–	–	–
C40	–	–	–	–	–

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Klasę wytrzymałości określano tak jak dla próbek modelowych według normy PN-EN 338 „Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości”, przyjmując jako kryterium wyniki średniego modułu sprężystości oraz 5% kwantyl modułu sprężystości. Wyniki przedstawiono w tabeli 19 i 20 w układzie podziału na próbki o przekroju promieniowym i stycznym oraz w tabeli 21 dla sumarycznej analizy partii próbek litych (łącznie stycznych i promieniowych) i w tabeli 22 (dla grupy próbek tarcicy bocznej do klejenia).

Warunki spełniania wymogów dla określonych klas wytrzymałości PN-EN 338 przedstawione w tabelach 21 i 22 wykazują, że oprócz próbek litych klejenie warstwowe drewna podnosi ogólną jakość drewna (poprawia cechy mechaniczne), z którego zostało wykonane, jednak poprawa nie jest znacząca. Próbki lite mimo początkowych bardzo stabilnych wydzieleń klasy wytrzymałości w próbkach laboratoryjnych uzyskały najgorsze wyniki klasyfikacji wytrzymałościowej, szczególnie w odniesieniu do próbek o przekroju promieniowym. Ma to związek z wadami występującymi w próbkach litych, które zostały wyeliminowane w próbkach klejonych.

Tabela 20. Spełnienie warunku klas wytrzymałości dla wyników modułu sprężystości grupy elementów litych stycznymi  
 Table 20. The elastic modulus of a group of solid tangential elements in view of requirements for strength classes

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie partii próbek Designation of batches of samples:				
	Barlinek	Człuchów	Borne Sulino- nowo	Sulechów	Iława
C14	S	S	S	S	S
C16	S	S	S	S	S
C18	–	S	S	S	S
C20	–	–	Mod	–	S
C22	–	–	–	–	S
C24	–	–	–	–	5%
C27	–	–	–	–	5%
C30	–	–	–	–	5%
C35	–	–	–	–	5%
C40	–	–	–	–	–

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Tabela 21. Spełnienie warunku klas wytrzymałości dla wyników modułu sprężystości elementów strefy centralnej (łącznie stycznymi i promieniowymi)  
 Table 21. The elastic modulus of central zone elements (including tangential and radial) in view of requirements for strength classes

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie partii próbek Designation of batches of samples				
	Barlinek	Człuchów	Borne Sulino- nowo	Sulechów	Iława
C14	S	S	S	Mod	S
C16	S	Mod	S	–	S
C18	–	–	Mod	–	S
C20	–	–	–	–	S
C22	–	–	–	–	5%
C24	–	–	–	–	5%
C27	–	–	–	–	5%
C30	–	–	–	–	5%
C35	–	–	–	–	5%
C40	–	–	–	–	–

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Tabela 22. Spełnienie warunku klas wytrzymałości dla wyników modułu sprężystości grupy tarcicy bocznej  
 Table 22. The modulus of elasticity of side board timber in view of requirements for strength classes

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie partii próbek Designation of batches of samples:				
	Barlinek	Człuchów	Borne Sulinowo	Sulechów	Ława
C14	Mod	S	S	Mod	S
C16	Mod	S	S	–	S
C18	Mod	Mod	–	–	S
C20	–	–	–	–	S
C22	–	–	–	–	5%
C24	–	–	–	–	5%
C27	–	–	–	–	5%
C30	–	–	–	–	5%
C35	–	–	–	–	5%
C40	–	–	–	–	–

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Na podstawie porównania wyników badań zaprezentowanych w powyższych tabelach, można stwierdzić, że wyższe klasy wytrzymałościowe uzyskano dla grupy elementów litych o przekroju stycznym. W tej grupie elementów otrzymano najwyższe wyniki dla tarcicy z Nadleśnictwa Ława. Niższe wskaźniki klasyfikacji (PN-EN 338) określono dla łącznego zestawienia wyników badań próbek litych surowca strefy centralnej w zależności od wartości modułu sprężystości dla przekroju poprzecznego badanego surowca. Jednocześnie widoczna jest wyrównana wytrzymałość elementów klejonych (tab. 22), dla których najslabsze wyniki osiąga surowiec pochodzący z Nadleśnictwa Sulechów.

Warto jednak zaznaczyć, że wyniki badań, jak również dane publikacyjne innych badaczy, wskazują na znaczne zróżnicowanie właściwości mechanicznych polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej pochodzącej z różnych krain przyrodniczo-leśnych pomimo przynależności do tej samej klasy sortowniczej (Praca zbiorowa, 1964; Dziewanowski, 1967; Praca zbiorowa, 1974; Dzbeński, 2005; Nożyński, 2006; Krzosek, 2009). Porównując wyniki badań wymienionych autorów z wynikami badań niniejszej pracy, można potwierdzić występowanie takiego zróżnicowania na korzyść zdecydowanie lepszych właściwości wytrzymałościowych drewna sosny pochodzącej z Nadleśnictwa Ława.

Weryfikacja wskaźników jakościowych przebadanego surowca sosnowego na długości dłużyc modelowych z powierzchni badawczych (tab. 23-25) została ujęta również poprzez odniesienie do klas wytrzymałościowych drewna konstrukcyjnego w zgodności z PN-EN 386.

Tabela 23. Spełnienie warunku klas wytrzymałości PN-EN 338 wg modułu sprężystości surowca na długości dłużyc grupy elementów litych promieniowych

Table 23. The elastic modulus of the raw material over log length in the group of solid radial elements in view of requirements for strength classes PN-EN 338

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie powierzchni – Marking area														
	próbki ze strefy odziomkowej samples from the bott-end zone					próbki ze strefy środkowej samples from the central zone					próbki ze strefy wierzchołkowej samples from the top zone				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
C14	S	S	S	–	S	S	S	S	5%	S	S	S	S	5%	S
C16	S	S	S	–	S	S	Mod	S	–	5%	S	S	S	–	S
C18	–	S	S	–	S	5%	–	S	–	–	–	–	5%	–	5%
C20	–	–	S	–	–	5%	–	5%	–	–	–	–	5%	–	–
C22	–	–	S	–	–	5%	–	–	–	–	–	–	5%	–	–
C24	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5%	–	–
C27	–	–	5%	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C30	–	–	5%	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C35	–	–	5%	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Tabela 24. Spełnienie warunku klas wytrzymałości PN-EN 338 wg modułu sprężystości surowca grupy elementów litych stycznych na długości dłużyc

Table 24. The modulus of elasticity of timber in the group of tangential solid elements over log length in view of requirements for strength classes PN-EN 338

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie powierzchni – Marking area														
	próbki ze strefy odziomkowej samples from the bottom zone					próbki ze strefy środkowej samples from the middle zone					próbki ze strefy wierzchołkowej samples from the upper zone				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
C14	S	S	S	S	S	S	S	S	–	S	S	S	S	S	S
C16	S	S	S	–	S	S	S	S	–	S	S	S	S	5%	S
C18	–	S	S	–	S	5%	5%	–	–	S	5%	S	S	–	S
C20	–	–	S	–	S	–	–	–	–	S	5%	S	S	–	S
C22	–	–	Mod	–	S	–	–	–	–	Mod	5%	5%	S	–	S

Tab. cd.

C24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	5%	5%	-	S
C27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	5%	5%	-	S
C30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	5%	5%	-	S
C35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	5%	-	-
C40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	-	-	-

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Tabela 25. Spełnienie warunku klas wytrzymałości PN-EN 338 wg modułu sprężystości surowca grupy elementów klejonych z tarczy strefy przyobwodowej na długości dłużyc

Table 25. The modulus of elasticity of timber in the group of glued elements from the circumferential zone over log length in view of requirements for strength classes PN-EN 338

Klasa wytrzymałości Strength class	Oznaczenie powierzchni – Marking area														
	próbki ze strefy odziomkowej samples from the bott-end zone					próbki ze strefy środkowej samples from the center zone					próbki ze strefy wierzchołkowej samples from the top zone				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
C14	S	S	S	S	S	S	S	S	5%	S	S	S	S	Mod	S
C16	S	S	S	S	S	Mod	S	S	-	S	Mod	S	S	Mod	S
C18	S	S	5%	5%	S	-	Mod	-	-	S	Mod	-	S	Mod	S
C20	S	S	-	5%	S	-	-	-	-	-	-	-	S	-	S
C22	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-	-	S	-	S
C24	5%	Mod	-	-	5%	-	-	-	-	-	-	-	5%	-	-
C27	5%	Mod	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	-	-
C30	5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	-	-
C35	5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	-	-
C40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

S – dana partia spełnia kryteria normy (the batch meets the standard requirements)

Mod – średni moduł sprężystości z danej partii spełnia warunki normy (the average modulus of elasticity from a given batch meets the standard requirements)

5% – 5% kwantyl modułu sprężystości spełnia warunki normy (the 5% quantile of the elastic modulus meets the standard requirements)

Zaprezentowane wyniki klasyfikacji surowca strefy centralnej o promieniowym układzie przyrostów rocznych wskazują na wysokie walory drewna strefy odziomkowej (Borne Sulinowo – C24) i stopniowy spadek właściwości w miarę zbliżania się do wierzchołka. Elementy wielkowymiarowe strefy wierzchołkowej wykazały wyższe klasy wytrzymałości (Hawa – C30) i wyższy poziom 5 % kwantylu modułu sprężystości. Ogólna weryfikacja prezentowanych wyników potwierdza niższe wskazania wytrzymałości

ściowe (moduł sprężystości) dla surowca strefy środkowej. Wykazano jednocześnie wysokie walory tarcicy obstawy bocznej wykorzystanej do produkcji belek klejonych, oscylujące w przedziale klas wytrzymałościowych C14-C22.

Zapis normy PN-EN 386 wskazuje szereg wymagań w zakresie procesu produkcji konstrukcyjnych materiałów klejonych i nakazują stosowanie jednej grupy klejów podczas takiego procesu. Dotyczą one badań zarówno elementów konstrukcyjnych, ale także procesu produkcji i kontroli wytrzymałościowych każdej warstwy (PN-EN 14080; PN-EN 386). Konieczna jest kontrola połączeń wieloklinowych, które również wpływają na wytrzymałość wstęgi (PN-EN 385). Złożoność badań produkcji drewna klejonego pozwoliła jedynie na określenie szczególnie istotnych właściwości fizycznych i mechanicznych poklejonnych próbek, których wyniki opisano w pracy.

### 5.7. Prędkość propagacji fal ultradźwiękowych i soniczny moduł sprężystości w drewnie sosny

Zastosowanie nieniszczących metod oceny właściwości materiałowych drewna ma ogromne znaczenie dla przemysłu drzewnego. Klasyfikacja nieniszcząca polega na określeniu właściwości fizycznych i mechanicznych materiału bez redukcji jego zastosowania. Wyniki takie osiąga się poprzez badania nieniszczące mechaniczne. W badaniach naukowych potwierdzono również, że nieniszcząca ocena drewna stanowi narzędzie do zastosowania przemysłowego w celu poprawy kontroli jakości procesu oraz ujednorodnienia właściwości produktów. Ponieważ właściwości mechaniczne i sprężyste drewna mają w większości pozytywną korelację liniową, często łączy się lub stosuje zamiennie metody statyczne i dynamiczne.

Tabela 26. Prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w kierunku wzdłuż włókien drewna sosny ze strefy centralnej

Table 26. Velocity of propagation of ultrasonic waves in the direction along the grain in pine wood from the central zone

Pochodzenie próbek z nadleśnictwa The origin of samples from the forest district	Gęstość drewna Density of wood (kg/m <sup>3</sup> )			Prędkość ultradźwięku Ultrasound speed (m/s)			Odchylenie standardowe Standard deviation ±S (N/mm <sup>2</sup> )	Współczynnik zmienności Coefficient of variation V (%)
	min.	średnia average	max.	min.	średnia average	max.		
Barlinek	466	566	661	4386	5547	6511	243	4,38
Człuchów	466	551	645	4673	5503	5980	215	3,91
Borne Sulinowo	502	556	697	5053	5583	5887	179	3,21
Sulechów	424	557	661	4905	5582	5916	186	3,35
Iława	425	567	572	4476	5530	6996	264	4,78



W porównaniu do metody statycznej metoda dynamicznego modułu sprężystości obejmuje wykorzystanie wibracji, czasu propagacji fali ultradźwiękowej i metody pomiaru tłumień falowych. Kierunki te zostały uwzględnione w ramach opracowania przy zastosowaniu przyjętej w metodyce formy badań współczynnika prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych.

Rezultaty przeprowadzonych badań nad wpływem zróżnicowania strukturalnego drewna odniesiono do wartości wytrzymałościowych określonych w kolejnej metodzie badań nieniszczących, opartej na prędkości propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien. Metoda ta pozwala stwierdzić, że dźwięk rozprzestrzenia się w drewnie sosny z prędkością 5520-5580 m/s, wolniej w drewnie sosny o układzie stycznym przyrostów rocznych (5350-5530 m/s), a najwolniej w drewnie o układzie promieniowym (5420-5590 m/s). Uwzględniając gęstość badanych próbek drewna, można zauważyć, że dźwięk rozprzestrzenia się w drewnie bez korelacji z gęstością. Wniosek powyższy dokumentują wyniki zawarte w tabeli 26.

Powyższe spostrzeżenie jest jednak zbyt ogólne, ponieważ dotyczy wpływu tylko przeciętnej gęstości drewna z badanych próbek wielkowymiarowych sosny na analizowaną wielkość. W tym miejscu należy stwierdzić, że ten ogólny wniosek postawiony został w oparciu o badania próbek pozyskanych ze strefy drewna zarówno przyrzeniowego, jak i w granicach drewna przyobwodowego. W przyobwodowej części obszaru centralnego przekroju poprzecznego pnia gęstość drewna, a także wymiary elementów anatomicznych zmieniają się w niewielkim stopniu.

Można stwierdzić, że prędkość propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien zależy przede wszystkim od długości elementów poddawanych badaniom i rośnie wraz ze wzrostem ich długości. Stwierdzenie to jest oparte na ustaleniach literaturowych dotyczących wewnątrzgatunkowych związków omawianych wielkości (Dzbeński i Szymański, 1976; Dzbeński, 1984; Polge, 1984; Moliński i Fabisiak, 2002 i 2004; Marcinkowska, 2005; Roos i in., 2005; Wang, 2005). Stwierdzenie powyższe jest zgodne z badaniami Gibsona i Ashby'ego (1988, 1997) nad strukturą materiałów pianko-podobnych oraz naturalnych materiałów komórkowych, w tym drewna. W przypadku badań modułu sprężystości wzdłuż włókien prędkość propagacji jest taka sama, jak dla modułu ściany komórkowej. Prędkość propagacji stosowanych fal ultradźwiękowych w wzdłuż włókien drewna posiada zmienne wartości w obrębie tego samego gatunku.

Wyniki badań „sonicznego” modułu sprężystości wraz z podstawowymi parametrami statystycznymi zestawiono w tabeli 27. W celu ułatwienia analizy tych wyników w tabeli podano także przedziały gęstości badanych próbek z różnych powierzchni pobrania drewna. Analiza danych zawartych w tabeli wskazuje, że średnie wartości modułów sprężystości dynamicznej są wyższe od podawanych w literaturze przeciętnych wartości dla badanego gatunku (Kollmann i Côté, 1968; Wood Handbook, 1974; Krzysik, 1978). Mieszczą się jednak w przedziale wskazywanym w literaturze dla tej wielkości.

Związki dynamicznego (sonicznego) modułu sprężystości w kierunku wzdłużnym z gęstością badanych gatunków drewna potwierdzono w przeprowadzonych badaniach.

Analiza powyższych zależności wykazuje, że korelacja pomiędzy modułem sprężystości a gęstością drewna dla sosny jest istotna. Wzrost wartości modułu sprężystości pod wpływem gęstości drewna sosny wynika z faktu wpływu gęstości drewna (w analizowanym jej przedziale) na prędkość propagacji fal ultradźwiękowych.

Wyniki tej analizy pośrednio potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia niektórych autorów, że ocena wytrzymałości drewna na podstawie jego modułu sprężystości jest dokładniejsza aniżeli weryfikacja na podstawie pomiaru prędkości propagacji fal ultradźwiękowych (Negri, 1994; Diebolt i in., 2000; Duju i in., 2000). Potwierdzono związki pomiędzy modułem sprężystości drewna a jego gęstością, które są silniejsze aniżeli zależności między gęstością a prędkością propagacji fal ultradźwiękowych (wskazania na niewielki wpływ).

Tabela 27. „Soniczny” moduł sprężystości w kierunku wzdłuż włókien drewna sosny strefy centralnej  
Table 27. “Sonic” modulus of elasticity in the direction along the grain in the central zone of pine wood

Pochodzenie The origin of samples from the forest district	Gęstość drewna Density of wood (kg/m <sup>3</sup> )			„Soniczny” moduł sprężystości “Sonic” modulus of elasticity (N/mm <sup>2</sup> )					Odchylenie standardowe Standard deviation ±S (N/mm <sup>2</sup> )	Współczynnik zmienności Coefficient of variation V (%)
	min	średnia average	max	min	klasa class	średnia average	klasa class	max		
Barlinek	466	566	661	9053	C35	12 936	C30	16 148	1139	8,8
Człuchów	466	551	645	8807	C35	12 460	C30	15 362	1202	9,5
Borne Sulinowo	502	556	697	10 824	C50	12 885	C30	15 058	1015	7,87
Sulechów	424	557	661	8950	C35	12 956	C30	16 180	1367	10,55
Ława	425	567	725	7908	C27	12 922	C30	15 896	1454	11,25

Wyniki pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien w drewnie pochodzącym z obstawy bocznej (strefy przyobwodowe poprzecznego przekroju drewna okrągłego) sosny dla próbek wraz z zestawieniem gęstości tego drewna zaprezentowane zostały w tabeli 28. Z danych zawartych w tej tabeli wynika, że przeciętna gęstość tego drewna (543-551 kg/m<sup>3</sup>) jest zbliżona z przeciętną gęstością drewna strefy centralnej zarówno z próbek stycznych, jak i promieniowych (553-571 kg/m<sup>3</sup>). To niewielkie zróżnicowanie gęstości obydwu grup próbek drewna jest efektem wykorzystania do badań elementów o dużym przekroju poprzecznym (40 × 150 mm) oraz powiązania surowca pozyskiwanego z stref przyrdzeniowych i przyobwodowych. Te stosunkowo niewielkie różnice w gęstości porównywanych elementów drzewnych powodują, że przeciętna prędkość propagacji fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien w drewnie klejonym z tarcicy bocznej powinna być zbliżona do średniej wartości tej wielkości oznaczonej na drewnie litym.

Tabela 28. Prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w kierunku wzdłuż włókien w drewnie sosny z tarcicy obstawy bocznej

Table 28. Velocity of propagation of ultrasonic waves in the direction along the grain in pine wood from side board timber

Pochodzenie The origin of samples from the forest district	Gęstość drewna Wood density (kg/m <sup>3</sup> )			Prędkość ultradźwięku Ultrasound speed (m/s)			Odchylenie standardowe Standard deviation ±S (N/mm <sup>2</sup> )	Współczynnik zmienności Coefficient of variation V (%)
	min	średnia average	max	min	średnia average	max		
Człuchów	536	554	572	5412	5589	5673	209	3,74
Barlinek	529	571	600	5435	5582	5696	211	3,79
Borne Sulinowo	502	543	599	5468	5613	5771	170	3,02
Iława	533	563	596	4476	5566	5707	248	4,45
Sulechów	522	553	577	4905	5545	5916	187	3,37

Z analizy prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w funkcji gęstości badanych materiałów drzewnych wynika, że zależność ta nie jest liniowa i można ją opisać równaniem. Wynik tej analizy jest więc potwierdzeniem wcześniejszych spostrzeżeń co do nieliniowości związku badanych wielkości w obrębie pojedynczego gatunku drewna (Burmester, 1965; Moliński i Fabisiak, 2002).

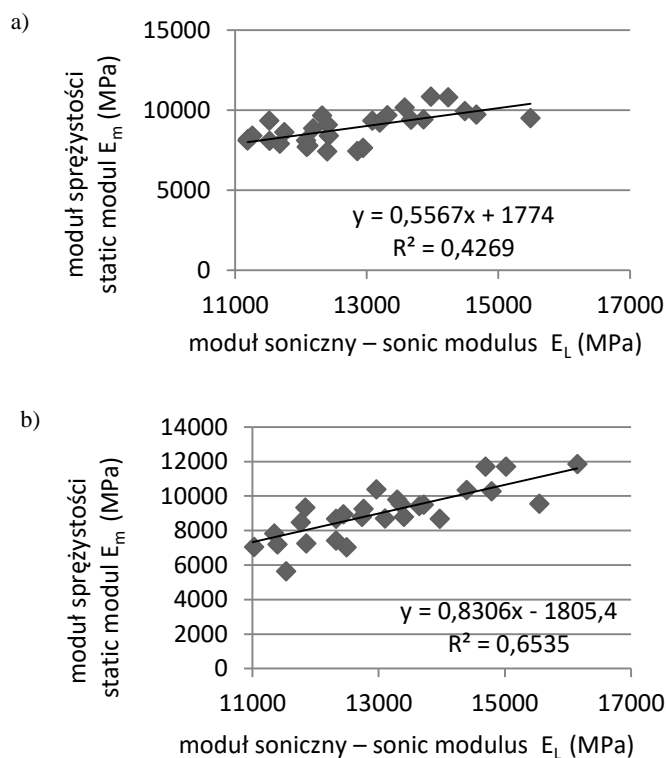
Tabela 29. „Soniczny” moduł sprężystości w kierunku wzdłuż włókien drewna sosny obstawy bocznej

Table 29. “Sonic” modulus of elasticity in the direction along the grain in side board timber

Pochodzenie The origin of samples from the forest district	Gęstość drewna Density of wood (kg/m <sup>3</sup> )			„Soniczny” moduł sprężystości “Sonic” modulus of elasticity (N/mm <sup>2</sup> )					Odchylenie standardowe Standard deviation ±S (N/mm <sup>2</sup> )	Współ- czynnik zmien- ności Coeffi- cient of varia- tion V (%)
	min.	śred- nia ave- rage	max	min.	klasa class	średnia average	klasa class	max.		
Człu- chów	536	554	572	12 023	C50	12 863	C30	13 464	1219	9,4
Barlinek	529	571	600	12 507	C50	13 215	C35	14 080	1065	8,1
Borne Sulino- wo	502	543	599	11 327	C50	12 718	C30	14 219	1089	8,6
Iława	533	563	596	8173	C30	12 972	C30	13 750	1411	10,8
Sule- chów	522	553	577	8950	C35	12 956	C30	16 180	1372	10,6

Zbiornicze wyniki obliczonego na podstawie pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych „sonicznego” modułu sprężystości klejonego drewna sosny zestawiono w tabeli 28. Różnica w wartościach modułu sprężystości porównywanych rejonów pozyskania próbek drzewnych jest niewielka, z wyjątkiem średnich wartości potwierdzonych dla surowca z Nadleśnictwa Sulechów ( $16180 \text{ N/mm}^2$ ), i można potwierdzić, że podłużny moduł sprężystości jest porównywalny w ocenie właściwości drewna z gęstością drewna i prędkością propagacji fal.

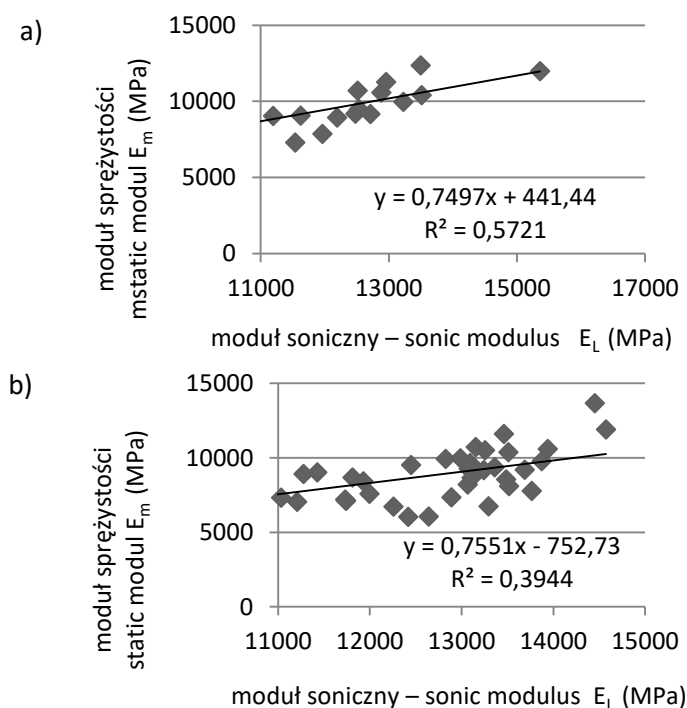
Z badań wynika, że wartość dynamicznego (sonicznego) modułu sprężystości wzrasta wraz ze wzrostem gęstości drewna. Zależność ta jest konsekwencją wcześniej prezentowanego związku pomiędzy prędkością propagacji fal ultradźwiękowych i gęstością drewna.



Ryc. 54. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga drewna litego sosny z Nadleśnictwa Barlinek: a) próbki o układzie stycznym, b) próbki o układzie promieniowym  
Fig. 54. Dependence of sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young's modulus of solid pine wood from the Barlinek forest district: a) tangential samples, b) radial samples

Dźwięk w drewnie klejonym rozchodzi się szybciej aniżeli w litej belce drewnianej. Powyższe porównania wskazują wpływ gęstości na kształtowanie się wskaźnika „sonicznego” modułu sprężystości. Podejmując się analizy badanego zjawiska, należy przyjąć, że gęstość drewna nie może być jednoznacznym wyznacznikiem prędkości rozchodzenia się wzdłuż włókien fal ultradźwiękowych.

Porównując średnie wartości zbadanego metodą wytrzymałościową modułu sprężystości i „sonicznego” modułu z analogicznymi danymi oznaczonymi dla drewna litego oraz klejonego, można stwierdzić, że moduł sprężystości drewna określony w badaniach wytrzymałościowych charakteryzował się niższymi wartościami w odniesieniu do wskaźników uzyskanych w badaniu z zastosowaniem metody wykorzystującej efekt propagacji fali akustycznej. Zauważalne jest także zmniejszenie wartości wskaźnika odchylenia standardowego w badaniach opartych na sonicznym module sprężystości. Powyższe ustalenia wydają się bardzo istotne przy wykorzystywaniu metody ultradźwiękowej do oceny technicznej drewna.



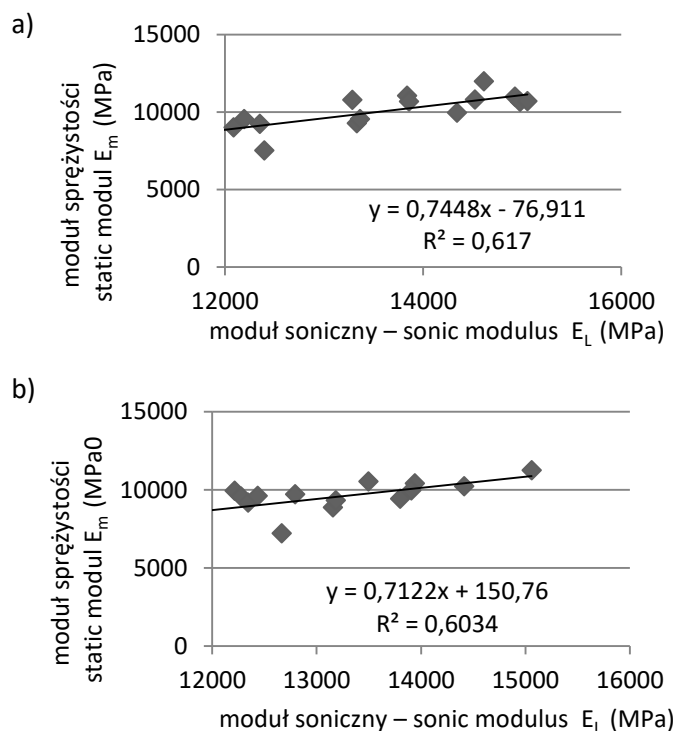
Ryc. 55. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga drewna litego sosny z Nadleśnictwa Człuchów: a) próbki o układzie stycznym, b) próbki o układzie promieniowym  
Fig. 55. Dependence of sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young's modulus of solid pine wood from the Człuchów forest district: a) tangential samples, b) radial samples

Dokonując oceny ustalonego wskaźnika modułu sprężystości dynamicznej według zasad klasyfikacji wytrzymałościowej PN-EN 338 (tab. 2), określono klasy wytrzymałości dla doświadczalnego surowca sosnowego. W spełnionych warunkach granicznych 5% kwantylu modułu sprężystości wzdłuż włókien tarcica strefy centralnej została zaklasyfikowana do klas od C27 do C50. Wartości średnie modułu sprężystości dynamicznej w tej strefie pochodzenia surowca zostały sklasyfikowane wyłącznie jako zgodne z klasą C30. Wyższe oceny w powyższej klasyfikacji uzyskał surowiec strefy przyobwodowej, mieszcząc się w klasach od C30 do C50 dla trzech badanych powierzchni. Wartości średnie modułu sprężystości w przypadku tarcicy bocznej w większości rów-

niez utrzymywały się w klasie C30 z wyjątkiem powierzchni II (Barlinek), gdzie tarcicy nadano klasę wytrzymałości C35.

Dokonując bezpośredniego porównania modułu dynamicznego (sonicznego) oraz statycznego modułu sprężystości dla tak zinterpretowanych wyników klasyfikacji wytrzymałościowej, można stwierdzić, że metody soniczne pozwalają na nadanie wyższych klas wytrzymałościowych tarcicy sosnowej. Wskaźniki spełniające warunki średnich modułów sprężystości w metodzie mechanicznej nieniszczącej pozwoliły na nadanie sortymentom tartym strefy centralnej klas C16-C22. Tarcica boczna spełniała średnie wymagania, przypisane dla klasy C14-C22. Tak zestawione wyniki potwierdzają znaczną różnicę w klasyfikacji wytrzymałościowej pomiędzy zastosowanymi metodami badań nieniszczących. Dla surowca strefy centralnej różnica ta, to aż trzy klasy wytrzymałościowe, a w przypadku tarcicy strefy przyobwodowej surowca z II powierzchni badawczej (Barlinek), są to rozbieżności na poziomie czterech klas wytrzymałościowych.

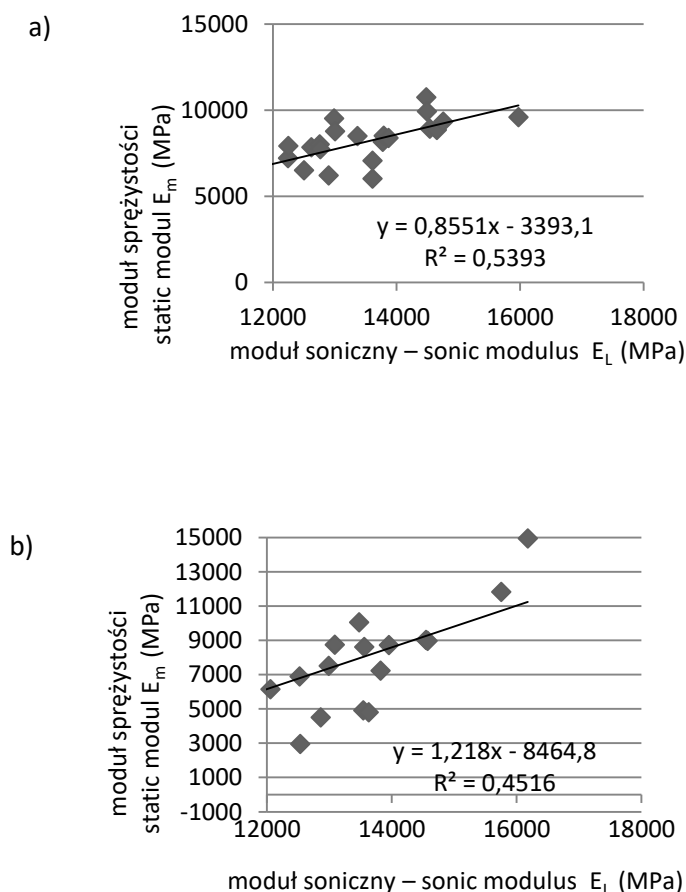
W analizie przedmiotowego problemu postanowiono dokonać porównawczego zestawienia wyników badań uzyskanych w ocenie prędkości propagacji fali akustycznej oraz w badaniach maszynowych nieniszczących z zastosowaniem czteropunktowego zginania. Wzajemne relacje badanych właściwości zaprezentowano na rycinach 54-58.



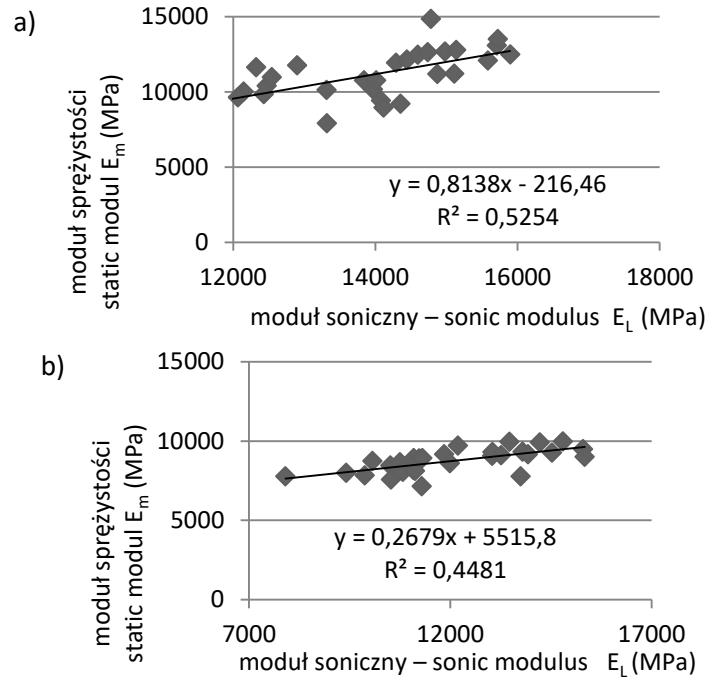
Ryc. 56. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga drewna litego sosny z Nadleśnictwa Borne Sulino: a) próbki o układzie stycznym, b) próbki o układzie promieniowym

Fig. 56. Dependence of sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young's modulus of solid pine wood from the Borne Sulino forest district: a) tangential samples, b) radial samples

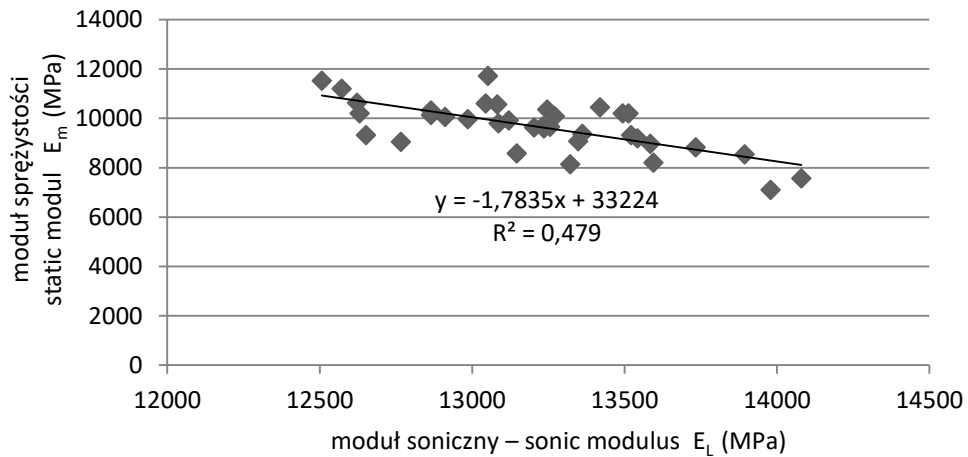
W odniesieniu do porównania właściwości tarcicy głównej z różnych rejonizacji, zweryfikowanych w dwóch odrębnych metodycznie badaniach modułu sprężystości, bezsprzecznie można zauważyć, iż wyniki „soniczne” uzyskują wyższe wartości aniżeli moduł odczytany w przypadku badań wytrzymałościowych pozyskanych na drodze testów mechanicznych. Jednocześnie widoczna jest tendencja do utrzymania wyższych wskazań modułu sonicznego, czego potwierdzeniem są dodatnie wartości współczynników kierunkowych dla tych wartości (zestawione na rycinach 55-59 w postaci równań liniowych). Wartości uzyskiwane w tym badaniu charakteryzują się mniejszymi wskazaniami współczynnika zmienności, niż miało to miejsce w porównaniu wskazań dla badanych próbek na maszynie wytrzymałościowej.



Ryc. 57. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga drewna litego sosny z Nadleśnictwa Sulechów: a) próbki o układzie stycznym, b) próbki o układzie promieniowym  
Fig. 57. Dependence of sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young's modulus of solid pine wood from the Sulechów forest district: a) tangential samples, b) radial samples



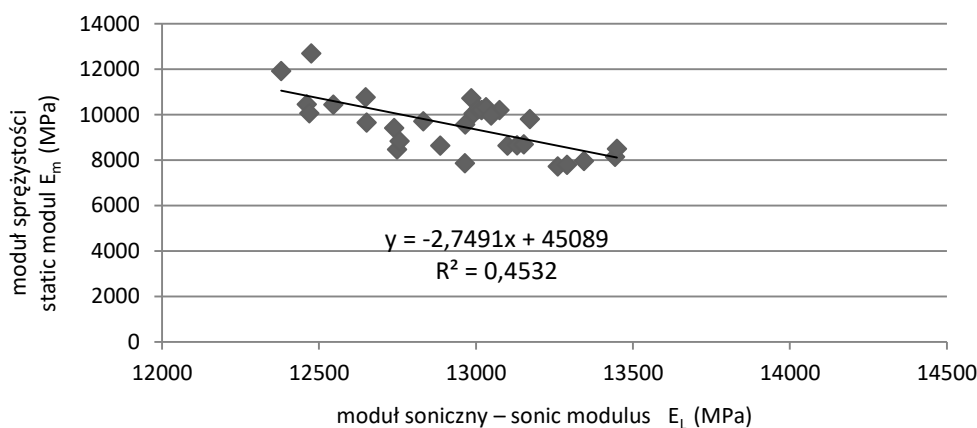
Ryc. 58. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga drewna litego sosny z Nadleśnictwa Ława: a) próbki o układzie stycznym, b) próbki o układzie promieniowym  
Fig. 58. Dependence of sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young's modulus of solid pine wood from the Ława forest district: a) tangential samples, b) radial samples



Ryc. 59. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga dla drewna obstawy bocznej z Nadleśnictwa Barlinek  
Fig. 59. Dependence of the sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young modulus for the wood of side guards from the Barlinek forest district

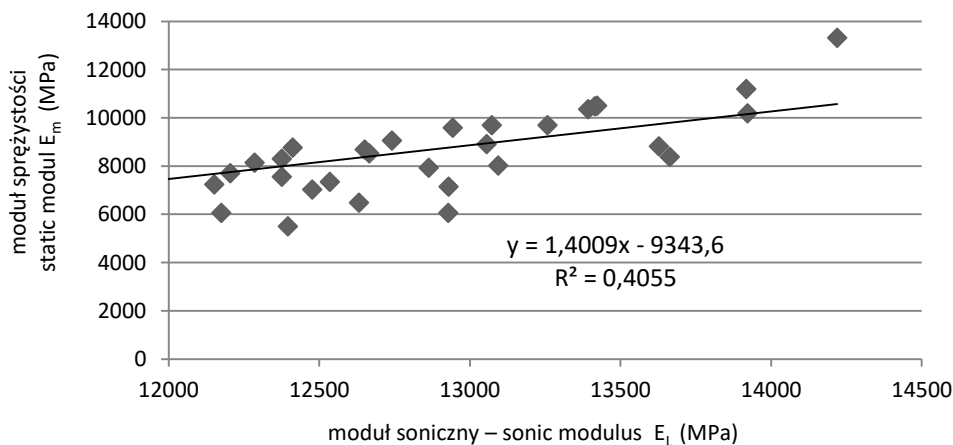


Dokonano również oceny sprężystości materiałowej dla wskazanych metodycznie badań modułu sprężystości drewna z obstawy bocznej (ryciny 60-63).



Ryc. 60. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga dla drewna obstawy bocznej z Nadleśnictwa Człuchów

Fig. 60. Dependence of the sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young modulus for the wood of side guards from the Człuchów forest district

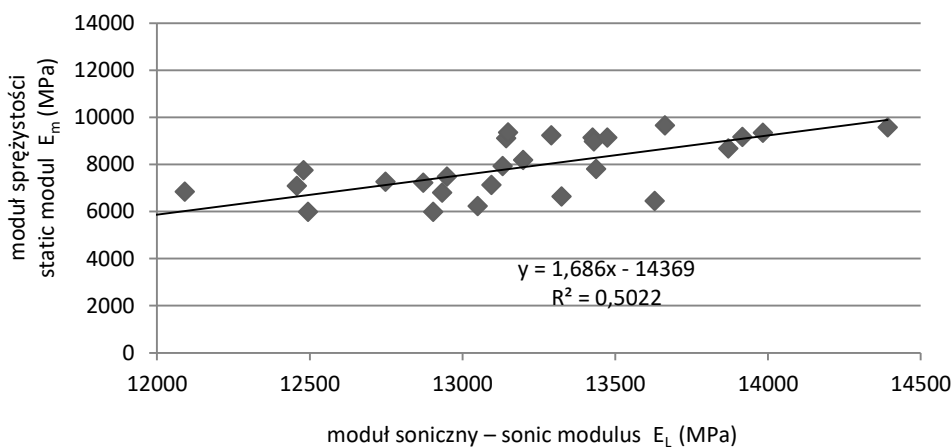


Ryc. 61. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga dla drewna obstawy bocznej z Nadleśnictwa Borne Sulinowo

Fig. 61. Dependence of the sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young modulus for the wood of side guards from the Borne Sulinowo forest district

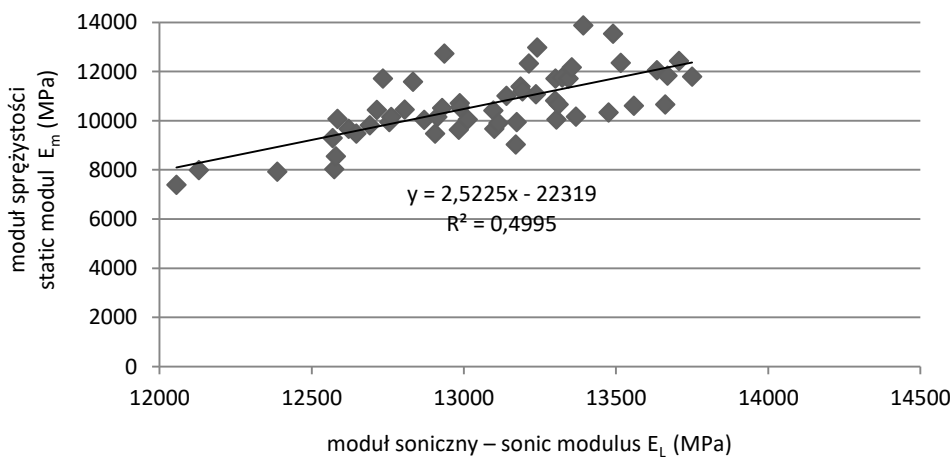
W odniesieniu do porównania wyników uzyskiwanych w odrębnych metodycznie badaniach modułu sprężystości dla drewna z obstawy bocznej (ryciny 60-63) zaobserwowano, iż wyniki „soniczne” uzyskują zbliżone wartości. Jednocześnie stwierdzono rozbieżność wskazań w przypadku badanego surowca pochodzącego z Nadleśnictwa Człuchów i Barlinek, gdzie wskazania modułu sonicznego posiadały odniesienie do

niższych wartości obliczonego modułu ustalonego w badaniach maszynowych. Wartości uzyskiwane w pozostałych nadleśnictwach wykazywały podobne tendencje skorelowanego wzrostu w obu wskazaniach badanej charakterystyki materiału zbieżne dla tarcicy głównej i bocznej.



Ryc. 62. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga dla drewna obstawy bocznej z Nadleśnictwa Sulechów

Fig. 62. Dependence of the sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young modulus for the wood of side guards from the Sulechów forest district



Ryc. 63. Zależność sonicznego modułu sprężystości od określonego mechanicznie modułu Younga dla drewna obstawy bocznej z Nadleśnictwa Hława

Fig. 63. Dependence of the sonic modulus of elasticity on the mechanically determined Young modulus for the wood of side guards from the Hława forest district

## 6. WNIOSKI

1. Potwierdzono liniową zależność udziału strefy twardzielowej w funkcji od średnicy badanych kłód sosnowych. Wzrost średnicy twardzieli  $d_{tw}$  jest proporcjonalny do zmiany średnicy kłód  $d$  i można go opisać wspólnym równaniem liniowym:  $d_{tw} = 0,6222d + 0,2215$ . Współczynnik determinacji  $R^2 = 0,8655$  wskazuje poziom zależności między liniowymi relacjami średnicowymi. Spośród badanych kłód sosnowych przeciętny udział objętościowy twardzieli mieścił się w przedziale 21-49%. Stwierdzono, że wzrost średnicy kłód wiąże się ze wzrostem udziału objętościowego strefy twardzielowej, którego trend mieścił się w granicach 35-43%. Zależność tę można przedstawić za pomocą funkcji  $U_{Vtw} = 0,29d + 29,01$ .
2. Pomimo względnie dużego zróżnicowania szerokości przyrostów rocznych badanego drewna sosny z terenów Polski Zachodniej średnia słoistość elementów litych kształtuje się na poziomie 2,2 mm, wykazując najmniejsze przyrosty w przyobwodowej części kłód (strefa bielasta). Elementy strefy przyobwodowej wykazywały znacznie mniejszy rozrzut szerokości przyrostów rocznych. Badane drewno sosny z wyznaczonych obszarów można zaliczyć do materiału wąskosłoistego.
3. Średni udział drewna późnego w badanym drewnie wszystkich powierzchni wyniósł około 36%, co może świadczyć o dobrych właściwościach wytrzymałościowych badanego drewna. Podobnie jak w przypadku słoistości największy udział drewna późnego, wynoszący 49%, zanotowano w elementach materiału głównego o stycznym przebiegu usłojenia.
4. Badane drewno sosny zwyczajnej o wilgotności 12% pozyskane z powierzchni doświadczalnych charakteryzuje się średnią gęstością  $560 \text{ kg/m}^3$ , która jest o około 10% wyższa od przyjętych wartości średnich dla tego gatunku. Zdecydowanie mniejsze zróżnicowanie średniej gęstości drewna zanotowano dla elementów strefy przyobwodowej.
5. Wskaźniki wydajności przyjęte do racjonalnego przerobu surowca sosnowego w przypadku przetarc zintegrowanych kształtują się w następujący sposób:
  - średnia wydajność materiałowa przetarcia jednokrotnego: 73%,
  - wydajność materiałowa przerobu wtórnego na etapie tarcica sucha – elementy konstrukcyjne lite ze strefy centralnej i klejone z wykorzystaniem tarcicy przyobwodowej wynosi odpowiednio: 55% i 52,5%,
  - rzeczywista wydajność materiałowa na etapie przerobu surowca sosnowego w przypadku produkcji elementów konstrukcyjnych ze strefy centralnej wynosi około 38%,
  - wydajność materiałowa na etapie przerobu wtórnego surowca sosnowego z tarcicy przyobwodowej (bocznej) na elementy konstrukcyjne kształtuje się na poziomie 40%.

6. Wyniki badań właściwości sprężystych materiału (ustalone metodą maszynową) świadczą o dużym zróżnicowaniu jakości surowca. Wyszczególniono elementy wielkowymiarowe tarcicy głównej w zależności od układu słoików w danej partii, wykazując różnice wartości modułu sprężystości. Średni moduł sprężystości elementów o promieniowym przebiegu słoików rocznych do płaszczyzny wynosił 8490 N/mm<sup>2</sup>. Wskaźnik sprężystości próbek promieniowych zawierających rdzeń wyniósł średnio 6452 N/mm<sup>2</sup>. Natomiast próbki o stycznym przebiegu włókien wskazywały poziom modułu 9241 N/mm<sup>2</sup>. Średnia wartość modułu dla wszystkich próbek strefy przyobwodowej wyniosła 9229 N/mm<sup>2</sup>.
7. Właściwości sprężyste elementów wielkowymiarowych powiązane z wynikami określonymi dla próbek laboratoryjnych różnią. Wyższe wyniki próbek laboratoryjnych może tłumaczyć większa jednorodność materiału i ograniczone występowanie anatomicznych wad drewna.
8. Na podstawie klasyfikacji normatywnej PN-EN 338 sosnowych elementów wielkowymiarowych strefy centralnej przekroju pnia, dla poszczególnych badanych powierzchni, uzyskano wyniki klasyfikacji wytrzymałościowej w zakresie od C16 do C22. Część materiałów nie spełniła wymagań normatywnych. Najniższe klasy sortownicze przypadają na próbki pozyskane ze strefy przyrdzeniowej. Z kolei najlepsze właściwości według kryteriów sortowania wykazały elementy styczne pozyskane z części centralnej kłód.
9. Moduł sprężystości sosnowych elementów wielkowymiarowych uzyskanych ze strefy przyobwodowej surowca pozwolił na dokonanie klasyfikacji wytrzymałościowej (PN-EN 338) w przedziale od C14 do C22. W badanych grupach elementów wielkowymiarowych stwierdzono równomierne wskazania klasyfikacyjne, co jest charakterystyczne dla materiałów o ujednoliconej budowie.
10. W dojrzałym drewnie badanych elementów konstrukcyjnych prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w kierunku wzdłuż włókien jest najwyższa w drewnie sosny klejonej. Uwzględniając jednak pochodzenie i właściwości drewna, w przypadku próbek klejonych należy wziąć pod uwagę wpływ spoin klejowych oraz udziału niewidocznych sęków na zmiany prędkości propagacji fali.
11. W odniesieniu do wyników uzyskiwanych w dwóch odrębnych metodycznie badaniach modułu sprężystości elementów wielkowymiarowych litych można zauważyć wyższe wyniki „sonicznego” modułu w odniesieniu do modułu sprężystości uzyskanego w maszynowym zginaniu próbek (3-4 klasy wytrzymałościowe).
12. W badaniach elementów ze strefy przyobwodowej zaobserwowano, że soniczny moduł sprężystości uzyskuje wyższe wartości aniżeli moduł stwierdzony w przypadku badań wytrzymałościowych maszynowych. Jednocześnie widoczna jest rozbieżność wskazań w przypadku badanego surowca pochodzącego z różnych powierzchni (nadleśnictw Człuchów i Barlinek), gdzie wyższe wyniki modułu sonicznego stwierdzono dla niższych wartości modułu potwierdzonego w badaniach maszynowych. Wartości uzyskiwane dla surowca w pozostałych nadleśnictwach wykazywały dodatnią współzależność porównywalnych wskazań właściwości materiału.

13. Uzyskane wyniki wskazują na dobre właściwości wytrzymałościowe drewna sosny zwyczajnej jako surowca konstrukcyjnego, a uzyskane z nich elementy klejone charakteryzują się właściwościami porównywalnymi do elementów z drewna litego.

Zaprezentowane badania służą pozyskaniu wiedzy koniecznej do ustalenia systemu oceny jakościowo-wytrzymałościowej klejonych materiałów drzewnych oraz elementów litych. Pozwalają one na określenie wpływu podstawowych czynników technologicznych w różnych etapach produkcyjnych na jakość pozyskanych produktów przerobu wraz z przyjętą klasyfikacją jakościową materiałów konstrukcyjnych. Wyniki opracowania przyczynią się do optymalizacji procesu wytwórczego, a jednocześnie zwiększenia efektywności przerobu drewna sosnowego na wysokiej jakości elementy konstrukcyjne. Przeprowadzenie doświadczeń praktycznych (przerobów eksperymentalnych z uwzględnieniem wpływu czynników technologicznych na wydajność materiałową pierwotnego i wtórnego przerobu surowca) pozwoliło na opracowanie danych technologicznej przydatności sosnowego surowca tartaczego z terenów Polski Zachodniej do produkcji określonych sortymentów konstrukcyjno-budowlanych o wymaganej jakości.

Dokonanie jakościowej analizy porównawczej poddanego przerobom surowca sosnowego dla celów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem pochodzenia z poszczególnych krain przyrodniczo-leśnych Polski, pozwoliło na pogłębienie dotychczasowej wiedzy na temat rodzimego drewna iglastego i jego przydatności dla budownictwa. Ocena przydatności surowca sosnowego została odniesiona do współczesnych wymagań normatywnych obowiązujących w Unii Europejskiej.

Ustalone wskaźniki wydajnościowo-jakościowe w odniesieniu do właściwości wytrzymałościowych elementów litych oraz klejonych pozwalają na poprawę efektywności i przydatności produkowanych obecnie elementów konstrukcyjnych dla budownictwa.

Uzyskana baza danych dotycząca ustalonych laboratoryjnie wskaźników jakości drewna sosnowego z uwzględnieniem geografii baz surowcowych w Polsce Zachodniej daje możliwość wykorzystania zawartej w niej wiedzy dla celów aplikacyjnych i optymalizacji produkcji w polskich zakładach drzewnych, co znacznie podwyższy ich konkurencyjność na rynku europejskim i światowym.

Porównawczy charakter przeprowadzonych analiz i dociekań uwzględniający badania nieniszczące może stanowić uzupełnienie wiedzy na temat klasyfikacji jakościowej tarcicy sosnowej litej i klejonej warstwowo z przeznaczeniem dla potrzeb budownictwa.



## 7. LITERATURA

Ajdukiewicz, A., Brol, J., Hulimka, J., Węglorz M. (2007). Awaria wielkopołaciowego dachu o konstrukcji drewnianej. Awarie budowlane 2007, XXIII Konferencja Naukowo Techniczna Szczecin – Międzyzdroje, 23–26 maja 2007.

Androsiuk, P., Kaczmarek, Z., Urbaniak, L. (2011). The morphological traits of needles as markers geographical differentiation in European *Pinus sylvestris* populations. *Dendrobiology* 65, 3–16.

Andrzejczyk, T. (2003). Różnowiekowe drzewostany sosnowe. Powstawanie, struktura, hodowla. Wyd. SGGW, Warszawa.

Andrzejczyk, T., Twaróg J. (1998). Wpływ cięć obsiewnych i przygotowania gleby na wzrost i rozwój nalotów sosny w Puszczy Augustowskiej. Pr. IBL. Ser. A. 843, 5–29.

Andrzejewski, R., Weigle, A. (2003). Różnorodność biologiczna Polski. Warszawa, Narodowa Fundacja Ochrony Środowiska.

Assmann, E. (1968). Nauka o produktywności lasu. PWRiL, Warszawa.

Augustin, M., Blaß, H.J., Bogensperger, T., Ebner, H., Ferk, H., Fontana, M., Frangi, A., Hamm, P., Jöbstl, R.A., Moosbrugger, T., Richter, A., Schickhofer, G., Thiel, A.B., Traetta, G. Uibel, T., BSP handbuch, (2010). Holz-Massivbauweisein Brettsperrholz – Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts, Verlag der Technischen Universität Graz.

Baltrušaitis, A. (2000). Investigation of influence of knots on short – and long – term strength of glulam beams. World Conference on Timber Engineering 2000.

Baño, V., Arriaga, F., Soilán, A., Guaita M. (2011). Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. *Biosystems Engineering* 109, 241–249.

Baño, V., Arriaga F., Guaita M. (2013). Determination of the influence of size and position of knots on load capacity and stress distribution in timber beams of *Pinus sylvestris* using finite element model. *Biosystems engineering* 114, 214–222.

Barnes, B. V., Zak, D. R., Denton, S. R., Spurr, S. H. (1997). *Forest ecology*. John Wiley & Sons., New York, Chichester, Weinheim.

Barzdajn, W., Drogoszewski, B., Zientarski J. (1992). Wzrost podrostów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) pod drzewostanami matecznymi w Nadleśnictwie Gubin. PTPN, Pr. Komis. Nauk Rol. Leś. 74, 17–27.

Barzdajn, W., Drogoszewski, B., Zientarski J. (1993). Struktura wielopokoleniowych drzewostanów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) w Nadleśnictwie Gubin. PTPN, Pr. Komis. Nauk Rol. Leś. 76, 11–22.

Barzdajn, W., Drogoszewski, B., Zientarski, J. (1996). Charakterystyka drzewostanu sosnowego (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłego pod okapem drzew matecznych. PTPN, Pr. Komis. Nauk Rol. Leś. 82, 15–25.

Baszeń, M. (2004). Model obliczeniowy elementów z otworami konstrukcji szkieletowych budynków drewnianych z poszyciem wraz z weryfikacją doświadczalną. Praca doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 2004.

Baumgartner, R., Brüchert, F., Sauter, U.H. (2010). Knots in CT scans of Scots pine logs. In *Proceedings of the Final Conference of COST Action E53: The Future of Quality Control for Wood & Wood Products*, Edinburgh, UK, 4–7 May 2010. Edited by D.J. Ridley-Ellis and J.R. Moore. Forest Products Research Institute/Centre for Timber Engineering, Edinburgh Napier University, Edinburgh, UK. 343–351.

Bejder, A.K., Kirkegaard, P.H., Fisker, A.M. (2010). On the architectural qualities of cross laminated timber. Ed. P.J.S. Cruz, Taylor & Francis Group, London, 119–121.

Bejder, A.K., Kirkegaard, P.H., Wraber, I.K., Falk, A. (2012). The materiality of novel timber architecture – developing a model for analysing and evaluating materials in architecture, *Architectural and Planning Research*.

Bejder, A.K., Kirkegaard, P.H., Wraber, I.K., Falk, A. (2011). The materiality of novel timber architecture – based on a case study analysis of Cross-Laminated Timber, *ARQ: Architectural Research Quarterly*.

Bell, V.B. (2006). *Materials for Architectural Design*, Laurence King, England.

Berglund, A., Broman, O., Grönlund, A., Fredriksson, M. (2013). Improved log rotation using information from a computed tomography scanner. *Comput Electron Agric* 90, 152–158.

- Białobok, S., Boratyński A., Bugała W. (1993). *Biologia sosny zwyczajnej*, PAN , Poznań-Kórnik s. 45–66.
- Bindzi, I., Sampson, M., Kamoso, L.M. (1996). Modélisation géométrique d'une bille de bois. *Ann. Sci. For.* 53: 21–30.
- Blass, H.J., Romani, M. (2001). Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59, 364-373.
- Bodig, J., Jayne, B., (1982). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Company, New York Cincinnati Toronto London Melbourne.
- Bogacz, W., Lis, Z., Łodygowski, T., Rapp, P. (2007). Badania i obliczenia belek drewnianych wzmocnionych wklejanymi taśmami w włókien węglowych. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 10, 541–544.
- Bogensperger, T., Augustin, M., Schickhofer, G. (2011). Properties of CLT panels exposed to compression perpendicular to their plane, *Proceedings of the 44th meeting of CIB-W18, Alghero, Italy*.
- Boiński, M. (1985). *Szata roślinna Borów Tucholskich*, PWN, Warszawa-Poznań-Toruń.
- Borowski, M. (1974). *Przyrost drzew i drzewostanów*. PWN, Warszawa.
- Borri, A., Corradi, M., (2011). Strengthening of timber beams with high strength steel cords, *Composites: Part B*, 42, 1480–1491.
- Bos, H. (2004). The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials. *Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven*.
- Boutelje, J.B. (1966). On the anatomical structure, moisture content, density, shrinkage, and resin content of the wood in and around knots in Swedish pine (*Pinus sylvestris* L.) and in Swedish spruce (*Picea abies* Karst.) *Sven. Papperstidn.* 69(1), 1–11.
- Brandner, R. (2014). Production and technology of cross laminated timber (CLT): state-of-the-art report, COST Action FP1004, Focus Solid Timber Solutions, European Conference on Cross Laminated Timber, 2nd Edition, Graz, Austria, 3–36.
- Brandner, R., Schickhofer, G. (2008). Glued laminated timber in bending: new aspects concerning modeling. *Wood Science and Technology*, 42(5), 401–425.
- Brandner, R., Schickhofer, G. (2010). Glued laminated timber in bending: thoughts, experiments, models and verification, 11 th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Riva del Garda, Italy, 2010, 11.
- Brandner, R., Schickhofer, G. (2012). SSTC1.1.2-5clt panel pressdruck: Untersuchungen betreffend der Definition eines für die Produktion von Brettsperrholzoptimalen Pressdruckes. Research Report, Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Competence Centreholz. Bauforschungs gmbh, 76.
- Brol, J. (2005). Analiza doświadczalno-teoretyczna wzmocnienia konstrukcji drewnianych kompozytami polimerowo-węglowymi. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice.
- Brutovská, E., Sámelová, A., Dušička, J., Mičiet, A.K. (2013). Ageing of trees: application of general ageing theories, *Ageing Research Reviews* 12(4): 855–66.
- Buchholz, J., Hruzik, J.G. (1973). Wpływ jakości sosnowego drewna tartaczego na strukturę jakościowo-wymiarową produkowanych kłód. *Pr. Kom. Techn. Drewna t. IV*.
- Buchholz, J. (1975). Jakość sosnowego drewna tartaczego jako kryterium dojrzałości technicznej drzew i drzewostanów. *Roczniki AR Poznań. Rozprawa hab. nr 55*.
- Buchholz, J. (1984). Wpływ wieku na jakość techniczną drewna sosnowego. *Folia Forestalia Polonica Seria B, zeszyt 15*.
- Buchholz, J., Hruzik, G.J. (1981). Jakość techniczna sosnowego drewna tartaczego reprezentującego drzewostany boru mieszanego świeżego. *PTPN, Prace Komisji Technologii Drewna nr 10, 3-12*.
- Buchholz, J., Hruzik, J.G. (1970). Z badań nad ustaleniem wymiernej zależności pomiędzy jakością sosnowego drewna tartaczego i produkowanych z niego materiałów tartych. *Rocznik WSR, Poznań*.
- Buchholz, J., Hruzik, J.G., Meyer, B. (1990). Badania wybranych właściwości sosnowego drewna tartaczego pochodzącego z baz surowcowych objętych szkodami leśnymi. *Folia Forest Polonica, Seria B, zeszyt 21, Poznań*.



- Buczowski, W. (2000). Budownictwo ogólne. Tom 1. Materiały i wyroby budowlane, Arkady, Warszawa.
- Buczowski, W. (2010). Budownictwo ogólne. Tom 4, Konstrukcje budynków. Arkady, Warszawa.
- Bulleit, W.M. (1984). Reinforcement of wood materials. *Wood and Fiber Science* 16 (3), 391-397.
- Burawska, I. (2012). Badania zmian wytrzymałości osłabionych drewnianych belek zginanych przy ich wzmocnieniu włóknem węglowym. Praca magisterska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Burawska, I., Jachowicz, P., Zbieć, M., Grześkiewicz, M. (2014). Local reinforcement of naturally defected structural lumber. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology* 87, 25–34.
- Burawska, I., Mohammadi, A.H., Widmann, R., Motavalli, M. (2015a). Local reinforcement of timber beams using D-shape CFRP strip. *SMAR – Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*. Antalya, Turcja.
- Burawska, I., Tomusiak, A., Beer, P. (2011). Influence of the length of CFRP tape reinforcement adhered to the bottom part of the bent element on the distribution of normal stresses and on the elastic curve. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology* 73, 186–191.
- Burawska, I., Tomusiak, A., Zbieć, M., Beer P. (2012a). Reducing the compact of knots on the static work of bent wooden beams by local reinforcement with CFRP strip. *Structural analysis of historical constructions. Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2012, 15–17 October 2012, Wrocław, Poland, 1098–2003.*
- Burawska, I., Zbieć, M., Beer, P. (2012b). Study of peel and shear strength of adhesive joint between pine wood and CFRP tape. *Chip and chipless woodworking processes. The 8th International Science Conference. Technical University in Zvolen. September 6–8, 35–40.*
- Burawska, I., Zbieć, M., Kaliciński, J., Beer P. (2013a). Technical simulation of knots in structural wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology* 82, 105–112.
- Burawska, I., Zbieć, M., Mamiński, M., Beer P. (2013b). Bonding quality of wood with selected reinforcing materials. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology* 82, 113–117.
- Burawska, I., Zbieć, M., Tomusiak, A., Beer P. (2015b). Local reinforcement of timber with composite and lignocellulosic materials. *BioResources* 10 (1), 457–468.
- Burmester, A. (1965). Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. *Holz als Roh- und Werkst.* 6, 227-236.
- Burmester, A., (1967). Nachweis von Ästen in Kieferholz. *Holz als Roh- und Werkst.* 25, 157-163.
- Büyüksarı, Ü., As, N., Dündar, T. (2017). Mechanical Properties of Earlywood and Latewood Sections of Scots Pine Wood. *Bio Resources* 12/2, 4004-4012.
- Ceccotti, A. (2010). *Cross Laminated Timber Introduction to Seismic Performance*, Trees and Timber Institute IVALSAs-CNR National Research Council, Italy. Available at [www.bcwood.com/resources/cross-laminated-timber-symposium-presentations](http://www.bcwood.com/resources/cross-laminated-timber-symposium-presentations).
- Cedro, A., Cedro, B. (2018). Influence of climatic conditions and air pollution on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Szczecin's city forests. *Leśne Prace Badawcze / Forest Research Papers, Czerwiec / June 2018, Vol. 79 (2).* 105–112.
- Cegiel, E., Hruzik, G.J. (1974). Przydatność tarcicy jodłowej do produkcji półfabrykatów przeznaczonych. *Przemysł Drzewny* nr 4. Poznań.
- Central Mortgage and Housing Corporation (1994). *Canadian Wood-Frame House Construction*. Wer. Polska: „Kanadyjski szkieletowy dom drewniany”, wyd. Murator, Warszawa.
- Centrum Budownictwa Szkieletowego (2004). *Katalog budownictwa drewnianego 2004*. CBS, Gdańsk.
- Chang, S.J., Gazo, R. (2009). Measuring the effect of internal log defect scanning on the value of lumber produced. *For Prod J* 59, 56–59.
- Chmielowski, J., Kozakiewicz, P., Buraczyk, W. (2018). Variability of annual rings and density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood of Bolewice origin from the provenance surface in Rogów. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No 102, 11–15.

- Cierniewski, M. (1981). Wyniki badań proveniencyjnych nad sosną zwyczajną, *Las Polski* 55(24), 7–9.
- Cierniewski, M., Giertych, M. (198). Pol'skie rasy sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v geograficeskich opytach. *Geograficeskie opyty v lesni selekcii Pribaltiki*. 105–119.
- Colling, F. (1990). Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1990, 205.
- Colling, F., Ehlbeck, J. (1992). Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im Holzleimbau, *Bauen mit Holz*, 94(7), 586-593.
- Critchfield, W.B., Little, E.L. (1966). Geographic distribution of the Pines of the World. U.S. Dep. Of Agric. Forest Serv., Misc. Publ. 991, Washington.
- Czechowicz, J. (1960). Konstrukcje drewniane klejone. *Arkady*.
- Czerwiński, T. (2006). *Budownictwo ludowe w Polsce*, Wydawnictwo Sport i Turystyka – MUZA SA, Warszawa.
- Cziesielski, M. (1974). Timber roof structures, multi-layer composite structure of boards & beams.
- Czubiński, Z. (1950). *Zagadnienia geobotaniczne Pomorza. Badania fizyczne nad Polską Zachodnią*, PWN, Warszawa 1950.
- Czuczelo, K. (2005). Badanie drewna klejonego warstwowo z tarcicy sosnowej sortowanej wytrzymałościowo. Praca doktorska. Warszawa.
- Czuczelo, K., Dzbeński, W. (2004). Wpływ jakości wytrzymałościowej tarcicy na właściwości elementów klejonych warstwowo. VI Konferencja Naukowa Wydziału Budownictwa i Architektury; Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin (s. 35–42).
- Diebolt, J., El-Aroui, M. A., Durbec, V., Villain B. (2000). Empirical tools for methods assessment and comparison. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* Vol. 07 (01), 75–94.
- DIN 1052-10:2012 Design of timber structures – part 10: additional provisions.
- DIN EN 1927-2:2008-06 Qualitäts-Sortierung von Nadel-Rundholz – Teil 2: Kiefern.
- Dinwoodie, J.M. (1981). *Timber it's nature and behaviour*. Van Nostrand Reinhold. New York etc.
- Drelich, R., Karczmarek, M., Kubik, J., (2003). Propagacja fal ultradźwiękowych w drewnie jako naturalnym kompozycie. *Annals of Warsaw Agricultural University SGGW, Forestry and Wood Technology* No 53, Warszawa.
- Drozdowski, S. (2002). Wpływ różnych sposobów przygotowania gleby na wyniki naturalnego odnowienia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Acta Sci. Pol. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 1(1): 27–34.
- Duchateau, E., Longuetaud, F., Mothe, F., Ung, C., Auty, D., Achim, A. (2013). Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. *Can. J. For. Res.* 43(3): 266–277.
- Duda, J. (1975). Rozmieszczenie i wielkość niektórych wad drewna w odziomkowych częściach 100-letnich drzew sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Maszynopis. Katedra Użytkowania lasu AR, Poznań*.
- Duju, A., Nakai, T., Nagao, H., Tanaka, T. (2000): Nondestructive evaluation of mechanical strength of sarawak timbers. Proc.12th Internat. Symp.on “Nondestructive testing of wood. Sopron, Hungary. 13-15 Sept., 131–137.
- Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich 89/106/EWG z 21 grudnia 1988 r.
- Dzbeński, W. (1978). *Metody kontroli jakości drzewnych materiałów konstrukcyjnych: wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo SGGW – Warszawa.
- Dzbeński, W. (1984). *Nieniszczące badania mechanicznych właściwości iglastej tarcicy konstrukcyjnej wybranymi metodami statycznymi i dynamicznymi (rozprawa habilitacyjna)*. Wyd. SGGW-AR, Warszawa.
- Dzbeński, W. (1994). *Normalizacja w polskim drzewnictwie na tle wymagań europejskich. Przemysł Drzewny 10/1994*.
- Dzbeński, W. (1995). *Polska tarcica budowlano-konstrukcyjna na tle wymagań europejskich. IX Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW, Warszawa*.

- Dzbeński, W., Czuczelo, K. (2000). Dobór tarcicy konstrukcyjnej na warstwowo klejone dźwigary budowlane. XIV Konferencja naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW; Wydawnictwo Fundacja „Rozwój SGGW”; Warszawa (s. 26–30).
- Dzbeński, W., Korczewski, A.O. (1973). Wpływ prawodawstwa leśnego na zaopatrzenie przemysłu drzewnego w surowiec tartaczny. *Przemysł Drzewny* nr 4/1973.
- Dzbeński, W., Kozakiewicz, K., Krzosek, S. (2005). Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy budowlano-konstrukcyjnej. Warszawa.
- Dzbeński, W., Szymański, J. (1976). Zastosowanie ultradźwięków do pomiaru długości cewek w drewnie sosnowym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 185, 229–240.
- Dziarnowski, Z., Michniewicz, W. (1974). Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Arkady, Warszawa.
- Dziewanowski, R. (1961). Analiza porównawcza jakości tartaczno-drewna sosnowego Krainy Mazursko-Podlaskiej na tle kolei rębności. *Sylwan* 4, Poznań 1961, 31–54.
- Dziewanowski, R. (1964). Uzasadnienie podstawowych założeń przyjętych w projekcie polskiej normy na sosnowe i modrzewiowe drewno tartaczne. *Przemysł Drzewny*. Zeszyt 8, Poznań.
- Dziewanowski, R. (1965). Analiza porównawcza jakości sosnowego drewna tartaczno-drewna z niektórych rejonów kraju. *Prace Instytutu Technologii Drewna*. Zeszyt 1, Poznań.
- Dziewanowski, R. (1967). Zarys rejonizacji jakościowej sosnowego drewna tartaczno-drewna w Polsce. *Prace Instytutu Technologii Drewna*, Rok IV, Zeszyt 4(44), PWN, Poznań.
- Dziewanowski, R. (1968). Propozycja nowych zasad sortowania sosnowych kłód tartacznych. *Przemysł Drzewny* nr 1, 1–5.
- Epsten, B. (1998). Szwedzkie budownictwo szkieletowe. *Lekkie Budownictwo Szkieletowe* nr 14, Zakłady Graficzne Atex, Gdańsk.
- Espinoza, O., Trujillo, V. R., Laguarda, Mallo, M. F., Buehlmann, U. (2016). Cross-laminated timber. *Bio Resources* 11 (1), 281–295.
- Fabisiaik, E. (2005). Zmienność podstawowych elementów anatomicznych i gęstości drewna wybranych gatunków drzew. *Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe*, Zeszyt 369, Poznań.
- Fabisiaik, E., Moliński, W. (2009). Variation in the microfibril angle in tangent walls of tracheids in individual Anna rings of intermediate pine trees (*Pinus sylvestris* L.). *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No 68, 231–239.
- Fabisiaik, F., Moliński, W., Roszyk, E. (2007). The propagation velocity of ultrasound waves along the grain in the juvenile and mature, normal and reaction wood of pine (*Pinus sylvestris* L.). *Ann. WULS – SGGW, For. and Wood Technol.*, 61, 200–206.
- Falk, A. (2011). Cross-laminated timber plate tensegrity and folded roofs. *Wood for Good – innovation in timber design and research.*, ed. Larsen, Olga Popovic and Lee, Daniel Sang-Hoon, The Royal Danish Academy of Fine Arts, 91–107.
- Farruggia, F., Perre', P. (2000). Microscopic tensile test in the transverse plane of early wood and latewood parts of spruce. *Wood Sci. Technol.*, 34.
- Flindt, R. (2006). *Amazing Numbers in Biology*. Springer Verlag, 2006.
- Fojutowski, A. (2002). Środki do zabezpieczania drewna. *Materiały Budowlane*, 12 (364), 3–5.
- Fojutowski, A., Kropacz, A. (2003). Działanie ochronne środków dekoracyjno-impregnacyjnych w badaniach laboratoryjnych, *Materiały VII Sympozjum „Ochrona obiektów budowlanych przed korozją i ogniem”*, 10s/A/2003, wyd. PSMB, 50.
- Freas Alaen, D. (1949). Summary Studies of The Strength of Glued Laminated Wood Construction. United States Department of Agriculture Forest Service Forest products Laboratory, Madison 5, Wisconsin, August 1949.
- Frühwald, K. (2006). Von Pfahlbau zum Passivhaus. Aktuelle Entwicklungen im konstruktiven Holzbau. *Proc. 11<sup>th</sup> Innovationen für die Welt des Klebens*. Detmold, 10.
- Ganowicz, R. (1982). Zastosowanie teorii procesów losowych do opisu pełzania tworzyw konstrukcyjnych, Reologia drewna i konstrukcji drewnianych – Sympozjum Akademii Rolniczej w Poznaniu, materiały, Zielonka 21–22 października 1982.
- Ganowicz, R., Guzenda, R. (1996). Destrukcyjny wpływ zmian wilgotności otoczenia na drewniane warstwowo klejone konstrukcje. *Sympozjum naukowe. Mat. Symp. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*.

- Gazeta Przemysłu Drzewnego (2009). Materiały tarte. Wyd. Inwestor, dodatek – wrzesień, Tczew 2009.
- Geographic distribution of the pines of the world (1966). USDA Forest Service Misc. Publ. 991, Madison.
- Gerhards, C.C. (1975). Effect of early wood and latewood on stress-wave measurements parallel to the grain. *Wood Sci. and Technol.*, 11(2), 69–72.
- German, J. (2000). Materiały kompozytowe w budownictwie. *Kalejdoskop Budowlany*, 6, 14–17.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1988). *Cellular solids. Structure and properties*. Pergamon Press. Oxford, New York.
- Gieffing, D.F., Jabłoński, K. (1989). Zależność między gęstością a wilgotnością drewna żywych sosen [The relationship between the density and humidity of wood of living pines], *Sylwan* 133(1–2), 75–82.
- Gierliński, T. (1961). Dojrzałość techniczna drzewostanów jako podstawa do ustalania wieku rębności. *Las Polski*, 13–14.
- Giertych, M. (1986). Provenance variation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on a 46-years old international experiment in Poland. *Arbor. Kórnickie* 31: 183–193.
- Giertych, M., Oleksyn, J. (1981). Summary of results on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) volume production in Ogijevskij sprerevolutionary Russian provenance experiments. *Silvae Genetica* 41 (3): 133–143.
- Gieruszyński, T. (1961). Przyrost bieżący jako podstawa oznaczenia kolei rębności drzewostanów sosnowych na Pojezierzu Mazurskim. *Sylwan* 105 (4), 11–20.
- Glos, P. (1982). Die maschinelle Sortierung von Schnittholz. *Stand der Technik – Vergleich der Verfahren*. Holz-Zenterblatt 13.
- Glos P., Diebold R. (1997). Aktuelle Entwicklungen in Bereich der Holzsortierung. *Holz-Zenterblatt Special*.
- Główny Urząd Statystyczny (2017). *Roczniki zestawień statystycznych*.
- Gonet, B. (1991). Reologiczne właściwości drewna. *Przemysł Drzewny* nr 3/1991, 3–5.
- Gos, B. (1996). Wybrane kleje poliocetanowinytowe do klejenia drewna warstwowego z tarci. *Mat. Symp. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*. Szczecin-Międzyzdroje, 1996 (s. 89–95).
- Gren, J. (1982). *Statystyka matematyczna modele i zadania*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Guertin, M., Arnold, R. (2001). *Precision Framing*. The Taunton Press, Newtown – USA 2001.
- Gumiński, R. (1948). Próba wydzielenia dzielnic rolniczo-klimatycznych w Polsce. *Przeegl. Meteorol.-Hydrol.* 1,1.
- Guzenda, R. (2004). *Prognozowanie i ocena zmian wilgotności w konstrukcjach drewnianych*. Arkady, Poznań.
- Guzera J. (1976). Drewno klejone w zastosowaniu. *Przemysł Drzewny* nr 7/1976, 28–32.
- Hansen, H.J. (1971). *Architecture in wood. A History of wood building and its techniques in Europe and North America*. Wydawnictwo Faber and Faber, Londyn.
- Helińska-Raczkowska, L., Fabisiak, E. (1992). Zmienność gęstości drewna sosny z drzew należących do grupy tzw. Rozpieraczy. *Prace Komisji Technologii Drewna*, 13, 41–49.
- Herzog, T., Natterer, Schweitzer, R. (2003). *Holzbau Atlas*. Birkhäuser, Edition Detail, München.
- Hruzik, J.G. (1979). Jakość sosnowego surowca tartaczno jako kryterium optymalizacji produkcji elementów przeznaczonych. *Fol. Forest Polonica*, zeszyt 13.
- Hruzik, J.G. (1993). Technologiczna optymalizacja przerobu drewna na materiały tarte i półfabrykaty przeznaczonych. *Zeszyt AR236*, Poznań.
- Hruzik, J.G. (2001a). Efektywność przerobu drewna w małych i średnich zakładach tartacznych. *Wood & Paper Review*, styczeń/luty 2001, Warszawa.
- Hruzik, J.G. (2001b). Efektywność przerobu tartaczno iglastego drewna wielkowymiarowego. *Intercathedra* 17., 58–64.
- Hruzik, J.G. (2006). Zużycie surowców i materiałów drzewnych w wyrobach przemysłu tartaczno. *Drewno – Wood* 2006, vol 49, nr 175, Poznań.

Hruzik, J.G., Gotycz, W., Wieruszewski, M. (2005). Efektywność produkcji przykładowych wyrobów tartacznych na rynek krajowy i europejski. *Przemysł Drzewny*, maj 2005, Wyd. Świat, Warszawa.

<http://konsbud.com/zdaniem-ekspertow/normy-drewno-konstrukcyjne-iglaste.html>

[http://sloownik.ekologia.pl/116\\_Encyklopedia\\_lesna/](http://sloownik.ekologia.pl/116_Encyklopedia_lesna/) (03.01.2019)

<http://www.altax.pl/ksiega/141-ksiga-drewna/137-sosna#dal> (03.01.2019)

[http://www.apawood.org/level\\_b.cfm?content=prd\\_glu\\_main](http://www.apawood.org/level_b.cfm?content=prd_glu_main) )

[http://www.srodowiskowa.pl/panel/dane/plik\\_101-17.pdf](http://www.srodowiskowa.pl/panel/dane/plik_101-17.pdf), (03.01.2019)

Ilmurzyński, E., Mierzejewski, W. (1956a). Badania wartości hodowlanej istniejących samosiewów sosny pospolitej. *Sylvan* 100 (1): 75–84.

Ilmurzyński, E., Mierzejewski, W. (1956b). Badania możliwości wykorzystania starszych odnowień podokapowych sosny. *Sylvan* 100 (3): 72–84.

Issa, C.A., Kmeid, Z. (2005). Advanced wood engineering: glulam beams. *Construction and Building Materials*, Volume: 19, March, 2005 s. 99–106.

Iwanow, W.A. (1956). *Dieriewiannyje konstrukcii*. Gosudarstwennoje Izdatielstwo Literatury po Stroitelstwie i Architekturie, Leningrad, 1956.

Jackowski, J. (1972). Badanie zależności pomiędzy szerokością słoje rocznych, a jakością drewna w drzewostanach sosnowych Niziny Szczecińskiej. *Fol. Forest. Polonica*, B, zeszyt 11, 1972.

Jacquin, P., Longuetaud, F., Leban, J.M., Mothe, F. (2017). X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. *Dendrochronologia* V. 42, 42–5.

Jasięko, J. (2001). Glue joints for reinforcing the damaged ends of wooden beams. *Structural Engineering International*, No. 4, 246–250.

Jasięko, J. (2002). Experimental investigation into the force distribution in glued steel bar and wood joints. *Archives of Civil Engineering*, XLVIII, 1, 93–108.

Jasięko, J. (2003). *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.

Jasięko, J., Engel, L., J., Rapp, P. (2006). Study of Strains and Stresses in Historical Carpentry Joints. V International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006, 375–384.

Jasięko, J., Nowak, T., Rapp, P. (2009). Analysis of static work of wooden beams strengthened with CFRP strips. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2009, Vol. 26, 314–324.

Jaworski, A. (1995). *Charakterystyka hodowlana drzew leśnych*. Gutenberg, Kraków.

Jeitler, G., Katzengruber, R., Schickhofer, G. (2007). Zapewnienie jakości tarcicy łączonej na wcepy klinowe. *Gazeta Drzewna* 2007, t. 10 (4), 38.

Jelonek, T. (2013). Biomechaniczna stabilność drzew a wybrane właściwości fizyczne, mechaniczne i strukturalne ksylemu sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej w warunkach gruntów porolnych i leśnych *Rozprawy naukowe* 455 w Poznaniu.

Jelonek, T., Pazdrowski, W., Tomczak, A. (2009). Właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na gruntach porolnych w północnej Polsce. *Leśne Prace Badawcze*, 70(3), 277–286.

Jelonek, T., Pazdrowski, W., Walkowiak, R., Tomczak A. 2012. Modelling needle biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands on former farmland and forest soils. *Forest Research Papers* 73 (2), 97–106.

Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., Grzywiński, W. (2015). The effect of tree senescence on selected properties of wood tissue in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology* Nr 92, 153–160.

Jelonek, T., Gzyl, J., Arasimowicz-Jelonek, M., Tomczak, A., Remlein, A. (2016). Wpływ wybranych wskaźników stabilności drzew na grubość ścian cewek u sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.*, 15(1), 13–21.

Jeruzal, J., Kozłowska, J., Szer J. (2000). Diagnostyka dźwigarów z drewna klejonego warstwowo. IX Konferencja Naukowo-Techniczna, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, Wrocław-Szklarska Poręba, 229–235.

Kalinowska, A. (1993). System budownictwa modułowego. Artykuł zamieszczony w dwumiesięczniku „Lekkie Budownictwo Szkieletowe” nr 26, Zakłady Graficzne Atex, Gdańsk.

- Kamiński, E. (1973). Kształtowanie się jakości tartaczno-drewna iglastego. Sylwan nr 2, 1973, 11–20.
- Kärenlampi, P.P., Riekkinen, M. (2004). Maturity and growth rate effects on Scots pine basic density. *Wood Science and Technology*, 38: 465–473.
- Kasprzyk, H., Wichłacz, K. (2003). Comparative studies on the chemical composition of heat treated and gamma irradiated *Pinus sylvestris* wood. *Annals of Warsaw Agricultural University SGGW, Forestry and Wood Technology No 53*, Warszawa.
- Kaszkarow, K., Kopuły, P. (1937). *Sprawocznik projektirowszczyka promyszlennych sooruzienij. Dieriewannyje konstrukcji. Kuzniecowa G.F. Główna redakcja stroitielnoj literatury. Moskwa-Leningrad 1937.*
- Kędziński, Z., Chojnacki, W. (1952). *Sosna. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa*, 1–120.
- Kisiel, I. (1967). *Reologia w budownictwie*, Arkady, Warszawa.
- Kobyliński, F. (1967a). Sękatność jako jeden z parametrów jakości drewna iglastego. *Przemysł drzewny nr 7*, 14–17.
- Kobyliński, F. (1967b). Wyniki badań technicznych właściwości drewna drzewostanów sosnowych z różnych krain przyrodniczo-leśnych. *Przemysł Drzewny*, 11, 6–7.
- Kobyliński, F. (1967c). Badania podstawowych technicznych własności drewna sosnowych drzewostanów nasiennych. *Sylwan 11/1967*, 53–61.
- Kokociński, W. (2001). Nieniszcząca metoda badania jakości drewna w konstrukcjach budowlanych. *Zeszyty Problemowe, Badania nieniszczące*, Warszawa, 231–236.
- Kokociński, W. (2002). *Anatomia drewna*. Prodruck, Poznań.
- Kokociński, W. (2004). *Drewno. Pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych*. Poznań
- Kolb, H., Gruber, R. (1981). Radiometrisches Vergären für die Holzsortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff 39*: 336–377.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin, 1951
- Kollmann, F., Cöte, W.A. (1968a). *Principles of wood science and wood technology. Solid wood – part I*, Berlin-Heidelberg-N. York 1968.
- Kollmann, F., Krech, H. (1960). Dynamische Messung der elastische Holzeigenschaften und der Dampfung. *Holz als Roh- und Werkst. 2*:41–54.
- Kollmann, F.P., Wilfred, A.C.J. (1968b). *Principle softwood science and technology: solid wood*. Springer, Berlin.
- Kondracki, J. (1978). *Geografia fizyczna Polski*. PWN, Warszawa.
- Korzeniowski, A. (1965a). Badania nad modulem sprężystości warstwowego układu drewno-klej mocznikowy. *Folia Forestalia Polonica, Seria B 1965*, 181–263.
- Korzeniowski, A. (1965b). Badanie możliwości pomiaru odkształceń układu drewno-klej. *Folia Forestalia Polonica, Seria B 1965*, 30–37.
- Kotwica, E. (2009). Certyfikacja drewna konstrukcyjnego litego. Artykuł z 11.08.2009. <http://www.fachowydekarz.pl/index.php/na-rynku/81-certyfikacja-drewna-konstrukcyjnego-litego.html>.
- Kotwica, J. (2008). *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2008.
- Kowal, Z. (1996). Nośność krytyczna słupów drewnianych jako kompozytów włóknistych. *Symposium – Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje 5–6 września 1996.*
- Kowal, Z., Surkont, B. (1978). Wyznaczanie losowych przemieszczeń i sił wewnętrznych w lepkosprężystych strukturach przestrzennych VII Symposium poświęcone reologii PAN i PTMTS, PWR Wrocław, 146–156.
- Kowalski, G. (1985). Zmienność gęstości drewna sosnowego z upraw proveniencyjnych Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW-AR w Rogowie. *Sylwan 129(5)*, 77-81.
- Kozakiewicz, P., Krzosek, S. (2013). *Inżynieria materiałów drzewnych*. Wydanie I, Wydawnictwo SGGW Warszawa.
- Krähenbühl, A., Kerautret, B., Debled-Rennesson, I., Mothe, F., Longuetaud, F. (2014). Knot segmentation in 3D CT images of wet wood. *Pattern Recognit. 47(12)*, 3852–3869.
- Kránitz, K. (2014). *Effect of natural aging on wood*. Dissertation submitted to ETH Zurich.

- Krauss, A., Fabisiak, E., Szymański, W. (2009). The ultrastructural determinant of radial variability of compressive strength along the grain of Scots pine wood, *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No 68, 431–435.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. *Wood handbook*. Madison, Wisconsin, USA: Forest Products Laboratory. United States Department of Agricultural Forest Service.
- Kropf, F., Meierehofer, U. (2000). Strengthening, Retrofitting and Upgrading of Timber Structures with High - Strength Fibres. *Structural Engineering International* 3, 178–181.
- Krystofiak, T., Proszyk, S., Lis, B. (2008). Kleje do produkcji wielkowymiarowych elementów konstrukcyjnych z drewna dla budownictwa. *Drewno – Wood* t. 51 (179), 61–78.
- Krzosek, S. (1995). Maszynowe sortowanie tarcicy w Niemczech. *Przemysł Drzewny* nr 2/1995, 10–12.
- Krzosek, S. (1998a). Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy konstrukcyjnej, *Lekkie Budownictwo Szkieletowe* nr 4, 10–11.
- Krzosek, S. (1998b). Badanie gęstości jako kryterium wytrzymałościowej jakości iglastej tarcicy konstrukcyjnej. *Rozprawa doktorska Wydział Technologii Drewna SGGW, Warszawa* 1998.
- Krzosek, S. (2002). Wytrzymałościowe sortowanie tarcicy w procesie produkcji elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego warstwowo. *Przemysł Drzewny* nr 3/2002, 32–33.
- Krzosek, S. (2009). Wytrzymałościowe sortowanie polskiej, sosnowej tarcicy konstrukcyjnej różnymi metodami. *Wydawnictwo SGGW, Warszawa*.
- Krzosek, S., (2011). Timber strength grading of *Pinus sylvestris* L. using a visual method according to Polish Standard PN-82/D-94021 and German Standard DIN 4074. *Wood Research*, Vol. 56 (3), 435–440.
- Krzosek, S., (2012). Przegląd technik tartacznych stosowanych w polskich tartakach. *Rynek Drzewny* 1: 9–11.
- Krzosek, S., Bacher M. (2011). Aktueller Stand der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz in Polen und in Europa. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* 74: 254–259.
- Krzosek, S., Cierlik, E., Dzbeński, W. (1996). Nieniszczące pomiary gęstości tarcicy konstrukcyjnej w procesie jej sortowania. *Konf. „Pomiar drewna podstawą komputeryzacji w przemyśle drzewnym”*, Poznań.
- Krzosek, S., Grześkiewicz, M. (2008). Strength grading Polish-grown *Pinus sylvestris* L. structural sawn timber using Timber Grader MTG and visual method. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No 66, 26-31.
- Krzsik, F. (1978). *Nauka o drewnie*. PWN, Warszawa 1978.
- Küch, W. (1943). Der Einfluss des Feuchtigkeitsgehalte auf die Festigkeit von Voll und Schichtholz. *Holz Roh- u. Werkst.* 6(5/6):157–161.
- Lam, F. (1987).: Length Effectson Tension and Compression. *Forintek, Vancouver, Canada*.
- Lam, F. (1990). Effect of Lengthon the Tensile Strength of Lumber. *Forintek, Vancouver, Canada*.
- Lang, W. (1998). *Innovative Bewehrungen im Holzbau*. Diplomarbeit, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. BOKU Wien, 1998.
- Lange, M., Orłowicz, R. (2004). Wybór materiałów do napraw konstrukcji drewnianych. XI Konferencja Naukowo-Techniczna. Problemy remontowe w budownictwie ogólnymi obiektach zabytkowych, Wrocław-Zamek Kliczków, 9-11 grudnia 2004. s. 247–254.
- Larson, P.R. (1967). Silvicultural control of the characteristics of wood used for furnish, TAP-PI 4th Forest Biology Conference. Montreal: 143–150.
- Laskowska, A., Kozakiewicz, P., Zbieć, M., Zatoń, P., Oleńska, S., Beer, P. (2018). Surface Characteristics of Scots Pine Veneers Produced with a Peeling Process in Industrial Conditions. *BioResources* 13 (4), 8342–8357.
- Laurow, Z. (1973). Zmiennosc niektórych cech drewna sosnowego w zaleznosc od pochodzenia. *Przegl. Papiern.* 29 (10), 351–353.
- Lewin, M., Goldstein, I.S. (1991). *Wood structure and composition*. Marcel Dekker, Inc. NY.
- Lin, W., Wang, J. (2012). An integrated 3D log processing optimization system for hardwood sawmills in central Appalachia, USA. *Comput. Electron. Agric.* 82, 61–74.

- Lis, Z., Rapp, P. (2002a). Projektowanie i weryfikacja doświadczalna klejonych połączeń belek drewnianych wzmocnionych prętami stalowymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Budownictwo Lądowe, Nr 45, 62–80.
- Lis, Z., Rapp, P. (2002b). Badania belek drewnianych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. Inżynieria i Budownictwo nr 7 / 2002, 390–392.
- LST L EN 1927-2:2008: Apvaliosios spygliuočių medienos klasifikavimas pagal Kocybę. 2 dalis. Pušys.
- Machado, J., Cruz, H. (2005). Within stem variation of maritime pine timber mechanical properties. Holz als Roh- und Werkstoff 63(2), 154–159.
- Madsen, B. (1990). Length effects in 38 mm spruce – pine – fir dimension lumber. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 17 (2).
- Madsen, B. (1992). Size effect in hem – fir lumber. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 18, Nr 4.
- Mańkowski, A., Noskowiak, A. (2009). Wpływ ukierunkowania złącza klinowego na nośność połączenia, materiały konferencyjne „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”. Tom VIII, Mielczarek Z., Szczecin 2009.
- Mańkowski, P., Krzosek, S. (2001). Zastosowanie skanerów w przemyśle drzewnym. Przemysł Drzewny nr 10/2001, 20–23.
- Marcinkowska, A., (2005). Wybrane materiałowe aspekty propagacji fal ultradźwiękowych w drewnie. Maszynopis pracy doktorskiej. Katedra Nauki o Drewnie, AR w Poznaniu.
- Marcinkowska, A., Moliński, W. (2003). Wpływ gęstości drewna na propagację fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien. Annals of Warsaw Agricultural University SGGW, Forestry and Wood Technology No 53, Warszawa.
- Marcinkowska, A., Moliński, W. (2005). Wpływ wtórnego zróżnicowania strukturalnego drewna na prędkość propagacji i współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych wzdłuż włókien. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Technologia Drewna. Nr 40, 43–49.
- Masłowski, E., Spizewska, D. (2002). Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa.
- Matuszkiewicz, J. M. (2001). Zespoły leśne Polski. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Matuszkiewicz, J.M. (1994). Krajobrazy roślinne i regiony geobotaniczne. Atlas Rzeczypospolitej Polskiej. Mapa 42. 5. Warszawa, Główny Geodeta Kraju.
- Matuszkiewicz, J.M. (2008). Regionalizacja geobotaniczna Polski (dane cyfrowe). Warszawa, IGiPK PAN.
- Mielczarek, Z. (1994). Budownictwo drewniane. Arkady, Warszawa.
- Mielczarek, Z., Śliwka, K. (2000). Wzmacnianie belek stropowych oraz dźwigarów dachowych układami zewnętrznych cięgien stalowych. IX Konferencja Naukowo-Techniczna, Wrocław-Szklarska Poręba, 307–314.
- Mielczarek, Z., Draškovič, F. (2006). Efektywność wzmocnienia belek drewnianych materiałami wysokiej wytrzymałości. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 12-13 maja 2006 (s. 223–230).
- Mierzejewski, W. (1975). Badania nad uzyskaniem i wykorzystaniem odnowień naturalnych sosny i dębu. Dokoła nauk. IBL. Mskr.
- Milewski, A. (1980). Materiały i wyroby z drewna, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1980.
- Misztal, B. (2006). *Forecasting in time of rheological deflections of truss girders, consolidated from wood, wood-based material and steel*. WCTE 2006 – 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, OR, USA, August 6–10, 2006.
- Misztal, B. (2008). *Comparison of the vibration frequency and damping of beam models made of dry and wet pine wood*. WCTE 2008, 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, JAPAN, June 2–5, 2008.
- Misztal, B. (2010). *Dynamic parameters of the free vibrations of various wood species..* WCTE 2010, 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trentino, Italy, June 20–24, 2010.
- Moliński, W., Fabisiak, E. (2004). Relationship between the ultrasound wave propagation velocity along the grains and fibers length in birch wood (*Betula verrucosa* Ehrh.). Ann. Warsawa



Agricult. Univ. – SGGW, Forestry and Wood Technol. 55, 197–204.

Moliński, W., Fabisiak, E., Porwolik, A. (2000). Prędkość propagacji ultradźwięku w drewnie naciskowym. Zeszyty Problemowe Badania Nieniszczące i Diagnostyki Technicznej Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich. Warszawa, 5, 85–93.

Moliński, W., Fabisiak, E. (2002). Selected aspects of ultrasonic wave propagation in wood of *Larix deciduas*. Mill. Ann. Warsaw Agricult. Univ. Forest and Wood Technol. No 1: 225–229.

Moliński, W., Krauss, A. (2008). Radial gradient of modulus of elasticity of wood and tracheid cell walls in dominant pine trees (*Pinus sylvestris* L.). Folia Forestalia Polonica, Series B, Issue 39, 19–29.

Moliński, W., Raczkowski, J., (1982). *Wpływ promieniowania ultrafioletowego na pelzanie drewna*. Reologia drewna i konstrukcji drewnianych, Sympozjum Akademii Rolniczej w Poznaniu, materiały, Zielonka 21–22 październik 1982.

Mongeau, J.P., Beauregard, R., Harless, T.E.G. (1993). Softwood log shape modeling with shadow scanners. Wood Fiber Sci. 25(3): 261–277.

Mroczkiewicz, L. (1952). Podział Polski na krainy i dzielnice przyrodniczo-leśne. Prace IBL, nr 80, Warszawa.

Müller, M. (2002): A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 68, 231–249.

Negri, M. (1994). Chestnut timber for structural use – a study on grading methods: machine strength grading, ultrasounds and free vibrations. 1st European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood. Proceedings. Vol. 2. 1994.

Neuhaus, H. (2006). Budownictwo drewniane. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów.

Niedzielska, B., Muszyński, Z. (1986). Badania porównawcze wybranych właściwości drewna drzew doborowych na tle drzew populacji 8 proveniencji sosny zwyczajnej z terenu Polski. AR, Kraków.

Niemz, P., Aguilera, A. (1995). Untersuchungen zur Schallausbreitungsgeschwindigkeit für ausgewählte Holzarten Chiles. Holz als Roh- und Werkst. 53(3), 187–191.

Niemz, P., Kucera, L.J., Pohler, E. (1997). Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung des dynamischen E-Modulus mittels Schall-laufzeit und Resonanz frequenz messung. Holzfor-schung und Holzwertung 49(5): 91–93.

Nishkian, B., Hamill, L., & Associates ASCE (1977). Use of glulam framing in terman engineering center. Fall Convention and Exhibit, October 17-21, San Francisco 1977.

Nitka, W. (2005). Katalog Budownictwa Drewnianego, Centrum Budownictwa Szkieletowego, Gdańsk 2005.

Noskowiak, A., (2007). Normy EN dla drewna konstrukcyjnego zharmonizowane z Dyrektywa 89/106 EEC. Konferencja Polskiej Izby Gospodarczej Przemysłu Drzewnego: Aspekty prawne i technologiczne produkcji drewna konstrukcyjnego. 26–28 września, Darłówko.

Noskowiak, A., Szumiński, G. (2005). Badania właściwości mechanicznych sosnowej tarcicy konstrukcyjnej pozyskiwanej z Krainy Śląskiej, maszyn. ITD. Poznań 2005.

Nożyński, W. (1987). Wpływ liczby spoin na ugięcia belek drewnianych klejonych warstwowo. Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Stolarstwa Budowlanego; Wołomin 1987; zeszyt 1, 22–29.

Obmiński, Z. (1970). Zarys ekologii. W: Białobok S. (red.). Sosna zwyczajna, Nasze drzewa leśne. 1: 152–231.

Orłowicz, R., Gil, Z., Fanderejska, E. (2004). Nośność na wyciąganie prętów spiralnych stosowanych w złączach konstrukcji drewnianych. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004 (s. 161–167).

Orłowicz, R., Sierov, E. (2004). Odkształcalność drewna jako materiału anizotropowego. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Międzyzdroje, 27-29 maja 2004 (s. 95–102).

Oscarsson, J., Olsson, A., Enquist B. (2012): Strain fields around knots in Norway spruce specimens exposed to tensile forces. Wood Science and Technology, 593–610.

Pachelski, M., Żytecki, J., Iskra, M. (1966). Wydajność materiałowa w produkcji elementów meblowych. Prace ITD, nr 3.

Pajchrowski, G., Jabłoński, L., Szumiński, G. (2009). Krajowa baza drewna tartaczego do produkcji drewna konstrukcyjnego spełniającego wymagania wynikające z Dyrektywy na wyroby budowlane (89/106/EEC). ETAP VII. Analiza kierunków rozwoju urządzeń do wytrzymałościowej klasyfikacji drewna konstrukcyjnego. Instytut Technologii Drewna, Zakład Badania i Zastosowania Drewna, Poznań.

Paschalis, P. (1980). Zmienność jakości technicznej drewna sosny pospolitej we wschodniej części Polski. *Sylwan* 124, 1, 29–43.

Pazdrowski, W. (1981). Wpływ podkrzesania sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zmiany gęstości i wytrzymałości jej drewna. *Sylwan* 125, 7–9, 79–86.

Pazdrowski, W. (1988). Wartość techniczna drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od jakości pni drzew w drzewostanach rębnych, *Roczniki AR Poznań*, Poznań.

Pazdrowski, W. (1992a). Zmiany jakości i wartości drewna w drzewostanach sosnowych przy stosowaniu podkrzesywania drzew. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy, Naukowe*, 224.

Pazdrowski, W. (1992b). Współzależność pomiędzy średnią gęstością umowną i wytrzymałością drewna kłód odziomkowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) a gęstością i wytrzymałością określoną na różnych wysokościach pnia. *Sylwan* 136, 1, 31–40.

Pazdrowski, W., Splawa-Neyman, S. (1993). Badanie wybranych właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na tle klas biologicznych w drzewostanie, *Folia Forestalia Polonica, Seria B, Zeszyt 24*, Warszawa.

Pazdrowski, W., Splawa-Neyman, S. (1996). Budowa i fizyczna charakterystyka drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów w wieku przedrębnym, jako podstawa racjonalizacji przeznaczeń i wykorzystania surowca drzewnego, X Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW, Wydawnictwo Fundacja rozwój SGGW, Warszawa.

Piotrowski, Z., Strykowski, W. (2002). Niektóre nowoczesne materiały drewnopochodne produkowane w Ameryce i Europie. *Przemysł Drzewny nr 2/2002*, Warszawa.

PN-63/D-04117 Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczanie współczynnika sprężystości przy zginaniu statycznym.

PN-68/D-4103 Fizyczne i mechaniczne własności drewna. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.

PN-77/D-04103 Drewno. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie statyczne.

PN-77/D-04150 Drewno. Oznaczanie wilgotności.

PN-79/D-01011 Wady drewna.

PN-81/B-03150.01 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie. Materiały.

PN-82/D-94021 Tarcica iglasta konstrukcyjna sortowana metodami wytrzymałościowymi.

PN-92/D-95017 Surowiec drzewny. Drewno wielkowieńcowe iglaste. Wspólne wymagania i badania.

PN-93/D-02002 Surowiec drzewny. Podział, terminologia i symbole.

PN-B-03150:2000/Az2:2003 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie. (zmiana Az2).

PN-B-03156:1997 Konstrukcje drewniane – Metody badań – Nośność złączy klejonych.

PN-D-94021:2013 Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi.

PN-D-95000:2002 Surowiec drzewny. Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie.

PN-EN 204:2016 Klasyfikacja klejów termoplastycznych do drewna przeznaczonych do połączeń niekonstrukcyjnych.

PN-EN 204:2002 Klasyfikacja klejów termoplastycznych do drewna przeznaczonych do połączeń niekonstrukcyjnych.

PN-EN 205:2005 Kleje. Kleje do drewna przeznaczone do połączeń niekonstrukcyjnych. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie przy rozciąganiu połączeń zakładkowych.

PN-EN 301:2017 Kleje fenolowe i aminowe do drewnianych konstrukcji nośnych – Klasyfikacja i wymagania użytkowe.

PN-EN 302-1:2005 Kleje do drewnianych konstrukcji nośnych – Metody badań – Oznaczanie wytrzymałości skleiny na ścinanie przy rozciąganiu wzdłużnym.

PN-EN 302-2:2017 Kleje do drewnianych konstrukcji nośnych – Metody badań – Część 2: Oznaczanie odporności na rozwarstwianie.

PN-EN 336:2013 Drewno konstrukcyjne. Gatunki iglaste i topola. Wymiary, dopuszczalne odchyłki.

PN-EN 338: 2016 Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości.

PN-EN 380:1998 Konstrukcje drewniane. Metody badań. Ogólne zasady badań pod obciążeniem statycznym.

PN-EN 384+A1:2018 Drewno konstrukcyjne. Oznaczane wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości.

PN-EN 385:2002 Złącza klinowe w konstrukcjach drewnianych – Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne.

PN-EN 386:2002 Drewno klejone warstwowo. Wymagania eksploatacyjne i minimalne wymagania produkcyjne.

PN-EN 391:2002 Drewno klejone warstwowo. Badanie spoin klejowych na rozwarstwienie.

PN-EN 392:1999 Drewno klejone warstwowo – Badanie spoin klejowych na ścinanie.

PN-EN 408:2012 Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo. Oznaczanie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych.

PN-EN 518:2000 Drewno konstrukcyjne. Sortowanie. Wymagania w odniesieniu do norm dotyczących sortowania wytrzymałościowego metodą wizualną.

PN-EN 519:2000 Drewno konstrukcyjne. Sortowanie. Wymagania dla tarcicy sortowanej wytrzymałościowo metoda maszynową oraz dla maszyn sortujących.

PN-EN 844-1:2001. Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy ogólne dla drewna okrągłego i tarcicy.

PN-EN 844-10:2001 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące przebarwień i uszkodzeń grzybowych.

PN-EN 844-11:2001 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące uszkodzeń powodowanych przez owady.

PN-EN 844-12:2002 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy uzupełniające i indeks ogólny.

PN-EN 844-2:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy ogólne dotyczące drewna okrągłego.

PN-EN 844-4:2002 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące budowy drewna.

PN-EN 844-5:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące wymiarów drewna okrągłego.

PN-EN 844-7:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące anatomicznej budowy drewna.

PN-EN 844-8:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Terminy dotyczące cech drewna okrągłego.

PN-EN 1194:2000 Konstrukcje drewniane. Drewno klejone warstwowo. Klasy wytrzymałościowe i określenie wartości charakterystycznych.

PN-EN 1310:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Metody pomiaru cech.

PN-EN 1311:2000 Drewno okrągłe i tarcica. Metody pomiaru biologicznej degradacji.

PN-EN 1315-2:2001 Klasyfikacja wymiarowa. Drewno okrągłe iglaste.

PN-EN 1912:2012 Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości. Wizualny podział na klasy i gatunki.

PN-EN 1927-2:2002 Klasyfikacja jakościowa drewna okrągłego iglastego. Część 2: Sosny.

PN-EN 1995-1-1:2010 Eurokod 5 -- Projektowanie konstrukcji drewnianych -- Część 1-1: Postanowienia ogólne -- Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków

PN-EN 9142:1999 Kleje. Wytyczne wyboru znormalizowanych warunków laboratoryjnego starzenia do badania połączeń klejowych.

PN-EN 13183-1:2004 Wilgotność sztuki tarcicy – część 1: Oznaczenie wilgotności metodą suszarkowo-wagową.

PN-EN 13183-2:2004 Wilgotność sztuki tarcicy – część 1: Oznaczenie wilgotności metodą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego.

PN-EN 13556:2005 Drewno okrągłe i tarcica – Terminologia stosowana w handlu drewnem w Europie.

PN-EN 14080: 2013 Konstrukcje drewniane. Drewno klejone warstwowo. Wymagania.

PN-EN 14081-1:2011 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 1: Wymagania ogólne.

PN-EN 14081-2:2013 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 2: Sortowanie maszynowe; wymagania dodatkowe dotyczące wstępnych badań typu.

PN-EN 14081-3:2012 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 3: Sortowanie maszynowe; dodatkowe wymagania dotyczące zakładowej kontroli produkcji.

PN-EN 14081-4:2009 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 4: Sortowanie maszynowe. Nastawy urządzeń sortujących do kontroli maszynowej.

PN-EN 1438:2002 Symbole dla drewna i materiałów drewnopochodnych.

PN-EN 15497:2014 Konstrukcyjne drewno lite łączone na złącza klinowe – Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne.

Polge, H. (1984). Essai de caracterisation de la veine verte du merisier. An. Sci. For. 41(1), 45–58.

Połubojarinow, G.I. (1976). Płotnost drierwiesiny. Lesn. Premysl. Moskwa 1976.

Požgaj, A. (1982). Wpływ wymiarów przekroju poprzecznego próbek na ich pełzanie w naturalnych warunkach atmosferycznych Reologia drewna i konstrukcji drewnianych – Sympozjum Akademii Rolniczej w Poznaniu. Materiały. Zielonka 21–22 październik 1982.

Praca zbiorowa (1965). Working stresses for structural timbers. Forest Products Research Bulletin, No 47.

Praca zbiorowa (1974). The strength properties of timber. The strength properties of European redwood and whitewood. MTP Construction.

Praca zbiorowa (2000). Poradnik użytkownika lasu. Warszawa 2000, <http://www.encyklopedia.laspolskie.pl/doku.php?id=n:normalizacja-surowca-drzewnego>.

Praca zbiorowa (2013). Drewno – surowiec strategiczny? Instytut Technologii Drewna, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 2012.

Praca zbiorowa (2015). Sektor leśno-drzewny w zrównoważonej gospodarce. Instytut Technologii Drewna, Stowarzyszenie Producentów Płyt Drewnopochodnych w Polsce, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 2015.

Praca zbiorowa (2016). Ekspertyza dotycząca norm i warunków technicznych na surowiec drzewny, Poznańska Grupa Naukowa.

Pravdin, L.F. (1964). Sosna obyknovennaa izmencivost vnutrividova sistematika I selekcja (Scots pine variability, systematics and improvement). Wyd. Nauka, Moskwa, 1–190.

Proszyk, S., Bernaczyk, Z. (1997). Materiały II Międzynarodowego Seminarium nt. Nowości w dziedzinie klejów stosowanych do stolarki budowlanej. Poznań, 5–6.

Przybylski, T. (1993). Autekologia i synekologia. Biologia sosny zwyczajnej. Wyd. Sorus, Poznań-Kurnik, 255–300.

Raczkowska, L., Raczkowski, J. (1978). Właściwości drewna sosny w zależności od stref przyrostowych wysokości i promienia drzew różnych klas wieku. Prace Ośrodka Rozwoju drzewnictwa Poznań nr 31, 72–82.

Radovic, B., Rothkopf, C. (2003). Eignung von 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung. Bauen mit Holz 6, 1–6.

Raftery, G.M., Harte, A.M., Rodd, P.D. (2009). Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives, 29 (2), 101–110.

Rapp, P. (1999). Belki drewniane o dużej rozpiętości klejone z elementów grubowarstwowych. IV Konferencja Naukowa, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin-Świnoujście, 27–28 września 1999 (s. 291–296).

Rapp, P. (2002). Badania doświadczalne klejonych wzdłużnych połączeń belek drewnianych. V Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin, 17–18 maja 2002, (s. 137–148).

- Rapp, P. (2010). Mechanika połączeń klejowych jako płaskie zadanie teorii sprężystości. Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 441. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Rapp, P. (2016). Application of adhesive joints in reinforcement and reconstruction of weakened wooden elements loaded axially. *Drewno* 59 (196), 59–73.
- Rapp, P. (2015). Mechanics of adhesive joints as a plane problem of the theory of elasticity. Part II: Displacement formulation for orthotropic adherends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15 (2), 603–619.
- Rapp, P. (2017). The numerical modeling of adhesive joints in reinforcement of wooden elements, subjected to bending and shearing. *Drewno* 2017, Vol. 60 (199), 21–36.
- Rapp P., Fiszer S. (2015). Approximate numerical model for adhesive scarf joints in wooden beams. *Drewno* 2015, Vol. 58 (194), 5–21.
- Rapp, P., Lis, Z. (2001). Badania belek drewnianych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. *Inżynieria i Budownictwo* Nr 7/2001, 390–392.
- Rapp, P., Lis, Z. (2002). Odwzorzenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w zginanych belkach drewnianych za pomocą zbrojenia rozproszonego z włókien węglowych. X Konferencja Naukowo-Techniczna, Remo 2002, Wrocław-Zamek Kliczków, 2002, 321–328.
- Ratajczak, E., (2003). Wyzwania nowej gospodarki dla drzewnictwa. Instytut Technologii Drewna w Poznaniu Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty. 2003 vol. 46 nr 169, 91-113.
- Rhude, A.J. (1996). Structural glued laminated Timber: history of its origins and early development., *Forest Products Journal* 1996.
- Ritter, M.A., Williamson, T.G., Moody, R.C. (1994). Innovations in Glulam Timber Bridge Design. *Proceedings of Structures Congress*, April 24–28, 1994, 1298–1303.
- Röhe, P. (1996). Ertragskundliche und betriebswirtschaftliche Aspekte der Kiefern naturverjüngungswirtschaft. *Forst und Holz*. Jg. 51 (2): 38–44.
- Rola, P., Staniszewski, P., Tomusiak, R., Sekrecki, P., Wysocka, N. (2014). Strukturalne właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w zależności od strony świata – wstępne wyniki badań. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej* R.16, Zeszyt 3 (40): 28–33.
- Ross, R.J., Zerbe, J.I., Wang, X., Green, D.W., Pellerin, R.F. (2005). Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. *Forest Prod. J.*, 55, 90–94.
- Roszyk, E., Moliński, W. (2003). Pełzanie drewna w warunkach cyklicznych zmian wilgotności ścisanej strefy zginanych belek. Badania wstępne. *Annals of Warsaw Agricultural University SGGW, Forestry and Wood Technology* No 53, Warszawa.
- Roszyk, E. (2016a). Wilgotnościowe i ultrastrukturalne uwarunkowania parametrów mechanicznych drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) rozciąganego wzdłuż włókien / Mechanical parameters of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) upon tensile stress along the grains in relation to its moisture content and ultrastructure. *Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Rozprawy naukowe*, nr 485.
- Roszyk, E., Moliński, W., Kamiński, M. (2016b). Tensile properties along the grains of early wood and latewood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in dry and wet state. *BioResources* 11 (2): 3027–3037.
- Roszyk, E., Moliński, W., Kusiak, W., Prądzyński, W., Zborowska, M. (2016c). Właściwości fizyczne drewna sosny zwyczajnej z Puszczy Noteckiej. *Sylwan* 160 (7): 547–555.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz. U. Nr 75, poz. 690).
- Rudnicki, Z. (2007). Badania porównawcze wytrzymałości elementów klejonych w zależności od ilości, wielkości i rozmieszczenia zdrowych sęków przelotowych, Poznań.
- Ruszczyk, G. (2007). Drewno i architektura. Dzieje budownictwa drewnianego w Polsce. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- RVR-Kiefer:2015 Vereinbarung zwischen dem Deutschen Forstwirtschaftsrat e.V. und dem Deutschen Holzwirtschaftsrat e.V., 2. Auflage 2015; Stand Merkblatt: 01.10.2015.
- Sakai, H., Takagi, K. (1990). Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics* 28, 382–385.
- Sandberg, D., Holmberg, H. (1996). Radially sawn timber: Knots – number, type and size in star-sawn triangular profiles of pine (*Pinus sylvestris* L) and spruce (*Picea abies* Karst). *Holz als Roh- und Werkstoff*, Volume 56 (3), 171–177

- Sandoz, J. L., (1989). Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Sc. and Technol.* 23:95–108.
- Sandoz, J. L. (1996). Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. 10th IS on NDT of Wood Proceedings. Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Sandoz J.L., (2000). Wood testing using acusto-ultrasonic. WCTE. NDT.net.
- Sandoz, J. L., Lorin, P. (1994). Standing tree quality assessments using ultrasound. Proc. 5. Confer. "Forest Products" All – Div. Nancy France. 23-28 Aug. Vol.2:493–502.
- Sandoz, J.-L., Benoit, Y. (2007). Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. COST E 53 Conference – Quality Control for Wood and Wood Products. 15–17 October, Warsaw University of Life Sciences: 121–128.
- Schlichting, C.D., Pigliucci, M. (1998). Phenotypic Evolution: A reaction norm perspective. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts.
- Schniewind, A.P., Cahan, R.W., Beler, M.B. (1989). Concise encyclopedia of wood & wood-based materials. Pergamon Press, England 1989.
- Selbo, M. L. (1975). Adhesive bonding of wood. Forest Products Laboratory – Forest Service U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. 1975.
- Sell, J. (1989). Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Zurich 1989.
- Serrano, E. (2001). Glued-in rods for timber structures – a 3D model and finite element parameter studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives* Volume 21, 115–127.
- Sherwood, G., Stroh, R. (1989). Wood-frame house construction. Dover Publications. INC., New York.
- Sikorska, E. (2006). Geografia lasów Polski, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków.
- Skatter, S. (1998). Determination of cross-sectional shape of softwood togs from three X-ray projections using an elliptical model *Holz Roh- Werkstoff* 55 (2).
- Skatter, S., Hoibo, O.A. (1998). Cross-sectional shape models of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway Spruce (*Picea abies*). *Holz als Roh- und Werkstoff*, Volume 56 (3), 187–191.
- Smal, H., Olszewska, M. (2008). The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of sandy post-arable soils, on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant Soil*, 305, 171–187.
- Smykała, J. (1959). Badania nad sposobami i dokładnością oznaczania przyrostu pierśnicy w stopniach pierśnicy na przykładzie drzewostanów sosnowych. Maszyn. SGGW, Warszawa 1959.
- Socha, T. (1999). Badania belek drewnianych zbrojonych włókno kompozytami. Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Świnoujście, 27–28 września 1999, 199–202.
- Socha, T. (2002). Liniowo lepko sprężyste modele reologii drewna. V Konferencja Naukowa Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin 17–18 maja 2002.
- Socha, T. (2004). Sześcioparametrowy model reologii drewna. VII Konferencja Naukowa Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Międzyzdroje, 27–29 maja 2004 (s. 117–124).
- Splawa-Neyman, S. (1994). Selected properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood in dependence upon forest stand type and age of the trees. *Prace Instytutu Technologii Drewna* 1/2 /137/138/, 19–28.
- Splawa-Neyman, S., Urbanik, E. (1999). Klasyfikacja i pomiary iglastego drewna okrągłego w świetle norm europejskich. *Przem. Drzew.*, nr 7/8, 8–10.
- Stängle, S.M., Brüchert, F., Heikkilä, A., Usenius, T., Usenius, A., Sauter, U.H. (2015). Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. *Ann. For. Sci.* 72(1): 57–65.
- Stängle, S.M., Brüchert, F., Kretschmer, U., Spiecker, H., Sauter, U.H. (2014). Clear wood content in standing trees predicted from branch scar measurements with terrestrial LiDAR and verified with X-ray computed tomography. *Can J For Res* 44:145–153.
- Starecki, A. (1998). Statystyczne opracowanie wyników. *Przemysł Drzewny* nr 1/1998, Warszawa 1998.

- Sterr, R. (1963). Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken. Mitteilung aus dem Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München. Holz als Roh und Werkstoff 21 Jg. Heft 2 Februar 1963.
- Stępień, E., Lewandowska-Gross, M. (2013). Określenie wieku dojrzałości rębnej drzewostanów sosnowych I bonitacji na przykładzie Obrębu Wilcze Bagno (Nadleśnictwo Pisz). Sylwan 157/7. 526–532.
- STN 48 0055 Kwalitativne triedenie ihličnatej guľatiny.
- Szczuka, J., Żurowski, J. (1999). Materiałoznawstwo przemysłu drzewnego, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Szukała, R., Szumiński, G. (2003). Badanie podstawowych właściwości iglastej tarcicy konstrukcyjnej zgodnie z normami europejskimi. ITD, Poznań 2003.
- Ślęzak, G. (2006). Klasyfikacja surowca drzewnego w Polsce – Poradnik leśniczego, PWRiL Warszawa, 2006.
- Thelandersson, S. (2000). Advanced Wood Building Technology – A Challenge for the Future. Lund University Sweden – Symposium, Stockholm 2000.
- Tomczak, A., Jelonek, T. (2013). Promieniowa zmienność właściwości drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej na gruntach porolnych. Leśne Prace Badawcze, Vol. 74 (2): 171–177.
- Tomczak, A., Jelonek, T. (2012). Parametry techniczne młodocianego i dojrzałego drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Sylwan, 156(9): 695–702.
- Tomczak, A., Jelonek, T. (2013). Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers), Czerwiec (June) 2013, Vol. 74 (2), 171–177.
- Tomczak, A., Jelonek, T., Zoń, L. (2010). Porównanie wybranych właściwości fizycznych drewna młodocianego i dojrzałego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z drzewostanów rębnych. Sylwan, 154(12), 809–817.
- Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T. (2009). Wybrane elementy budowy makroskopowej drewna dojrzałość sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej w warunkach gruntów porolnych. Leśne Prace Badawcze, 70(4), 373–381.
- Tomczak, A., Pazdrowski, W., Jelonek, T., Grzywiński, W. (2009). Jakość drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Część I. Charakterystyka wybranych cech i właściwości drewna wpływających na jego jakość. Sylwan 153 (6), 363–372.
- Tomczyk, S. (1993). Odnowienie naturalne. Sosna. Biblioteczka leśniczego z. 2.
- Trendelenburg, R., Mayer-Wegelin, H. (1955). Das Holz als Rohstoff. Carl Hanser Verlag, München.
- Turołski, J., Buchholz, J. (1968). Z badań wpływu zbieżności sosnowego drewna tartacznego na rozmieszczenie, wielkość i liczbę sęków. Roczn. WSR Poznań nr 5 1968, 245–254.
- Tyszkiewicz, S. (1980). Mała Encyklopedia Leśna, PWN, Warszawa 1980.
- United States Department of Agriculture (1999). The Encyclopedia of Wood. U.S.D.A., Washington.
- Urbaniak, L. (1998). Zróżnicowanie geograficzne sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na terenie Eurazji na podstawie cech anatomicznych i morfologicznych igieł. Ser. Biol. Nr 58. Wyd. Naukowe UAM. Poznań.
- Urbaniak, L., Karliński, L. (2001). Population of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under different abiotic environments: similarities and differences in the expression of phenotypic needle characters. Third Balkan scientific conference. Proceedings, vol. II (s. 199–207).
- US Department of Agriculture (1999). Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, General Technical Report 113, Forest Products Laboratory, Washington 1999.
- Vacchiano, G., Motta, R., Long, J.N., Shaw, J. D. (2008). A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): A tool for assessing the forest's protective effect. Forest Ecology and Management Volume 255, Issue 7, 20 April 2008 (s. 2542–2554).
- Wagner, A. (2005). Gene silencing studies in the gymnosperm species *Pinus radiata*. Plant Cell Reports, Volume 24, 95–102.
- Wang, S.Y., Chen, J.H., Hsu, K.P. (2005). Effects of planting density on visually graded lumber and mechanical properties of Taiwan. Wood Fiber Sci., 37, 574–581.

Wang, S.Y., Ko, C.Y. (1998). Dynamic modulus of elasticity and bending properties of large beams of Taiwan-grown Japanese cedar from different plantation spacing sites. *Mokuzai Gakkaishii*, 44, 62–68.

Wang, X., Ross, R.J., Mattson, J.A., Erickson, J.R., Forsman, J.W., Geskse, E.A., Wehr, M.A. (2002). Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs *Forest Prod. J.*, 52, 79–85

Wang, S.Y Chen, J.H., Gunnion, A.J. (2008). On the design methodology of scarf repairs to composite laminates. *Composites Science and Technology* V. 68 (1), 35–46.

Ważny, J. (2003). *Patologia drewna – zakres i systematyka*, Przemysł Drzewny, 7–8.

Wieruszewski, M., Gołuński, G., Hruzik, G. J., Gotych, V. (2010). Glued elements for construction. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology* No 72, 453–458.

Wieruszewski, M., Gotych, V., Hruzik, G.J., Gołuński, G. (2009a). Jakość sosnowych elementów klejonych dla budownictwa szkieletowego. VIII Konferencja Naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych” ZUT, Szczecin.

Wieruszewski, M., Gotych, V., Hruzik, G.J., Gołuński, G. (2009b). Properties of coniferous glued elements for skeletal construction, *Annals. WULS – SGGW, For. and Wood Technol.*, 69, 419–423.

Wieruszewski M., Hruzik, G.J., Rudiiger, T. (2013). The potential of pine wood for building construction. *INTERCATHEDRA* No 29/2, 96–101.

Wieruszewski, M., Gotych V., Hruzik, G.J., Gołuński, G., Marcinkowska, A. (2011). Research qualitative of coniferous assortments solid wood for wood construction. . *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. For. Wood Technol.* No 76, 189–194.

Wiktorski, T. (2003). Kierunki i skutki działań dostosowawczych polskiego przemysłu tartaczno- do integracji z Unią Europejską w zakresie normalizacji, praca dyplomowa, SGGW 2003.

Wilczyński, A. (1988). *Badanie naprężeń ścinających w spoinie klejowej*. Wydawnictwo: Wyższa Szkoła Pedagogiczna; Bydgoszcz 1988.

Wilczynski, M. , Starecki, A. , Warmbier, K. (2008). Effect of the thickness of glue layers on the elastic moduli of veneers in plywood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No 66 (208), 225–229.

Witkowska, J. (1997). Regionalna zmienność gęstości sosny zwyczajnej. Warszawa, 11. Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW.

Witkowska, J. (2002). Europejski próg dla sosny, *Gazeta Przemysłu Drzewnego*, 2002 nr 12, 29.

Witkowska, J. (2003). *Analiza porównawcza norm polskich i europejskich na surowiec drzewny: sosna*, Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa.

Witkowska, J., Lachowicz, H. (2012). Analiza zmienności gęstości umownej drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wzdłuż wysokości pnia w zależności od wybranych czynników. *Przegląd Papierniczy* 2012R. 68, nr 9, 573–578.

Wolski, J. (1965). Wytyczne wyboru drzew próbnych reprezentujących badane drzewostany sosnowe oraz określenie koniecznej liczby tych drzew. *Prace Instytutu Technologii Drewna*, rok XII, z. 1.

Wood Handbook (1974). U.S. Dept. of Agriculture, *Agricultural Handbook* No. 72, Forest Products Lab., Madison, WI.

Wójcik, A.R. (1987). *Statystyka matematyczna*, Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.

Yamamoto, K., Sulaiman, O., Hashim, R. (1998). Nondestructive detection of heart rot of *Acacia mangium* trees in Malaysia. *Forest Prod. J.*, 3(48):83–86.

Yiannos, P., Taylor, D.L. (1967). Dynamic modulus of thin wood sections. *Tappi* 50 (1): 40–47.

Zajączkowski, K. (2005). *Regionalizacja potrzeb zadrzewieniowych w Polsce*. Warszawa, Prace IBL, Rozpr. i monogr. 4.

Zajączkowski, M. (1949). *Studia nad sosną zwyczajną w Tatrach i Pieninach*. Prace Rolniczo-Leśne PAU 45.

Zaręba, R. (1986). *Puszcze, bory i lasy Polski*, wydanie III zmienione, PWRiL, Warszawa.

Zarządzenie nr 28 Dyrektora Generalnego LP z dnia 20 marca 2013 roku w sprawie sprostowania błędu w Zarządzeniu nr 26 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 8 marca 2013 roku w sprawie zasad odbioru i obrotu drewna iglastego wyrabianego w kłodach oraz ewidencji surowca drzewnego w jednostkach organizacyjnych Lasów Państwowych.



Zarządzenie nr 47 Dyrektora Generalnego LP z dnia 31 maja 2002 roku zmieniające zarządzenie w sprawie norm na surowiec drzewny obowiązujących w PGLLP.

Zarządzenie nr 72 Dyrektora Generalnego LP z dnia 27.09.2013 roku w sprawie wprowadzenia warunków technicznych na drewno wielkowymiarowe iglaste.

Zarządzenie nr 74 z dnia 27.09.2013 r.: Tymczasowe zasady odbioru i ewidencji drewna iglastego wyrabianego w kłodach.

Zenkteler, M. (1968). *Technologia klejenia drewna*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.

Zenkteler, M. (1996). *Kleje i klejenie drewna*. Wyd. Akademii Rolniczej, Poznań.

Ziarnek, K. (2005). *Rekordy świata roślin*. Warszawa.

Zielony, R. (2014). *Regionalizacja przyrodniczo-leśna wczoraj i dziś – uwarunkowania i potrzeby zmian*. VI Zimowa Szkoła Leśna IBL.

Żur J. (2002). *Badanie wpływu sęków najcieńszej tarcicy sosnowej*. Praca dyplomowa SGGW; Warszawa.