



Dziedzina Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Dyscyplina Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Joanna Drobiec

**Analiza możliwości wykorzystania metod
nieniszczących i semi-nieniszczących do określania
wytrzymałości zabytkowego drewna**

Analysis of the possibilities of using non-destructive and semi-non-destructive methods to determine the strength of historic wood

Opieka naukowa nad przygotowaniem
rozprawy doktorskiej:
Promotor: dr hab. inż. Beata Nowogońska,
prof. UZ

Rozprawę akceptuję:

.....

Zielona Góra 2025

SPIS TREŚCI

1.	Wstęp.....	4
1.1.	Geneza podjęcia tematu	4
1.2.	Cel i zakres opracowania.....	6
2.	Stan wiedzy	6
2.1.	Wady drewna	6
2.1.1.	Wprowadzenie	6
2.1.2.	Sęki	11
2.1.3.	Skręt włókien.....	18
2.1.4.	Pęknięcia	18
2.1.5.	Pęcherze żywiczne	21
2.1.6.	Zabarwienia.....	22
2.1.7.	Zgnilizny.....	22
2.1.8.	Wady drewna powodowane przez owady.....	24
2.1.9.	Obliny	25
2.1.10.	Krzywizny	26
2.1.11.	Twardzica	27
2.1.12.	Wady obróbcze i uszkodzenia mechaniczne.....	27
2.2.	Metody określania parametrów mechanicznych drewna.....	27
2.2.1.	Metoda wizualna	27
2.2.2.	Badania laboratoryjne.....	32
2.2.3.	Badania nieniszczące.....	36
2.3.	Wybrane wyniki badań nieniszczących drewna.....	40
2.3.1.	Semi - nieniszczące badania rezystografem oporowym	43
2.3.2.	Małoniszczące badanie młotkiem do drewna.....	46
2.3.3.	Badania ultradźwiękowe	56
2.4.	Podsumowanie wynikające z przeglądu literatury.....	64
3.	Tezy i cele naukowe pracy	65
4.	Badania wstępne.....	67
4.1.	Cel badań i badany obiekt	67
4.2.	Miejsca badań i inwentaryzacja badanych elementów	70
4.3.	Zastosowany sprzęt i technika badań.....	74
4.4.	Wyniki badań wstępnych.....	80
4.5.	Analiza wyników badań wstępnych	88
4.6.	Wnioski z badań wstępnych	97
5.	Nieniszczące i semi-nieniszczące badania własne.....	98
5.1.	Materiał do badań	98
5.2.	Badania tomografem ultradźwiękowym	107
5.3.	Badania wilgotności	114
5.4.	Badania młotkiem do drewna.....	118

5.4.1. Określenie współczynnika poprawkowego z uwagi na położenie młotka	118
5.4.2. Badania elementów drewnianych	125
5.5. Badania ultradźwiękowe – fala poprzeczna	129
5.6. Badania ultradźwiękowe – fala podłużna.....	133
6. Niszczące badania własne.....	138
6.1. Stanowisko badawcze i technika badań	138
6.2. Wyniki badań.....	154
6.3. Podsumowanie uzyskanych wyników	164
7. Analiza uzyskanych wyników oraz korelacja badań niszczących i nieniszczących	166
8. Propozycja metodyki określania wytrzymałości drewna przy użyciu metod nieniszczących i semi-nieniszczących	176
9. Przykłady wykorzystania proponowanej metodyki	181
9.1. Informacje podstawowe.....	181
9.2. Więźba budynku pouzdrowiskowego.....	181
9.2.1. Krótka historia obiektu	181
9.2.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką	183
9.2.3. Porównanie z wynikami badań niszczących	190
9.3. Więźba dachowa kościoła	191
9.3.1. Krótka historia obiektu	191
9.3.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką	193
9.3.3. Porównanie z wynikami badań niszczących	201
9.4. Więźba średniowiecznego zamku.....	202
9.4.1. Krótka historia obiektu	202
9.4.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką	205
10. Podsumowanie i wnioski końcowe	220
Literatura	223
Publikacje	223
Normy	231
Streszczenie	233
Abstract	236

1. WSTĘP

1.1. Geneza podjęcia tematu

Ludzkość świadoma swojego miejsca w historii i otoczenia, w którym żyje, powinna w sposób ciągły kontrolować stan spuścizny jakim są wplecione w środowisko zabytki. Spośród paru tysięcy zabytków drewnianych w Polsce, nie sposób wyodrębnić tych, które wymagają pierwszeństwa w zakresie renowacji. Oprócz obiektów drewnianych należy pamiętać o budynkach zabytkowych z elementami drewnianymi na przykład więźbami lub stropami [39]. Cały ten ogrom dziedzictwa oczekuje na określenie stanu technicznego w jakim się znajduje, a nie tylko usystematyzowania pod względem rodzaju konstrukcji. Wysoką wartość drewno zawdzięcza swej unikalnej budowie. Jest ona zarazem generatorem wad jak również nieocenionych zalet [57]. Koniec wieku XIX i początek XX przyniósł potrzebę opisanie tego co zostało po konfrontacji z dziejami historii na ziemiach polskich. Lata 70-te XX zapoczątkowały spis w postaci zielonych i białych kart zabytków. To narodowe dziedzictwo skrywające w sobie oddech wielu pokoleń, naznaczone jak żaden inny materiał działaniem rąk ludzkich jest świadectwem minionych dziejów. Jest nośnikiem informacji i powinno się ten nośnik traktować w sposób szczególny chroniąc od możliwych działań czynników destrukcyjnych lub zabezpieczać przed dalszym ich postępowaniem. Jako główną przyczynę destrukcji zabytkowych obiektów drewnianych w pracy [57] opisano procesy rozkładowe powodowane przez grzyby oraz owady niszczące drewno. Potrzeba ochrony tego co zostało do naszych czasów jest oczywista. W 1965 r. budynki drewniane stanowiły 55% ogólnej liczby budynków wiejskich i 10% liczby nowo wznoszonych budynków na wsi [36], [60]. W obecnych warunkach trzeba skoncentrować się na ochronie i ratowaniu tkanki historycznej możliwymi dostępnymi metodami [37], [38], [50], [115]. Służby konserwatorskie zwykle nie dopuszczają przeprowadzania na obiektach zabytkowych badań niszczących lub nawet semi-nieniszczących. Obecnie

rozwój techniki umożliwia stosowanie zróżnicowanych metod badań, które nie będą ingerowały w strukturę badanych elementów in situ. Autorka niniejszego opracowania z uwagi na zainteresowania pochyla się nad możliwościami oceny stanu drewna konstrukcyjnego budynków zabytkowych. Analiza drewna zabytkowego skupia wokół siebie różne dziedziny nauki. Potrzeba uchronienia tego co pozostało powinna być priorytetem dla czasu, w którym żyjemy. Drewno eksploatowane, narażone na działanie wielu czynników traci swoje właściwości mechaniczne oraz użytkowe. Właściwe opisanie stanu technicznego drewna w istniejącej konstrukcji jest bardzo trudnym zadaniem. Nie można opierać się jedynie na makroskopowej ocenie wizualnej. Dokonując jednak tej czynności powinno się mieć wiadomości z zakresu wiedzy ogólnej o drewnie, czynnikach mogących oddziaływać zarówno na żyjące drzewo jak i surowiec z niego pozyskany. W zetknięciu z drewnem w istniejącej konstrukcji pojawia się szereg czynników koniecznych do oceny. Pomocna bywa zatem wiedza związana z wadami jakie występują w tarcicy konstrukcyjnej oraz drewnie okrągłym, z którego powstała. Mając świadomość materiału jakim jest drewno i skutków działania czynników od początku zaistnienia w odwiązanej konstrukcji czy wbudowanym elemencie można przeanalizować układ oraz zbadać nowoczesnymi metodami zakres występowania uszkodzeń.

Przeprowadzenie badań jest konieczne do właściwej oceny elementów konstrukcyjnych, również zabytkowych. Metody niszczące są najbardziej wiarygodnymi testami do oceny stanu materiału. Pobranie próbek szczególnie w obiektach zabytkowych jest często niemożliwe. Pojawia się wtedy możliwość wykorzystania metod nieniszczących i semi-nieniszczących. Obecnie nie można na podstawie wyników badań NDT określić parametrów mechanicznych drewna starego (np. wytrzymałości na zginanie, modułu sprężystości). Można więc tylko w sposób jakościowy dokonać oceny konstrukcji, wskazać stopień rozkładu, nieciągłości struktury. Ilościowe podejście do wyników NDT wymaga wykonania oprócz badań nieniszczących

również badań niszczących na próbkach pobranych z badanej konstrukcji. Konkretnie dane do analizy konstrukcji można uzyskać poprzez korelację wyników badań nieniszczących z wynikami badań wytrzymałościowych [80].

1.2. Cel i zakres opracowania

Celem pracy jest opracowanie metodyki badań istniejących drewnianych elementów konstrukcyjnych, z wykorzystaniem metod niszczących i semi-niszczących, pozwalającej na określenie parametrów mechanicznych drewna i przyporządkowanie badanego materiału do klasy wytrzymałościowej.

2. STAN WIEDZY

2.1. Wady drewna

2.1.1. Wprowadzenie

Drewno to surowiec, który otrzymuje się ze ściętych drzew, a formuje przez obróbkę w różnego typu sortymenty. Sortymenty to pojęcie oznaczające rodzaj drewna wykorzystywanego w przemyśle w różnej postaci np. deski, bale, krawędziaki itd. Pełne zrozumienie problemu wad drewna wiąże się z koniecznością odróżnienia drzewa będącego żyjącą rośliną drzewiastą od wyprodukowanego z niej surowca – drewna. Drewno jako wytwór roślin drzewiastych należy rozpatrywać w kontekście zjawisk i czynników warunkujących wzrost drzew, mających techniczną wartość surowca drzewnego. Drewno jest pełnowartościowym materiałem wtedy, gdy ma odpowiednie właściwości fizyczne i chemiczne oraz regularną budowę.

Działanie różnych czynników zewnętrznych może powodować obniżenie technicznych własności drewna zarówno podczas wzrostu drzewa jak i po ścięciu. Nieprawidłowości budowy drewna oraz zmiany jego własności technicznych określa się jako wady drewna. Wzorzec, z którym konfrontuje się pojęcie wad drewna odnosi się do abstrakcyjnego konceptu „drewna teoretycznie bezbłędnego” tudzież „drewna idealnego”. Model ten byłby doskonały z punktu widzenia tartaczniaka. Definiuje się go jako teoretyczny model odnoszący się do przypadku, gdy drewno miałoby idealny kształt walca, słoje roczne równej szerokości tworzące koncentryczne okręgi i przebieg włókien równoległy do podłużnej osi symetrii, pozbawione byłoby sęków a także innych zmian wywołanych czynnikami biotycznymi i abiotycznymi. Taki przypadek w rzeczywistości nie istnieje. Wszelkie odchylenia od modelu uważa się więc za wady. Należy nadmienić, iż w praktyce pojęcie wad jest względne. To czy dana cecha jest wadą zależy od przeznaczenia surowca. Dla drewna konstrukcyjnego ważna jest wysoka wytrzymałość materiału, zatem drewno o falistym przebiegu włókien, który osłabia tę cechę nie będzie miało dobrych parametrów. Natomiast to samo drewno sprawdzi się jako materiał do wyrobu oklein, gdzie pod względem estetycznym znajdzie zastosowanie. W jaki sposób dana wada wpływa na jakość drewna zależy od jej rodzaju, rozmiarów i miejsca występowania w drewnie [52], [58]. Właściwe wykorzystanie surowca drzewnego wiąże się z jego klasyfikacją jakościową i przeznaczeniową opartą na występujących wadach.

Rozwój ludzkości i historia tworzenia otoczenia nierozłącznie związana jest z wykorzystywaniem drewna. Drewno z uwagi na swój anizotropowy charakter oraz zróżnicowane właściwości jest materiałem trudnym do percepcji. Celem przybliżenia tematyki autorka wyjaśnia pojęcia związane zarówno z drewnem okrągłym jak i drewnem konstrukcyjnym, gdyż niektóre pojęcia są ze sobą powiązane. Rozpoznanie i klasyfikacja materiału towarzyszyły gatunkowi ludzkiemu od wykorzystania tego materiału do produkcji narzędzi do budowy schronień, domostw i wykorzystania w szeroko

pomyślanym budownictwie ogólnym w czasach nam współczesnych. Historia handlu drewna poprzez wieki średnie prowadzi nas aż do czasów współczesnych, dokonując podziałów na sobie właściwe sortymenty. Nie są obce współczesnym zasady pozyskiwania drewna do celów budowlanych zaczerpnięte z wieków średnich. Za praktykami wiadomo, że drewno ze ścinki zimowej jest do tych zadań najlepsze. Proces powolnego suszenia przez sublimację (lód-para wodna) niweluje naprężenia, drewno wysycha powoli co zapobiega wnikaniu weń grzybów i wody. Początek XX wieku to czas, kiedy drewno zaczyna być opisywane, klasyfikowane oraz rozpoznawane. Podział i wyróżnienie kilkudziesięciu wad drewna pojawia się po raz pierwszy w publikacji Nowickiego [84], a prof. Andrzej Szwarc w swoim opracowaniu [109] zebrał wiedzę dostępną na temat znanych wad drewna. Posługiwał się on ówczesną nomenklaturą niestety odbiegającą od stosowanej współcześnie. Czasem można spotkać nawet znacznie mylące określenia np. drewno zbolełe - dzisiejsza zabitka, fałszywy rdzeń obecnie to fałszywa twardziel. Wspomnieć należy, że aż do czasów II Wojny Światowej Polski Komitet Normalizacyjny nie wydał żadnej normy dotyczącej wad drewna ani surowca drzewnego. Nomenklatura zawarta w pracy [109] będącym częścią Praktycznej Encyklopedii Gospodarstwa Wiejskiego była na owe czasy podsumowaniem stanu wiedzy do zastosowania w sortymentacji.

Z sortymentacją drewna związane są właśnie wady drewna, według których dokonuje się podziałów surowca. Okres po II Wojnie Światowej to czas intensywnego poszukiwania terminologii, podziałów i opisów związanych z polskim brakarstwem. Choć pierwsze zasady (bez statusu normy) spisano już w 1937 roku, to nie stosowano ich już od wybuchu wojny, która gospodarkę leśną rozumiała jako zaopatrzenie frontu.

Autorką historycznego dzieła „Wady drewna” [107] jest Emilia Stebnicka, która w roku 1951 wydała publikację opisującą surowiec drzewny pod kątem brakarskim, a w niedługim czasie przygotowała normę, która definiowała i klasyfikowała wady drewna. Norma Stebnickiej „Wady drewna” z 1954 roku

[N1] stanowi do dzisiaj podstawę opracowań dotyczących tego surowca. Kolejna norma opracowana przez Stebnicką w 1966: r. – wady drewna [N2] zostaje zmieniona w roku 1979. Autorem zmian jest Dziewanowski, który dokonuje rozdzielenia wad drewna okrągłego od wad tarcicy [N3], [N4]. Zmiana przeznaczeniowego sortowania drewna na klasyfikację jakościowo – wymiarową została wdrożona w lasach państwowych w 1994 r. Obecnie sortowanie na podstawie przyjętych norm jest oczywiste i powszechne. Znajomość wad drewna to podstawa brakarskiego rozeznania. Wiedza ogólna dotycząca drewna okrągłego i tarcicy jest niezbędna do poruszania się w tematyce drewna konstrukcyjnego w nowopowstających budowlach jak również w drewnie konstrukcji zabytkowych. Wady drewna to uszkodzenia lub nieprawidłowości budowy oraz cechy naturalne, które ograniczają zakres jego użyteczności. Wady tarcicy są zaś wynikiem występowania wad w drewnie okrągłym lub wynikiem błędów, które są popełnione w procesie wytwarzania, a dodatkowo wbudowania w obiekt. Tarcica może zostać porażona grzybami lub być zaatakowana przez ksylofagi (owady – techniczne szkodniki drewna). Wady tarcicy i drewna okrągłego są w dużej części takie same np. wady związane z zabarwieniem drewna. Względem niektórych wad występują podobieństwa, a część jest całkowicie pozbawiona wspólnej treści np. wady przetarcia występujące w tarcicy.

Z uwagi na mnogość wad oraz przyczyn ich powstawania trudno jest ustalić nie budzące zastrzeżeń metody klasyfikacji. W literaturze można znaleźć różne zasady podziału wad. Najogólniejszy podział to ten uwzględniający czas powstania. Krzysik [58] wyodrębnia najogólniejszy podział kwalifikując je na:

- ❑ wady pierwotne powstałe za życia drzewa,
- ❑ wady wtórne jako wady powstające po ścinie drzewa, będące wynikiem niewłaściwych warunków przechowywania surowca lub złych warunków pracy materiału w gotowej konstrukcji.

W [58] Krzysik zaproponował dalszy podział wad wyróżniający 5 grup, oparty na uszkodzeniach drewna oraz przyczynie powstania wady. Dla wyczerpania tematu taki podział wydaje się zasadny. Są to:

- ❑ wady kształtu pnia (zbieżystość, krzywizny, rozwidlenie, listwy mrozowe, spłaszczenie, fałdy korzeniowe (obecnie napływy korzeniowe), obrzęki),
- ❑ wady anatomicznej budowy drewna (sęki, zawoje, nieregularny przebieg słoików, nieregularny przebieg włókien, wielordzenność, zakorki, drewno reakcyjne, twardzica, drewno napięciowe, drewno ciągliwe, fałszywy twardziel),
- ❑ wady wywołane przez czynniki zewnętrzne i klimatyczne (zranienia, martwice, zabity, pęknięcia, zabarwienia chemiczne),
- ❑ wady wywołane przez grzyby (zabarwienia np. sinizny, zgnilizny (twarda, miękka), zaparzenie),
- ❑ wady spowodowane przez owady i inne zwierzęta (chodniki i otwory owadzie, spały, dziuple).

Czynniki, które stanowią podstawę do jakościowej klasyfikacji drewna zawarte są w normach międzynarodowych (EN, ISO), państwowych oraz branżowych. Pierwszą krajową normą dotyczącą wad drewna była PN-D-01000:1954 [N1], zmieniona w połowie lat sześćdziesiątych XX wieku przez PN-D-01000:1966 [N2]. Norma zbiorcza opisująca wady tarcicy i drewna okrągłego [7] funkcjonowała do roku 1979. Zmiana podejścia i rozdzielenie norm do wad drewna okrągłego i tarcicy nastąpiła wraz z pojawieniem się norm PN-79/D-01011 [N3] oraz PN-79/D-01012 [N4]. Normy te zastąpiła norma europejska PN-EN 844 [N20], której nowelizacja pojawiła się w grudniu 2019 r. [N19]. Wspomniane normy stanowią zbiór przepisów określających dopuszczalność danych wad uzależniając klasę jakości drewna od liczby, kształtu, wymiarów i rodzaju wad w nim występujących. W październiku 2013 r. wprowadzono krajową normę PN-D-94021:2013 [N5], dotyczącą zasad sortowania metodami wytrzymałościowymi tarcicy konstrukcyjnej iglastej. Podano w niej

wymagania dotyczące wilgotności, wymiarów i jakości oraz metody badania tych cech.

Eksploracja drewna w konstrukcji w czasie wiąże się z możliwością wystąpienia zwiększenia negatywnego wpływu wad na parametry mechaniczne tarcicy konstrukcyjnej. Wpływ danej wady na jakość drewna zależy od jej rodzaju, od rozmiarów i od miejsca występowania w drewnie.

Analizy dokonywane w niniejszej pracy ściśle wiążą się ze zróżnicowanym wpływem wad na wytrzymałość drewna.

W procesie klasyfikacji drewna, w tym tarcicy konstrukcyjnej uwzględnia się takie wady jak: sęki, skręt włókien, pęknięcia, pęcherze żywiczne, wady kształtu, zabarwienia, zgnilizny, chodniki owadzie, wady przetarcia [5], [59], [121].

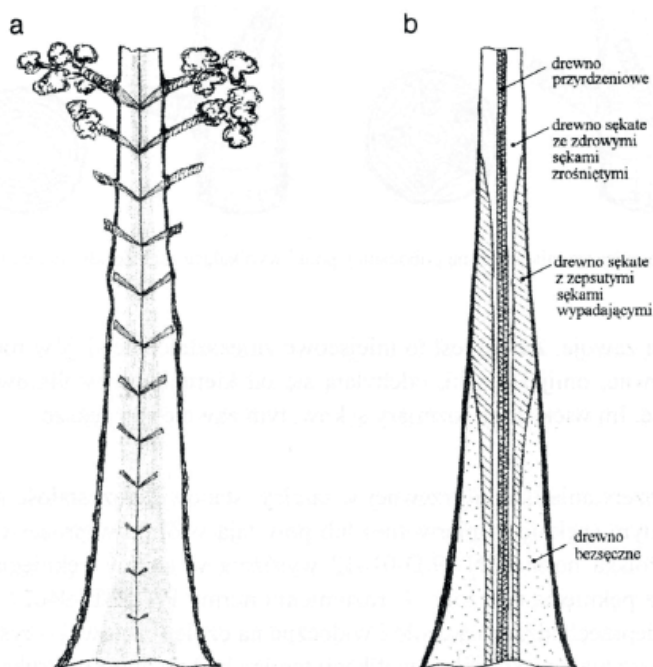
2.1.2. Sęki

Sęki to wrosnięte w drewno pozostałości po odpadłych w sposób naturalny lub odciętych gałęziach. Sęki stanowią jedną z głównych wad drewna, pomimo iż z punktu widzenia budowy drzewa, są zjawiskiem naturalnym i występują w drewnie wszystkich gatunków drzew [5], [52]. Rozmieszczenie sęków oraz kierunek ich położenia zależą od gatunku drzewa. Drzewa iglaste mają sęki rozmieszczone wzdłuż pnia w tak zwanych okółkach. W sosnie gałęzie wyrastają od rdzenia na tych samych wysokościach w pniu. Modrzew oprócz dużych sęków rozmieszczonych okółkowo charakteryzuje się występowaniem licznych mniejszych sęków między okółkami tzn. gałęzie wyrastają w sposób mniej regularny, a sam układ okółkowy nie jest tak widoczny. Gatunki liściaste charakteryzują się nieregularnym rozmieszczeniem sęków. Proces wzrostu determinuje rozkład sęków w drzewie. Ich wielkość zmienia się i wzrasta od odziomka ku wierzchołkowi drzewa. W trakcie wzrostu dolne gałęzie drzewa obumierają i odpadają. W odziomkowej części pnia pozostają sęki o małej

średnicy i małej długości, ułożone przy rdzeniu. Od zewnątrz otacza je warstwa nowo narosłych stojów drewna. W środkowej części pnia gałęzie są coraz grubsze, a kiedy odpadają, pozostałe po nich sęki mają znacznie większe średnice. W tej warstwie pnia występują zwykle sęki zepsute lub nadpsute w większej części niezrośnięte z tkanką otaczającego pnia. Zalegają tuż pod korą, a po przetarciu często wypadają z tarcicy. Wyżej, w strefie od nasady korony pień jest ugałęziony. Ścięcie drzewa i okrzesanie gałęzi uwiadcniają na pobocznicy pnia sęki otwarte o dużej średnicy. Przeważnie są to sęki zdrowe zrośnięte z otaczającą tkanką. Obecność sęków determinuje pojawienie się miejscowych zniekształceń stojów rocznych i przebiegu włókien w postaci zawojów. Omijając sęki włókna odginają się od kierunku prostoliniowego tworząc łukowate lub eliptyczne linie tym większe im większy jest rozmiar sęków [5], [52], [58], [121]. Borysiuk w pracy [5] podaje za Dzbeńskim wyróżnione w ściętym drzewie, głównie iglastym, następujące strefy drewna (Rys. 1):

- ❑ strefa odziomkowa drewna (bezszcena),
- ❑ strefa drewna sękatego z zepsutymi sękami wypadającymi,
- ❑ strefa drewna sękatego ze zdrowymi sękami zrośniętymi,
- ❑ strefa drewna przyrdzeniowego (niskojakościowe drewno), z sękami zdrowymi, otwartymi.

Krzysik [58] klasyfikuje sęki z uwagi na kształt, średnice, stopień zrośnięcia z otaczającym drewnem i zdrowotność. Kształt sęka zależy od kierunku przekroju drewna. Przekrój styczny charakteryzuje się sękami przeciętymi w przybliżeniu prostopadle do swej osi podłużnej, obserwujemy wówczas ich okrągłową postać. Sęk przecięty wzdłuż swej osi jest widoczny jako pasmowy kształt ulegający zwężeniu w kierunku rdzenia i jest charakterystyczny dla przekroju promieniowego drewna. Skutkiem powyższego z uwagi na zarys przekroju wyróżnia się sęki okrągłowe, podłużne i skrzydlate.



Rys. 1. Układ sęków w drewnie iglastym: a) rozmieszczanie sęków wzdłuż pnia, b) strefy sękatości [5]

Z uwagi na wymiar średnicy sęki dzieli się na [58]:

- szpilkowe (do 3 mm),
- perłowe (3-6 mm),
- ołówkowe (6-10 mm),
- małe (10-25 mm),
- średnie (25-40 mm),
- duże (> 40 mm).

Biorąc pod uwagę stopień zrośnięcia z otaczającym drewnem wyróżnia się: sęki zrośnięte, częściowo zrośnięte i wypadające. Jako sęki zrośnięte określa się te, które mają słoje roczne zrośnięte ze słojami drewna otaczającego na całości obwodu. Sęki zrośnięte występują w tarcicy rdzeniowej i środkowej dlatego, że stanowią podstawy żywych gałęzi. Sęki częściowo zrośnięte oznacza się jako mające słoje zrośnięte z otaczającym drewnem na części

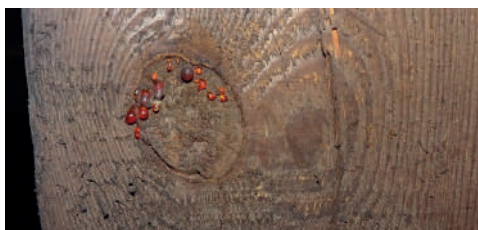
obwodu. Seki wypadające to sęki niezrośnięte z otaczającym drewnem. Ponieważ kurczliwość sęków jest większa od otaczającego drewna, a kierunek włókien sęka jest również inny, sęki łatwo wypadają podczas procesu suszenia tarcicy. Do sęków wypadających zalicza się również sęki obrączkowe otoczone na obwodzie korą.

Ze względu na stan zdrowotny podział sęków przedstawia się następująco: sęki zdrowe, nadpsute, zepsute, smołowe, tabaczne. Seki zdrowe to sęki bez śladu rozkładu drewna. Dzielą się na sęki jasne, rogowe, zabarwione. Sęki jasne mają kolor otaczającego drewna lub nieznacznie ciemniejszą barwę spowodowaną zagęszczeniem słoików. Sęki rogowe są przesycone żywicą lub garbnikami, charakterystyczne dla gatunków iglastych. Jako sęki czarne znane są u jodły i gatunków liściastych. Sęki zabarwione to sęki, których barwa jasna, ciemna lub pstra i jest spowodowana procesem rozkładu drewna przez grzyby. Występują u beztwardzielowych gatunków liściastych. Sęki nadpsute na skutek zgnilizny wykazują częściowe zniszczenie tkanki drzewnej. Struktura drewna pozostaje zachowana a otaczające drewno jest zdrowe. Sęki zepsute to sęki w stanie dużego rozkładu. Sęki smołowe to sęki zepsute występujące u gatunków iglastych zawierających w drewnie żywicę. Rozłożone drewno zmieszane z żywicą tworzy plastyczną masę. Sęki tabaczne charakteryzują się dużym rozkładem drewna, które daje się rozetrzeć w palcach na proszek.

Sęki odgrywają podstawową rolę w jakościowej klasyfikacji sortymentów drewna, również tarcicy konstrukcyjno-budowlanej. Ich nasilenie i wymiary są jednym z głównych czynników jakościowej klasyfikacji drewna. To w jaki sposób sęki wpływają na jakość drewna zależy od ich stanu zdrowotnego oraz gatunku drzewa. Sęki zepsute mogą spowodować zgniliznę otaczającego drewna jak to ma miejsce u gatunków beztwardzielowych lub zgnilizna nie przenosi się na drewno jak w przypadku gatunków twardzielowych, z wyjątkiem drewna jodłowego. Drewno sęków ma bardziej zwartą budowę niż drewno otaczające oraz większy ciężar właściwy. Podczas wysychania drewna sęki kurczą się nieco silniej niż pozostałe drewno. Kierunek włókien

w sękach jest inny stąd podczas wysychania tarcicy sęki zrośnięte pękają promieniowo, ponieważ działają na nie powstałe naprężenia, natomiast sęki niezrośnięte obluzowują się i wypadają. Przykłady sęków pokazano na rys. 2.

a)



b)



c)



d)



e)



f)

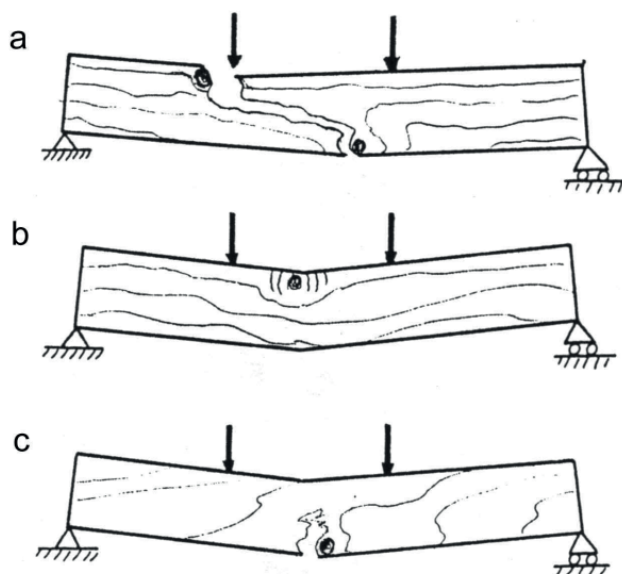


Rys. 2. Przykłady sęków: a) żywiczny, b) zepsuty, c), wypadający, d) skrzydlaty, e) koncentracja sęków, f) wypadający

Sęki można traktować jak okrągłe kołki z twardszego niż otaczające je drewno materiału, przebiegające w kierunku promieniowym, prawie prostopadle do włókien drewna [57], [58]. W zależności od kierunków ułożenia sęków oraz kierunków przecięcia pnia sęki mogą przybrać różną postać. Najbardziej

niekorzystnym przypadkiem z uwagi na wytrzymałość jest wzdłużne przecięcie sęka, tworzące tzw. pasierby. Występuje zależność, że im większa jest powierzchnia sęka na powierzchni tarcicy tym słabsze jego umocowanie w sortymencie i łatwiej z niego wypada [64]. Obecność sęków zmniejsza wytrzymałość drewna na rozciąganie wzdłuż włókien, gdyż powoduje zmniejszenie przekroju pracującego. Mniejszy wpływ sęki mają na obniżenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien, ponieważ sęk nie zmniejsza tu przekroju pracującego. W obu przypadkach zawoje, czyli wygięcie włókien wokół sęków, mają istotny wpływ na uzyskiwane wytrzymałości. Zawoje powodują obniżenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien o 23%, na zginanie statyczne o 33%, przy spadku udarności o 18% [64]. W przypadku drewna sękatego wytrzymałość na zginanie statyczne jest niższa niż dla drewna bezsęcznego [58]. Obniżenie wytrzymałości elementu zginanego zależy od wielkości i rozmieszczenia sęków (rys 3). Występowanie sęków w strefie rozciąganej w dużym stopniu obniża wytrzymałość elementu. Natomiast sęki znajdujące się w strefie ściskanej lub obojętnej w mniejszym stopniu wpływają na wytrzymałość na zginanie statyczne, a ich położenie z dala od przekroju niebezpiecznego (w pobliżu podpór) powoduje znikomy wpływ [64].

Wanin [118] przebadiał wpływ sęków na wytrzymałość na zginanie statyczne (tablica 1) oraz podał wymiary i odległości od środka próbki sęków niewpływających na wytrzymałość. Dla znormalizowanych próbek 2 x 2 x 30 cm określił zależność podaną w tablicy 2.



Rys. 3. Typy zniszczeń tarcicy przy zginaniu, spowodowane obecnością sęków [64]:
 a) sęki w strefie rozciąganej i ściskanej, b) sęk w strefie ściskanej, c) sęk w strefie rozciąganej

Tablica 1. Wpływ sęków na wytrzymałość drewna wg Wanina

Drewno sosny	Ciężar właściwy G/cm ³	Rozciąganie kg/cm ²	Zmniejszenie %	Ściskanie kg/cm ²	Zmniejszenie %
Bezseczne	0,50	780	-	406	-
Mało sękate	0,53	384	51	361	10
Bardzo sękate	0,57	118	85	314	22

Tablica 2. Wymiary i położenie sęków niewpływających na wytrzymałość drewna na zginanie statyczne wg Wanina

Odległość sęka od środka próbki (mm)	20	40	60	80	100
Średnica sęka niewpływającego na wytrzymałość (mm)	3	6	9	12	15

Badania cytowane w [58], wykazują, że wpływ sęków na wytrzymałość na zginanie statyczne jest zdecydowanie większa przy działaniu siły w kierunku stycznym (prostopadle do podłużnej osi sęka) niż promieniowym (kierunek działania siły równoległy do podłużnej osi sęka). Otwory po sękach wypadających wpływają prawie tak samo jak sęki na obniżenie wytrzymałości na zginanie statyczne oraz rozciąganie wzdłuż włókien.

2.1.3. Skręt włókien

Skręt włókien ma miejsce wówczas, gdy włókna biegną spiralnie w stosunku do osi pnia. Występuje on we wszystkich gatunkach drzew, a w iglastych najczęściej u sosny i świerka. W tarcicy wyróżnia się normalny oraz pozorny skręt włókien. Na powierzchniach stycznych tarcicy występuje właściwy (normalny) skręt włókien. Na powierzchni promieniowej występuje pozorny skręt włókien będący skutkiem przecięcia zbieżystego drewna. Skręt włókien wyraża się w procentach lub wyraża się za pomocą kąta nachylenia włókien w stosunku do kierunku siły obciążającej. Łapka w pracy [64] zauważa, że wada ta jest względną, ponieważ zmniejsza wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości, ale zwiększa twardość surowca i jego wytrzymałość na ściskanie i ścinanie. Wielkość skrętu włókien powyżej 6-10% powoduje obniżenie właściwości mechanicznych drewna [118]. Wytrzymałość na zginanie statyczne wyraźnie spada przy przekroczeniu wielkości 6% skrętu włókien.

2.1.4. Pęknięcia

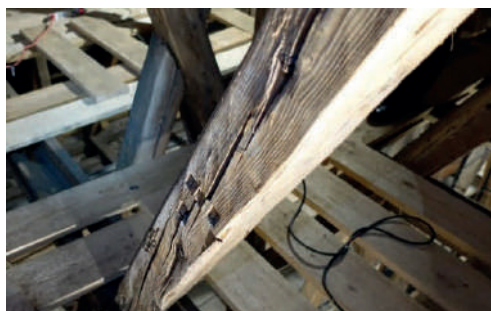
Pęknięcia to rozerwanie tkanki drzewnej będące skutkiem działania naprężeń przekraczających wytrzymałość drewna na rozciąganie w poprzek włókien lub przekraczających wytrzymałość na ścinanie wzdłuż włókien. Pękanie drewna

powodowane jest przeważnie nierównomiernym wysychaniem. Warstwy zewnętrzne wysychają szybciej niż warstwy wewnętrzne zawierające nadal wodę wolną i kurczą się. Niekurczące się warstwy wewnętrzne napierają na warstwy zewnętrzne powodując w nich naprężenia rozciągające. Pęknięcia powstają, gdy wartość naprężeń przekroczy wytrzymałość drewna na rozciąganie w poprzek włókien. Wielkość i rozwarcie pęknięć rosną w czasie wysychania [59]. W tarcicy spękania stanowią pozostałość pęknięć występujących w drewnie okrągłym (pęknięcia pierwotne) lub powstają na skutek skurczu podczas wysychania do wilgotności niższej od punktu nasycenia włókien (pęknięcia dysorpcyjne) [5], [58], [121]. Normy PN-D-01012:1979 [N4] i PN-EN 844-9:2002 [N20] wyróżniają podział pęknięć w tarcicy na pęknięcia na płaszczyźnie, pęknięcia na boku oraz na czole. Norma sortownicza PN-D-94021:2013 [N5] wyróżnia pęknięcia czołowe nieprzechodzące, pęknięcia czołowe przechodzące, pęknięcia na płaszczyźnie nieprzechodzące na czoło [5], [121]. Powstanie pęknięć zależy również od sposobu wycięcia elementu z okrągłego pnia drzewa. W elementach niezawierających rdzenia powstają mniejsze pęknięcia niż w elementach z rdzeniem (rys. 4) [77]. Przykłady pęknięć zabytkowej tarcicy pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Wpływ przetarcia na lokalizację pęknięć [77]

a)



b)



c)



d)



e)

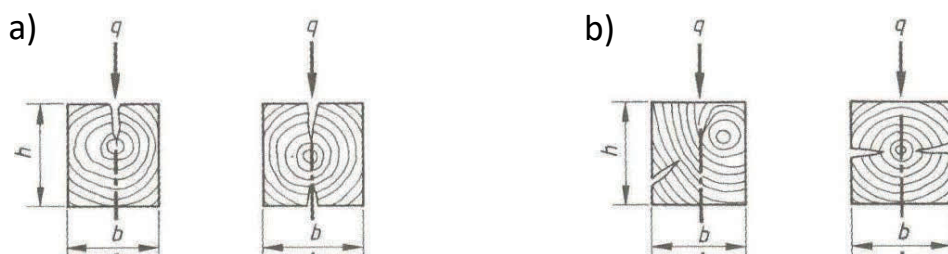


f)



Rys. 5. Przykłady pęknięć zabytkowej tarcicy: a) Kościół św. Józefa w Sadowie (XV w.), b) Kościół Matki Boskiej Śnieżnej w Mikołowie (XVI w.), c) duży spichlerz w Toruniu (XVIII w.), d) Suszarnia browarów książęcych w Tychach (XIX w.) e) belki z kościoła Świętej Trójcy w Turośni Kościelnej (XVIII w.), f) Wieżba zamku Kapituły Warmińskiej w Olsztynie (XIV w.)

Pęknięcia stanowią istotną wadę, gdyż zwiększają ilość odpadów (uniemożliwiają wykorzystanie drewna), obniżają jakość drewna oraz ułatwiają wnikanie wody oraz zarodników grzybów. Pęknięcia mogą istotnie obniżać wytrzymałość drewna [58], [121]. Wpływ spękań zależy od ich położenia w przekroju. W elementach zginanych pęknięcia pionowe nie zmieniają charakterystyki wytrzymałościowej przekroju, a pęknięcia poziome lub skośne zmniejszają nośność elementu (rys. 6) [77].



Rys. 6. Wpływ pęknięć na nośność elementów zginanych: a) nie występuje zmniejszenie nośności, b) występuje zmniejszenie nośności [77]

2.1.5. Pęcherze żywiczne

Pęcherze żywiczne są to soczewkowate szczeliny wypełnione żywicą tworzące się między dwoma słojami rocznymi. Występują w drewnie gatunków iglastych z wyłączeniem jodły, jałowca i cisa. Podczas klasyfikacji tarcicy konstrukcyjnej pęcherze żywiczne traktować należy tak samo jak pęknięcia. Przykład pęcherzy żywicznych w tarcicy pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Przykład pęcherzy żywicznych

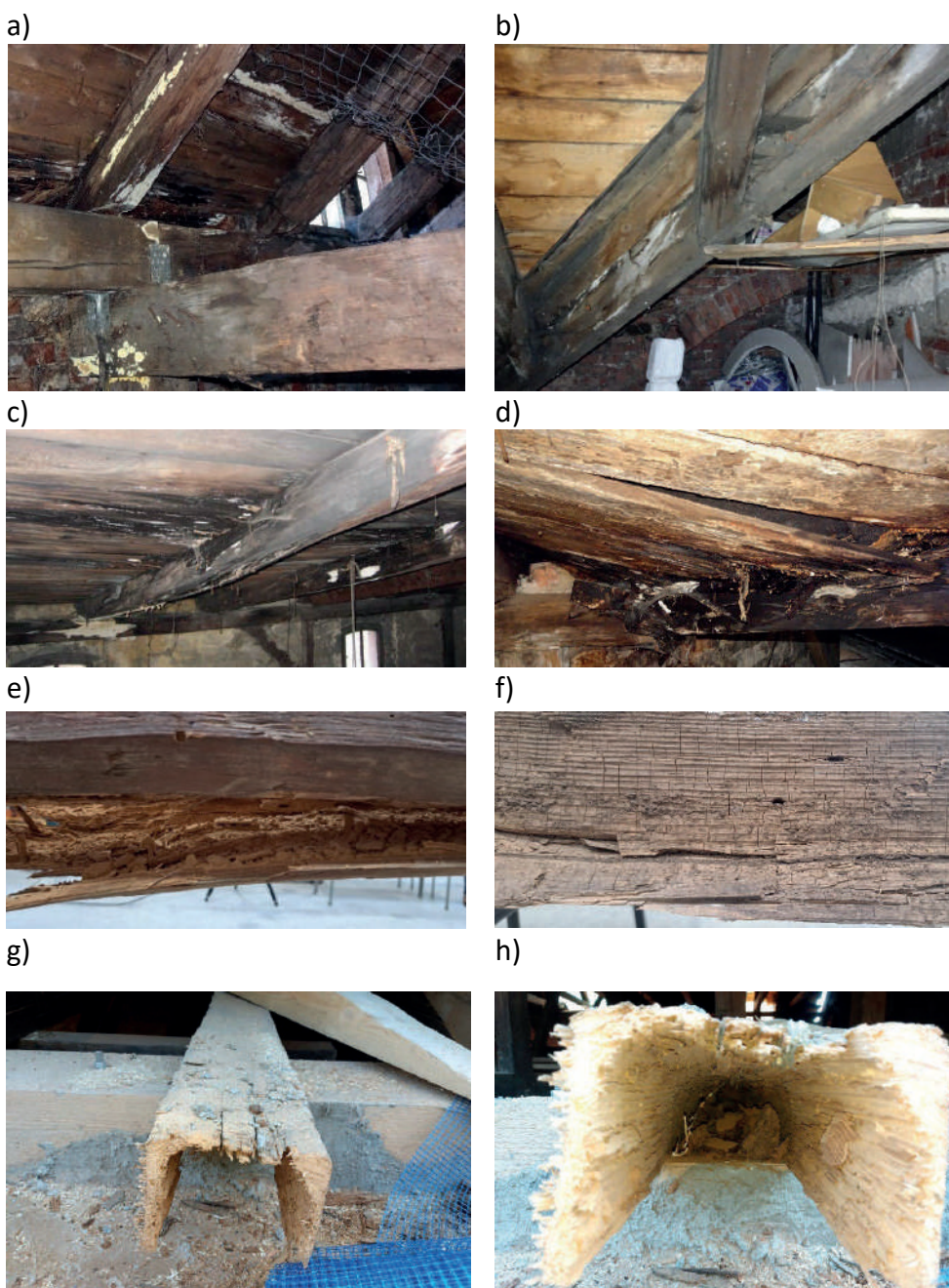
2.1.6. Zabarwienia

Zabarwienia to zmiany naturalnej barwy drewna spowodowane przez czynniki abiotyczne (czynniki atmosferyczne np. woda, związki chemiczne np. kleje), lub czynniki biotyczne (grzyby: sinizna, czerwień). Sinizna tarcicy konstrukcyjnej wywołana przez grzyby jest dopuszczalna i nie obniża jej wartości wytrzymałościowych, natomiast ujemnie wpływa na estetykę surowca.

2.1.7. Zgnilizny

Zgnilizna drewna jest wadą wywoływaną przez grzyby, które niszczą jego ściany komórkowe. Ze względu na strukturę porażonego drewna wyróżnia się zgniliznę twardą i miękką. Zgnilizna twarda to początkowy etap rozkładu substancji drzewnej. Objawem jest zmiana barwy i niewielkie obniżenie właściwości mechanicznych. Dalszy rozkład drewna spowodowany przez grzyby powoduje obniżenie wytrzymałości i twardości drewna. Stadium to nazywa się zgnilizną miękką. Drewno zatracą swoją strukturę. Rozróżnia się zgniliznę płytkową, gąbczastą, kostkową, włóknistą i proszkową, która jest ostatnim etapem rozwoju tejże wady. Norma PN-D-94021:2013-10 [N5] nie dopuszcza stosowania tarcicy porażonej zgnilizną [5], [52], [58], [74], [121].

Przykłady zgnilizn tarcicy konstrukcyjnej pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Przykłady zgnilizn: a) dwór w Markłowicach (XIX w), b) kościół św. Stanisława Biskupa i Męczennika w Czeladzi (XX w.), c) kamienica Mysłowice (XIX w.), d) kamienica w Sosnowcu (XX w.), e) Wieża kościelna w Turośni Kościelnej 1870 r., f) XIX wieczny dworek, g) i h) kościół św. Katarzyny w Czechowicach-Dziedzicach (XVIII w.)

2.1.8. Wady drewna powodowane przez owady

Larwy owadów i postacie doskonałe (lub oba przypadki) żerując uszkadzają tkankę drzewną. Wgryzając się powodują uszkodzenia w postaci chodników o różnej średnicy, kształcie i przebiegu. Żerowanie larwy charakteryzuje zmienny przekrój powstałego chodnika zakończony kolebką. Postać dorosła żeruje w chodniku o stałym przekroju poprzecznym, zależnie od kształtu i wielkości owada.

Z uwagi na głębokość, na jaką sięgają wydrążone przez owady chodniki, licząc od powierzchni tarcicy, dzieli się je na: płytkie o głębokości do 5 mm oraz głębokie - powyżej 5 mm. Chodniki głębokie dzielą się na małe (do 3 mm), o kołowym zarysie przekroju oraz duże (powyżej 3 mm) o okrągłym lub owalnym zarysie przekroju. Typowe dla drewna iglastego świeżo ściętego szkodniki to: rytel pospolity, drwalnik paskowany, żerdzianki, trzpienniki, kózki). W drewnie obrobionym żerują: spuszczel, borodziej, kopalek, kołatek domowy. W tarcicy konstrukcyjno-budowlanej nie dopuszcza się występowania chodników owadzych spowodowanych żerowaniem ksylofagów [N4], [5], [52], [58], [121]. Niestety w obiektach zabytkowych często można spotkać aktywnego owada (rys. 9).

a)



b)



c)



d)



Rys. 9. Przykłady aktywności owadów: a) spichlerz w Przyszowicach (XVIII w), b) chata w Chełmie Śląskim (XIX w.), c) i d) Wieża kościelna w Turośni Kościelnej 1870 r.

2.1.9. Obliny

Oblina to wada przetarcia występująca w tarcicy obrzynanej. Oblinę tworzy zaokrąglona pobocznica kłody przez co tarcica nie jest całkowicie ostrokrawężna [5], [121]. Oblina jest dopuszczalna na całej długości dwóch krawędzi jednej płaszczyzny lub boku według określonych wytycznych dla klas

KW (klasa wysokiej jakości), KS (klasa średniej jakości), KG (klasa gorszej jakości) [N5].

2.1.10. Krzywizny

Tarcica nie obarczona wadą kształtu w postaci krzywizn ma postać prostopadłościanu. Wygięcia tarcicy powodujące odchylenia od tego stanu to krzywizny. Wady powstają w trakcie przetarcia skutkiem uwalniania naprężeń wzrostowych, nieodpowiedniego składowania tarcicy lub niejednorodnego kurczenia się drewna podczas wysychania. Krzywizny pojawiać się mogą na skutek obecności dużych sęków na krawędziach lub błędzającego rdzenia. W tarcicy rozróżnia się krzywiznę podłużną płaszczyzn, krzywiznę podłużną boków, wichrowatość, krzywiznę poprzeczną płaszczyzn [52], [58], [74], [121], [N5]. Przykłady krzywizn pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Przykłady krzywizn

2.1.11. Twardzica

Drewno reakcyjne, u drzew iglastych nazywane twardzicą, powstaje na skutek działania czynników powodujących pochylenie lub wygięcie pnia drzewa (jednokierunkowe wiatry, okiść śnieżna, jednostronne nasłonecznienie, osuwanie gruntu). Na działanie tych czynników rosnące drzewo reaguje odkładaniem w strefie ściskanej pnia lub gałęzi szerszych przyrostów drewna o budowie różnej od drewna normalnego. Nienormalne powiększenie strefy drewna późnego ze zwiększoną grubością błon komórkowych nadaje twardzicy większą wytrzymałość na ściskanie i na zginanie oraz większą twardość a wytrzymałość na rozciąganie i udarność są niższe. Wskutek zwiększonego udziału drewna późnego twardzica przyjmuje barwę brunatnoczerwoną. Twardzica może powstać jednorazowo (twardzica wąska) lub wytwarzać się przez wiele lat (twardzica szeroka) [5], [52], [58], [74], [121].

2.1.12. Wady obróbcze i uszkodzenia mechaniczne

Wady kształtu tarcicy wynikające z niedokładności obróbki oraz uszkodzeń mechanicznych to: rżaz, rysy, falistość, mechowatość oraz wąsy. Ponadto nierównoległość płaszczyzn i boków, nieprostokątność czoł. Transport i przeładunek mogą skutkować obecnością takich wad jak: zgnioty i odłupania fragmentów drewna. Wady te należy odpowiednio zakwalifikować.

2.2. Metody określania parametrów mechanicznych drewna

2.2.1. Metoda wizualna

W pracy [96] stwierdzono, że przy wizualnej ocenie należy mieć świadomość, że drewno jest materiałem anizotropowym i niejednorodnym. Anizotropia

definiuje drewno jako materiał zorientowany, którego wytrzymałość, sztywność w kierunku wzrostu pnia tzn. wzdłuż włókien, są wyższe niż w płaszczyźnie poprzecznej. Niejednorodność zaś dotyczy wszystkich poziomów organizacji materiału. Właściwości mechaniczne w ujęciu makroskopowym zależą od występowania wad. Stosując kryteria wizualnej klasyfikacji wytrzymałościowej uwzględnia się więc te cechy. We Włoszech od 2004 r. dostępny jest dokument służący do oceny drewna w istniejących konstrukcjach in situ, ale dla wielu przypadków jest on niewystarczający. W pracy [96] porównano wyniki wizualnej klasyfikacji wytrzymałościowej drewna z danymi z testów nieniszczących min. badania ultradźwiękowe. Wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań na włoskich gatunkach drewna są następujące:

- ❑ w przypadku starych belek drewnianych obliny (cecha technologiczna) nie mogą być traktowane jako wady obniżające klasyfikację. Oblinowanie powinno się rozpatrywać jako czynnik wpływający na efektywny przekrój poprzeczny,
- ❑ sęki to najważniejsze wady obniżające klasę drewna.

Pracę [96] kończy stwierdzenie, że w ocenie in situ bardziej niezawodny proces klasyfikacji daje wiedza o zewnętrznych defektach (metoda wizualna) ale połączona z interpretacją struktur wewnętrznych metodami nieniszczącymi (NDT).

W Normie PN-D-94021:2013-10 [N5] (tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi) określono wytyczne do sortowania wytrzymałościowego iglastej tarcicy konstrukcyjnej metodą wizualną. Za [N5] podstawą do określenia klasy tarcicy konstrukcyjnej sortowanej wymienioną metodą przyjmuje się rodzaj, wymiary i stopień nasilenia wad drewna widzianych nieuzbrojonym okiem, a które stanowią o cechach wytrzymałościowych tarcicy oraz słoistość i gęstość materiału. Jakość każdej sztuki tarcicy określić należy w miejscu maksymalnego nasilenia wad.

Uprawnienia do sortowania tą metodą w Polsce uzyskuje się poprzez specjalne szkolenie zakończone egzaminem praktycznym. Po zdaniu egzaminu uczestnik otrzymuje imienne uprawnienia do wytrzymałościowego sortowania tarcicy konstrukcyjnej wg PN-D-94021 [N5]. Osoba sortująca drewno metodą wizualną nazywana jest brakarzem. Brakarz bazując na swej wiedzy dokonuje oceny i klasyfikacji poszczególnych sztuk partii tarcicy przyporządkowując elementy do danej klasy sortowniczej:

- KW - klasa wyborowa
- KS - klasa średniej jakości
- KG – klasa gorszej jakości.

Brakarz klasyfikuje każdą sztukę tarcicy pod kątem występujących w niej wad strukturalnych oraz wad kształtu i obróbki [120]. Norma PN-D-94021:2013-10 [N5] obejmuje tarcicę iglastą obrzynaną, szorstką lub struganą, suchą lub mokłą grubości od 22 mm i minimalnym przekroju 2000 mm². Norma [N5] podaje czynności sortownicze według kolejności: sprawdzenie gatunku drewna, wilgotności, wymiarów, jakości oraz naniesienie oznakowania. Sortowanie rozpoczyna się od określenia gatunku drewna poprzez oględziny okiem nieuzbrojonym. Klasyfikacja według [N5], o czym należy pamiętać, dotyczy tarcicy konstrukcyjnej określonego gatunku drewna, a nie rodzaju. Znaczy to, że określa się klasy sortownicze dla sosny zwyczajnej (*Pinus Sylvestris* PNSY), świerka pospolitego (*Picea abies* PCAB), modrzewia europejskiego (*Larix decidua* LAD), jodły pospolitej (*Abies alba* ABAL) lub daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii* PSMN). Następnie sprawdza się wymiary zgodnie z normą PN-EN 1309-1 [N6], natomiast odchyłki wymiarowe uwzględnia się zgodnie z normą PN-EN 336:2013-12 [N15]. Ujemne odchyłki długości są niedopuszczalne. Kolejny etap obejmuje określenie wilgotności tarcicy. Wilgotność odniesienia dla tarcicy konstrukcyjnej wynosi 20%. Według zaleceń PN-EN 14081-1 [N8] pomiaru wilgotności dokonuje się zgodnie z normą PN-EN 13183-2 [N7] elektrycznym wilgotnościomierzem oporowym. Wilgotność docelowa to żądana wilgotność partii. Według PN-EN 14298 [N10]

dopuszcza się odchyłki wilgotności średniej od wilgotności docelowej 18% w wymiarze -2,5%, 2,0%.

Podczas sortowania należy w ocenianym przypadku tarcicy wyodrębnić najslabszy przekrój, w którym znajduje się największe skupisko wad np. sęków. Względem wytrzymałości najslabszego przekroju określa się wytrzymałość całego elementu. Dokładne zbadanie najslabszego elementu, określa tarcicę kwalifikując ją do odpowiedniej klasy. Jeśli nie spełnia wymagań traktuje się ją jako odrzut. Kolejna czynność sortownicza dotyczy określenia wskaźnika sękatości, charakteryzującego udział sęków w powierzchni przekroju poprzecznego najgorszego. Określa się wskaźnik sękatości strefy marginalnej (USM) oraz ogólny wskaźnik sękatości (USC) zgodnie z złącznikiem A normy [N5]. Następnie rozpatruje się oprócz sęków pęknięcia, słoistość, skręt włókien, wady obróbki, kształtu (obliny, krzywizny), chodniki owadzie zgnilizny, obecność drewna reakcyjnego (twardzicy). Poszczególne czynności sortownicze wykonuje się przy użyciu przyrządów pomocniczych tj: rysak, szczelinomierz, miara zwijana, suwmiarka, szablony ukośnych przebiegów włókien.

W literaturze [120] znaleźć można przykłady wykonania oceny wizualnej tarcicy konstrukcyjnej. W tablicy 3 za [5] i [121] podano kryteria wad dla poszczególnych klas tarcicy konstrukcyjnej sortowanej metodą wizualną KW, KS, KG.

Tablica 3. Granice dopuszczania wad dla poszczególnych klas tarcicy konstrukcyjnej sortowanej metodą wizualną [5], [121]

Podstawa klasyfikacji			KW	KS		KG	
				Wariant 1	Wariant 2	Wariant 1	Wariant 2
Sęki bez względu na jakość, wyrażone wskaźnikiem sękatości – strefa marginalna USM*			$\leq 1/4$	$\leq 1/4$	$\leq 1/2$	$\leq 1/2$	$> 1/2$
– na całym przekroju poprzecznym tarcicy USC			$\leq 1/4$	$\leq 1/3$	$\leq 1/4$	$\leq 1/2$	$\leq 1/3$
Skret włókien (ukośny przebieg włókien)			$\leq 7\%$ (1:14)	$\leq 10\%$ (1:10)		$\leq 16\%$ (1:6)	
Pęknięcia, pęcherze żywiczne, zakorki i zabitki:	– głębokie, nieprzechodzące na czoła, boki i przeciwległą płaszczyznę (nie bierze się pod uwagę wad o długości poniżej 300 mm)	dopuszczalne, długości do $1/4$ długości sztuki i nie dłuższe niż 600 mm	dopuszczalne, długości do $1/4$ długości sztuki i nie dłuższe niż 600 mm		dopuszczalne, długości do $1/4$ długości sztuki i nie dłuższe niż 900 mm		
		głębokość do $1/3$ grubości sztuki	głębokość do $1/2$ grubości sztuki		głębokość do $2/3$ grubości sztuki		
	– czołowe nieprzechodzące, przechodzące i okrężne	dopuszczalne, długości do $1/4$ szerokości sztuki	dopuszczalne, długości do $1/4$ szerokości sztuki		dopuszczalne, długości do $1/2$ szerokości sztuki		
Zgnilizna		niedopuszczalna	niedopuszczalna		niedopuszczalna		
Chodniki owadzie		niedopuszczalne	niedopuszczalne		niedopuszczalne		
Sinizna		dopuszczalna	dopuszczalna		dopuszczalna		
Drzewo reakcyjne (twardzica)		dopuszczalne do $1/5$ obwodu	dopuszczalne do $2/5$ obwodu		dopuszczalne do $3/5$ obwodu		
Stoiskość		≤ 4 mm	≤ 6 mm		≤ 10 mm		
Gęstość minimalna sztuki tarcicy** przy wilgotności 20%	≥ 450 kg/m ³	≥ 420 kg/m ³	≥ 400 kg/m ³				
Obłina dopuszczalna najdalej długości dwóch krawędzi jednej płaszczyzny lub boku, zajmująca łącznie	do $1/4$ grubości i $1/4$ szerokości sztuki tarcicy	do $1/4$ grubości i $1/4$ szerokości sztuki tarcicy	– w odległości do 300 mm od czoł do $1/3$ grubości i $1/3$ szerokości sztuki – w odległości powyżej 300 mm od czoł do $1/2$ grubości i $1/3$ szerokości sztuki				
Krzywizna podłużna płaszczyzn	≤ 10 mm	≤ 10 mm	≤ 20 mm				
Krzywizna podłużna boków	≤ 8 mm	≤ 8 mm	≤ 12 mm				
Wichrowatość w odniesieniu do szerokości	≤ 1 mm/25 mm	≤ 1 mm/25 mm	≤ 2 mm/25 mm				
Krzywizna poprzeczna w odniesieniu do szerokości	≤ 1 mm/25 mm	≤ 1 mm/25 mm	≤ 2 mm/25 mm				
Rysy, falistość rządu	dopuszczalna w granicach odchyłek grubości i szerokości określonych dla wymiarów nominalnych						
Nierównoległość płaszczyzn i boków	płaszczyzny powinny być wzajemnie równoległe, boki tarcicy obrzynanej – prostopadłe do płaszczyzn; odchylenia od równoległości powinny mieścić się w granicach dopuszczalnych odchyłek grubości i szerokości określonych dla wymiarów nominalnych						
Nieprostokątność czoł	czoła powinny być prostopadłe do płaszczyzn i boków; odchylenia od prostopadłości powinny mieścić się w granicach dopuszczalnych odchyłek długości tarcicy						

* Dla krawędziaków i belek uwzględnia się marginesy określone dla każdej z czterech powierzchni podłużnych tarcicy.

** Gdy spełnione jest kryterium stoiskości, nie rozpatruje się gęstości.

Końcowym etapem czynności sortowniczych jest sporządzenie protokołu sortowania i określone klasy sortowniczej tarcicy konstrukcyjnej. Relacje klas sortowniczych krajowego drewna konstrukcyjnego (wg PN – D-94021 [N5]) w stosunku do klas wytrzymałościowych (według PN-EN 338 [N16]) określa się na podstawie tabeli. Tabela ma charakter tymczasowy zalecany do chwili wpisania klasyfikacji do PN-EN 1912 [N12]. Norma [N12] ukazała się na razie w języku angielskim, bez polskiego tłumaczenia i polskiego Załącznika Krajowego.

Tablica 4. Relacje klas sortowniczych krajowego drewna konstrukcyjnego w stosunku do klas wytrzymałościowych według Załącznika Krajowego do PN-EN 1995-1-1 [N14]

Gatunek drewna	Grubość mm	KW	KS	KG
Sosna zwyczajna (<i>Pinus Sylvestris</i>)	≥22	C35	C24	C20
świerk pospolity (<i>Picea abies</i>)		C30	C24	C18
jodła pospolita (<i>Abies alba</i>)		C22	C18	C14
modrzew europejski (<i>Larix decidua</i>)		C35	C30	C24

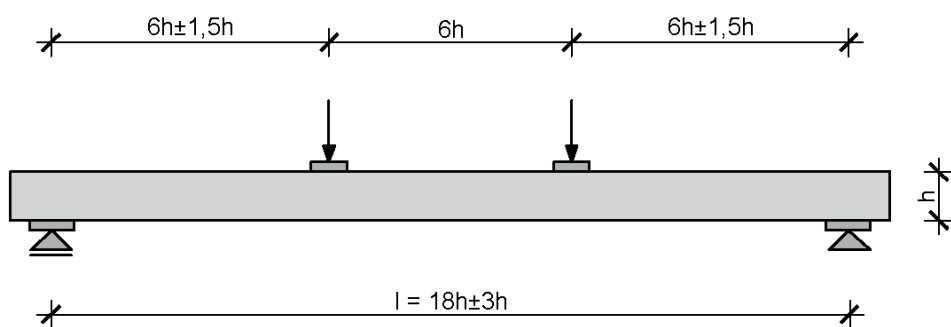
2.2.2. Badania laboratoryjne

Norma PN-EN 380 [N17] podaje jedynie ogólne wytyczne prowadzenia badań. Nie określono w niej wymiarów próbek i schematów statycznych ich obciążenia. W normie stwierdzono jedynie, że dokładność pomiarów ugięć i sił powinna wynosić $\pm 3\%$. Norma zleca, aby podczas badań w laboratorium

wilgotność powietrza wynosiła $65\pm 5\%$, a temperatura $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, chyba że rzeczywiste użytkowanie elementu wymaga innych warunków. Norma PN-EN 384 [N22] również podaje, że podobne warunki klimatyczne (wilgotność powietrza 65% i temperatura 20°C) stanowią poziom odniesienia w badaniach parametrów wytrzymałościowych drewna. Dodatkowo norma [N22] precyzuje, że w przypadku badania wytrzymałości na zginanie warunki odniesienia odpowiadają próbkom o wysokości 150 mm, przy próbie czteropunktowego zginania i rozstawie podpór równym $18 \cdot 150 = 2700$ mm. Oznacza to, że taka próbka daje najbardziej miarodajne wyniki w badaniach na zginanie. W przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie warunki odniesienia odpowiadają próbce o szerokości 150 mm, a długość próbki mierzona poza szczękami maszyny wytrzymałościowej powinna wynosić $9 \cdot 150 = 1350$ mm.

Szczegółowe procedury badań opisano w normie PN-EN 408 [N18]. W przypadku badań na ściskanie i rozciąganie wzdłuż włókien próbki powinny mieć wymiary odpowiednio $45 \times 70 \times 90$ mm i $45 \times 70 \times 180$ mm. Podczas badań leży wykonać tensometryczny pomiar odkształceń na bazie nie mniejszej niż $45/3 = 15$ mm.

Badania wytrzymałości na zginanie wykonuje się na elementach belkowych w teście czteropunktowego zginania. Rozstaw podpór powinien wynosić $18 \cdot h \pm 3h$. Jeśli zachowanie tego rozstawu nie jest to możliwe należy podać rozstaw w sprawozdaniu z badań. Normowy schemat badania pokazano na rys. 10. Obciążenie należy przykładać w jednym cyklu, tak aby zniszczenie uzyskać w czasie 300 ± 120 s. W sprawozdaniu z badań należy zamieścić sposób zniszczenia próbek.



Rys. 11. Schemat badania wytrzymałości na zginanie według PN-EN 408 [N18]

Norma PN-EN 384 [N22] precyzuje zapisy PN-EN 408 [N18] w zakresie optymalnych warunków badania. W przypadku badania na zginanie minimalna wysokość badanego elementu powinna wynosić $h = 150$ mm, długość belki między podporami powinna wynosić $18h$. Badanie powinno być wykonywane w temperaturze 20°C przy wilgotności powietrza 65%, co odpowiada wilgotności drewna około 12%. Norma [N22] podaje również różne współczynniki korekcyjne uwzględniające wpływ innych od optymalnych warunków badania. W przypadku wysokości h mniejszej niż 150 mm wytrzymałość na zginanie uzyskana z badań powinna być podzielona przez współczynnik:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \mid 1,3 \right\}. \quad (1)$$

W przypadku, gdy długość badanego elementu jest mniejsza niż $18h$ wytrzymałość na zginanie uzyskana z badań powinna być podzielona przez współczynnik:

$$k_l = \left(\frac{48h}{l_{et}} \right)^{0,2}, \quad (2)$$

gdzie:

l_{et} – oznacza efektywną długość elementu w mm, obliczaną ze wzoru:

$$l_{et} = l + 5a_f, \quad (3)$$

w którym:

l – odległość między podporami elementu podczas badania,

a_f – odległość między wewnętrznymi punktami przyłożenia obciążenia.

Zgodnie z normą PN-EN 384 [N22] określenie charakterystycznej wytrzymałości drewna na zginanie f_k należy wykonać stosując zależność:

$$f_k = f_{05}k_v \quad (4)$$

gdzie:

$f_{0,5}$ - 5% kwantyl wytrzymałości drewna uzyskanej z badań,

k_v – współczynnik pozwalający na uwzględnienie mniejszej zmienności wartości $f_{0,5}$ pomiędzy próbkami badanymi maszynowo i ocenianymi metodą wizualną. Współczynnik ten wynosi:

- $k_v = 1,0$ w przypadku, gdy wytrzymałość na zginanie jest większa niż 30 N/mm²,
- $k_v = 1,12$ w przypadku, gdy wytrzymałość na zginanie jest mniejsza lub równa niż 30 N/mm².

5% kwantyl wytrzymałości drewna $f_{0,5}$ norma PN-EN 384 [N22] zaleca wyznaczać zgodnie z normą PN-EN 14081-2 [N21] lub PN-EN 14081-3 [N9]. Niestety w normach tych nie podano wzoru na 5% kwantyl wytrzymałości drewna $f_{0,5}$. Kwantyl ten można, za pracą Brunarskiego [7], obliczyć ze wzoru:

$$f_{05} = f_{mean} - t_\gamma s \sqrt{1 + \frac{1}{n}}, \quad (5)$$

w którym:

f_{mean} – średnia wytrzymałość uzyskana z badań,

t_γ - statystyki rozkładu t -Studenta podane w tablicy 5,

n – liczba wykonanych badań,

s – odchylenie standardowe, obliczane ze wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_i - f_{mean})^2}{n}}, \quad (6)$$

gdzie:

f_i – wytrzymałość uzyskana z kolejnego badania.

Tablica 5. Statystyki rozkładu t -Studenta

Liczba badań, n	Rząd kwantyla	
	0,1	0,05
3	1,89	2,92
6	1,48	2,02
10	1,38	1,83
15	1,35	1,76
20	1,32	1,73
30	1,31	1,70
∞	1,28	1,64

2.2.3. Badania nieniszczące

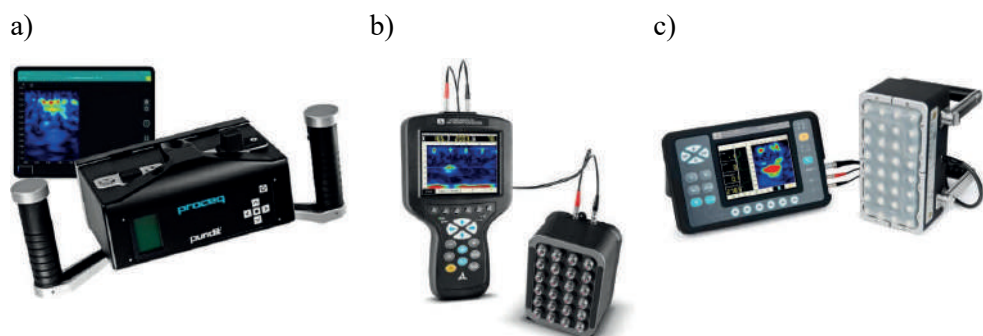
W pracy [111] podano, że wizualna ocena zazwyczaj identyfikuje mniej niż 30% całkowitego uszkodzenia, które występuje w elementach, gdyż degradacja występuje wewnątrz elementów lub w belkach, które nie są dostępne do inspekcji wizualnej wzdłuż całego obwodu. W celu określenia parametrów drewna prowadzi się badania nieniszczące. O wytrzymałości i wilgotności drewna wnioskuje się najczęściej na podstawie badań nieniszczących ultradźwiękowych, penetrujących czy dielektrycznych [4], [19], [18], [21], [22], [27], [78], [97], [102], [103], [123]. Badania ultradźwiękowe polegają na przepuszczeniu przez badany element drewniany ultradźwiękowej fali akustycznej i pomiarze czasu jej przejścia (a co za tym idzie prędkości fali) między sondami nadawczą i odbiorczą. Do badań ultradźwiękowych można

zastosować każde urządzenia zaopatrzone w sondy: nadawczą i odbiorczą, emitujące podłużne lub poprzeczne fale ultradźwiękowe. Najnowocześniejsze z nich zaopatrzone są w punktowe głowice eksponencjalne, niewymagające dodatkowego środka zapewniającego sprzężenie akustyczne głowicy z badanym elementem. Przykładowe urządzenia ultradźwiękowe z głowicami eksponencjalnymi pokazano na rys. 12. Należy podkreślić, że w kraju nie ma opracowanych korelacji między prędkością ultradźwięku, a parametrem mechanicznym (np. jego wytrzymałością na zginanie) dla drewna zabytkowego.



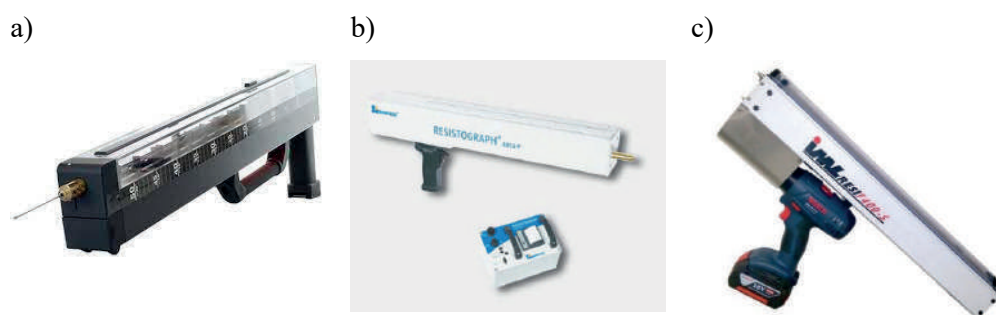
Rys. 12. Przykładowe urządzenia ultradźwiękowe z głowicami eksponencjalnymi: a) UK1401 Surfer, b) Pulsar-2.1, c) Novotest IPSM

Najnowszymi typami urządzeń ultradźwiękowych są tomografy ultradźwiękowe [27], [105]. Zaopatrzone są one zazwyczaj w kilka rzędów głowic eksponencjalnych, osadzonych na sprężynach. W badaniach z wykorzystaniem tomografów ultradźwiękowych stosuje się zwykle ultradźwiękowe fale poprzeczne. Tomografy ultradźwiękowe służą zwykle do lokacji wad wewnętrznych w badanej konstrukcji. Można nimi próbować lokalizować wady drewna zabytkowego [94], [95], [124], [125]. Na rys. 13 pokazano przykładowe tomografy ultradźwiękowe.



Rys. 13. Przykładowe tomografy ultradźwiękowe: a) PD8000, b) A1220 Monolith 3D, c) A1020 MIRA Lite

Do badań penetrujących zalicza się badania rezystografem oporowym i młotkiem do drewna. Są to badania małoniszczące, ponieważ po ich wykonaniu w drewnie pozostają małe otwory. Badania rezystografem oporowym polegają na pomiarze oporu wiertła wprowadzanego do przekroju drewnianego elementu (wiertło Siberta stosowane od roku 1989 lub rezystografy oporowe stosowane od 1992 r. – rys. 14). Problemem, podobnie jak w przypadku badań ultradźwiękowych, jest tu brak krzywych korelacyjnych pomierzonego oporu wiertła do wytrzymałości drewna zabytkowego dla materiałów krajowych.



Rys. 14. Przykładowe rezystografy oporowe: a) R650-S.C, b) 4453-P, c) RESCI F400-5

Młotki do drewna (rys. 15) są podobne do młotków Schmidta dedykowanych do badań betonu. Badanie tymi młotkami polega na wbijaniu w drewno kilkoma uderzeniami młotka stalowej igły o małej średnicy. Głębokość wbicia w drewno mierzy się specjalnym miernikiem zegarowym. Podobnie jak w przypadku rezystorów oporowych i urządzeń ultradźwiękowych nie ma krzywych korelacyjnych między głębokością wbicia stalowego trzpienia w zabytkowe drewno krajowe, a wytrzymałością tego drewna uzyskaną w badaniach wielkowymiarowych próbek.

a)



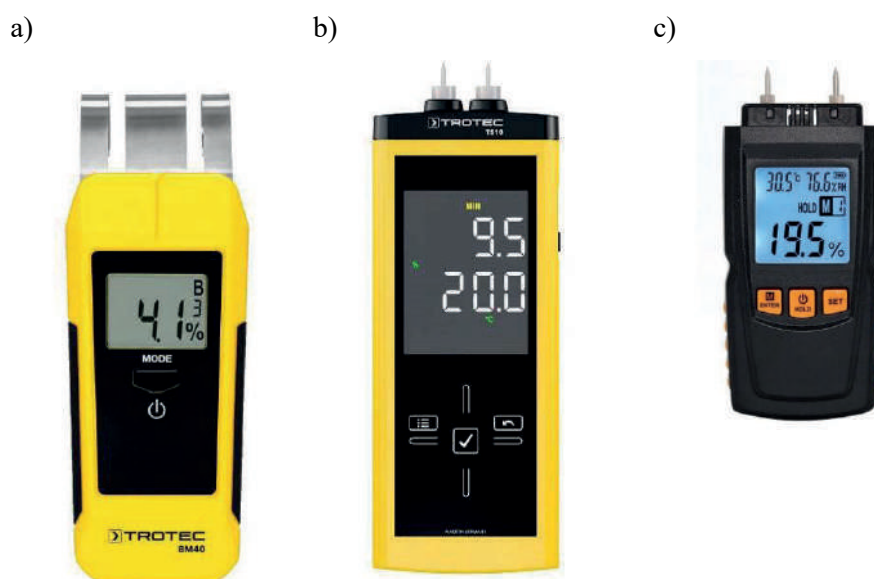
b)



Rys. 15. Przykładowe młotki do drewna: a) DRC Młotek Schmidta do drewna, b) Woodtester

Pomiar wilgotności drewna jest jednym z podstawowych badań konstrukcji [116] ponieważ w istotny sposób wpływa na stan techniczny elementów drewnianych [69]. Wilgotność drewna dokładnie określa się metodą suszarkowo-wagową, lecz wymaga ona pobrania próbek, przewiezienia do laboratorium, ważenia i suszenia w suszarce elektrycznej w temperaturze

100°C do stałej masy i ponownego ważenia. In situ można zastosować nieco mniej dokładne urządzenia elektrometryczne [63], [62]. Urządzenia te mogą być zaopatrzone w sondy wbijane lub przykładane. Pomiar wilgotności następuje poprzez czujniki pojemnościowe za pomocą dielektrycznej metody pomiarowej (pomiar oporności). Oporność elektryczna mierzonego materiału jest zależna od ilości wody i zmniejsza się wraz ze wzrostem wilgotności. Na rys. 16 pokazano przykładowe elektrometryczne urządzenia do pomiaru wilgotności.



Rys. 16. Przykładowe elektrometryczne urządzenia do pomiaru wilgotności:
a) BM40, b) T510, c) GM 620

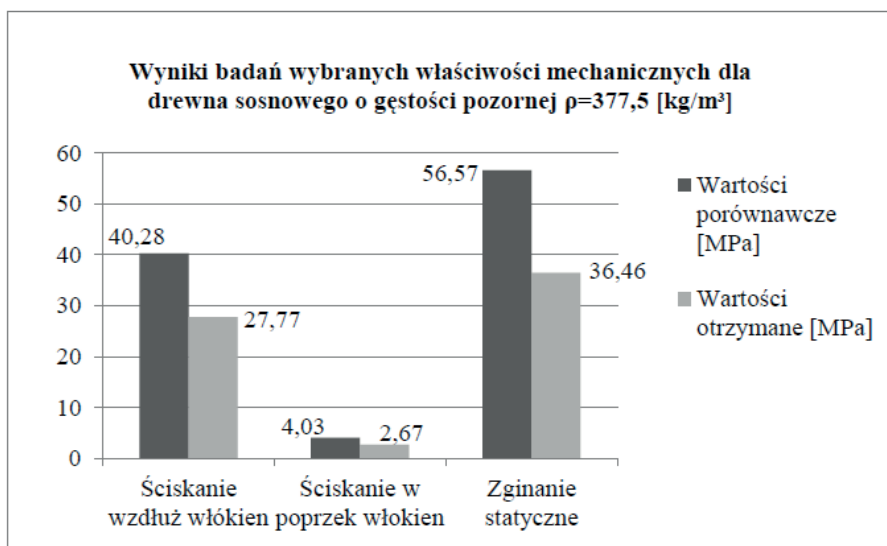
2.3. Wybrane wyniki badań nieniszczących drewna

Drewno stanowiło ważny materiał konstrukcyjny od tysiącleci. Jako materiał nietypowy – anizotropowy i niejednorodny charakteryzuje się właściwościami,

które intrygują naukowców na całym świecie. Anizotropia oznacza, że drewno jest zorientowanym materiałem, którego wytrzymałość i sztywność w kierunku wzrostu pnia drzewa (wzdłuż włókien) są znacznie wyższe niż w płaszczyźnie poprzecznej. Niejednorodności występują na różnych poziomach organizacji materiału, od skali mikroskopowej do strukturalnej. Na poziomie makroskopowym właściwości mechaniczne są dotknięte defektami, takimi jak sęki, drewno reakcyjne, pęknięcia i zabitki [96]. Inżynierowie i naukowcy zaczęli po II wojnie światowej rozwijać temat relacji struktura drewna – własności mechaniczne [65], [16], [17], [8]. Problematyka oceny stanu drewna i zmian wytrzymałości istniejących konstrukcji zabytkowych i współczesnych jest kluczowa przy podejmowaniu decyzji o renowacji obiektów [100], [24], [25], [26]. Metody oceny stanu drewnianych elementów konstrukcyjnych mogą obejmować badania nieniszczące (NDT), półniszczące (SDT) lub niszczące (DT). W przypadku drewna zabytkowego wyklucza się raczej stosowanie metod niszczących. Stosowane techniki NDT są przydatne do szybkiego analizowania obszarów problemowych i są na ogół oparte na korelacjach między parametrami nieniszczącymi i niszczącymi. Zastosowanie badań nieniszczących do oceny właściwości fizykochemicznych drewna stosowanego w konstrukcjach jest od 30 lat przedmiotem wielu badań laboratoryjnych [68]. Najnowocześniejsza ocena drewna in situ została opisana w dokumencie RILEM TC 215 [51]. Badania nieniszczące (NDT) poprzez specyficzne techniki działania pozwalają na szacowanie właściwości fizycznych i mechanicznych drewna konstrukcyjnego. Według [66] w Hiszpanii oprócz oceny wizualnej badania nieniszczące stosuje się od lat 90-tych XX wieku, ale badania nad określeniem właściwości mechanicznych drewna prowadzone były tam już od lat 60-tych. Najczęściej wykorzystuje się do tych celów urządzenia bazujące na ultradźwiękach, wibracjach, penetracji i technikach sondowania. Pierwsza opublikowana praca naukowa [2] z wykorzystania badań nieniszczących drewna w Hiszpanii z użyciem ultradźwięków (urządzenie Steinkamp BP-V) ukazała się w 1992 r. W artykule [66] dokonano przeglądu prac badawczych z wykorzystaniem NDT w Hiszpanii,

w których zaproponowano statystyczne modele liniowe do szacowania właściwości mechanicznych drewna, zbadano czynniki mające wpływ na pomiary (zawartość wilgoci, temperatura, rozmiar próbek, kąt włókna), określano również współczynniki korekcyjne. W pracy [96] badacze podjęli próbę dostarczenia pewnych wskazówek dotyczących skuteczności kryteriów klasyfikacji starych elementów drewnianych, jak również odnieśli się do poziomu dokładności stosowanych metod NDT. Włosi sugerują stosowanie wzajemnie alternatywnych i uzupełniających się metod wizualnej klasyfikacji wytrzymałości oraz nieniszczących pomiarów właściwości. Oba podejścia obarczone są pewną niepewnością.

Badania przeprowadzane na nowym drewnie są liczne i szeroko publikowane. Niewiele jest opracowań naukowych dotyczących badań parametrów wytrzymałościowych drewna historycznego. Wytrzymałość drewna 430 letniego badano na małych próbkach i opisano w pracy [75]. Otrzymane wyniki porównano z wynikami referencyjnymi uzyskanymi z badań drewna nowego. Uzyskane wyniki pokazano na rys. 17.



Rys. 17. Porównanie wytrzymałości drewna zabytkowego z badaniami referencyjnymi drewna nowego [75]

Z wykresów pokazanych na rys. 17 wynika, że rzeczywista wytrzymałość badanego drewna zabytkowego różni się od wartości referencyjnych. Otrzymane wartości są mniejsze o 36% dla zginania statycznego, o 34% przy ściskaniu w poprzek włókien oraz 31% przy ściskaniu wzdłuż włókien.

2.3.1. Semi - nieniszczące badania rezystografem oporowym

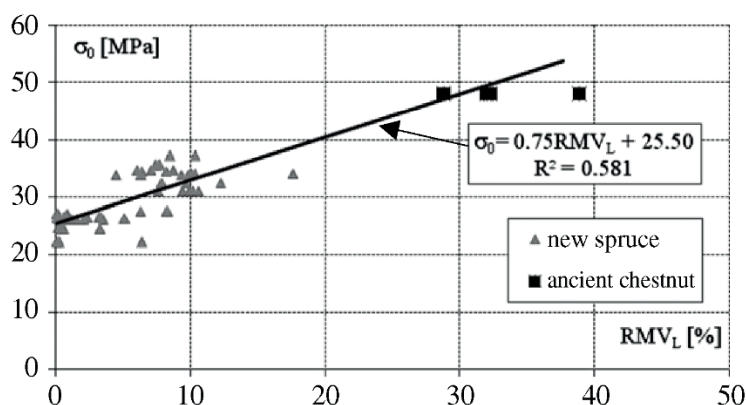
Rezystograf jest narzędziem stosowanym w badaniach nieniszczących do oceny stanu drewna w konstrukcjach historycznych. Metoda rezystograficzna pozwala na ocenę struktury drewna w przekroju elementu konstrukcji w miejscu badania. Umożliwia zdiagnozowanie zmian gęstości drewna wywołane deterioracją biologiczną [49], [113]. Badanie polega na pomiarze oporu wiercenia wiertła w drewnie, zapisanego w formie wykresu [40]. Opór wiercenia zależy od różnicy gęstości drewna wczesnego i późnego, od struktury przyrostów rocznych, zmian gęstości będących wynikiem działania czynników biologicznych oraz kąta wiercenia [82], [83], [98]. Wiercenie odbywa się z zastosowaniem elastycznego wiertła o średnicy 1,5-3,0 mm i długości około 500 mm. Wiertło obraca się ze stałą prędkością około 1500 obrotów na minutę, urządzenie rejestruje wyniki pomiaru co 0,1 mm w formie wykresu zależności oporów wiercenia od głębokości wiercenia. Pojawiający się na wykresie pik wskazuje na wysoki opór, co odpowiada dużej gęstości materiału. Odpowiednio spadki obrazują mały opór i małą gęstość materiału. Linie poziome wskazują na miejsca całkowitego rozkładu materiału. Po wykonanym badaniu w materiale pozostaje otwór o średnicy nie większej niż otwory wylotowe ksylofagów, dlatego metodę zaliczyć można do metod semi-nieniszczących (SDT) [41], [40], [98].

Na przykładzie badań elementów zrębu ścian drewnianej cerkwi w Miękiszu Starym w pracy [113] wykazano skuteczność badań rezystograficznych w określeniu stopnia degradacji tkanki drzewnej. Wyniki badań przyczyniły się

do optymalizacji zakresu transferu polichromii z elementów zniszczonych na nowe. Autor pracy zwraca uwagę, że jest to metoda ingerująca w delikatną warstwę polichromii, wymaga więc staranności implementacji. Klasyfikuje on metodę jako punktową, dostarczającą danych w miejscu odwiertu. Precyzyjne badanie wymagałoby znacznego zagęszczenia punktów pomiarowych, co w przypadku obiektów zabytkowych jest niemożliwe. Metoda może być wtedy zaliczana do metod inwazyjnych. Artykuł [12] opisuje zastosowanie metody rezystograficznej w ocenie mechanicznych właściwości drewna w zabytkowych konstrukcjach. Badania przeprowadzono na próbkach drewna bukowego (*Fagus sylvatica*) pochodzącego z elementów konstrukcyjnych zniszczonych przez owady. Uzyskano korelacje liniowe pomiarów rezystograficznych z gęstością oraz z wytrzymałością na ściskanie małych próbek drewnianych. Autorzy zaproponowali wstępną hipotezę wykorzystania rezystografu do oznaczenia charakterystycznej wytrzymałości drewna. Korelacje pomiędzy pomiarem rezystograficznym, a gęstością próbek dla drewna kasztanowca przytacza praca [31]. Przydatność metody do oceny stanu technicznego stropów drewnianych, oraz innych elementów drewnianych potwierdzili autorzy prac [40],[122],[11]. W [6] rezystograf wykorzystano do uzupełnienia informacji uzyskanych innymi metodami nieniszczącymi. Pozwoliło to na określenie poziomu pogorszenia struktury drewna i wskazano puste przestrzenie wewnątrz elementów badanych kratownic. Autorzy zauważyli, że niektórzy badacze, w tym Feio [31] próbowali zastosować wyniki uzyskane z badań rezystografem do szacowania parametrów mechanicznych. Feio zestawiał dane uzyskane z badań rezystografem z wynikami badań wytrzymałościowych. W obliczeniach posłużył się parametrem RM (Resistance Measure), obliczonym jako iloraz całkowitej powierzchni pod wykresem przez głębokość penetracji wiertła:

$$RM = \frac{\int_0^{depth} Area}{depth} \quad (7)$$

W artykule [10], dla przebadanych próbek kasztanowca, uzyskano korelację między badaniami rezystograficznymi przeprowadzonymi wzdłuż kierunku równoległego do włókien a podłużnym naprężeniem ściskającym. Podobnie jak Feio w [31] wyniki badań rezystografem przedstawiono jako pole pod wykresem uzyskanym z badań. Wzór opisujący tę zależność pokazano na rys. 18.



Rys. 18. Zależność między wytrzymałością na ściskanie σ_0 a wynikami badań rezystograficznych opisanym polem pod wykresem z badań [10]

Autorzy w [96] przeprowadzili analizę regresji w celu oceny korelacji pomiędzy uzyskanymi wynikami testu rezystografem oporowym a gęstością drewna. Wartości średnie z testów zostały użyte jako parametry NDT. Nie stwierdzono korelacji ani dodatniej, ani ujemnej.

Analizy rezystograficzne to bardzo efektywne metody określania stanu zachowania drewnianej tkanki historycznej konstrukcji. Stosowanie metody pozwala od 1987 r. doświadczonym inżynierom oceniającym drewniane konstrukcje historyczne na uzyskanie informacji na temat wewnętrznego stanu belek i połączeń [98]. W 1992 r. Rinn wprowadził do użycia wiertło przypominające igłę o małej średnicy [6]. Analizę rezystograficzną w obliczu prowadzonych badań należy jednak traktować jako jakościową ocenę konstrukcji. Z uwagi na nieraz przypadkowość wyboru miejsca odwiertów oraz

punktowy charakter tego rodzaju analizy pozwala na określenie tylko przybliżonego stanu pozostałej części badanego elementu. Zasadnym wydaje się być stwierdzenie, że metoda badania rezystografem powinna być stosowana z innymi metodami, aby zapewnić większą ilość danych [113].

2.3.2. Małoniszczące badanie młotkiem do drewna

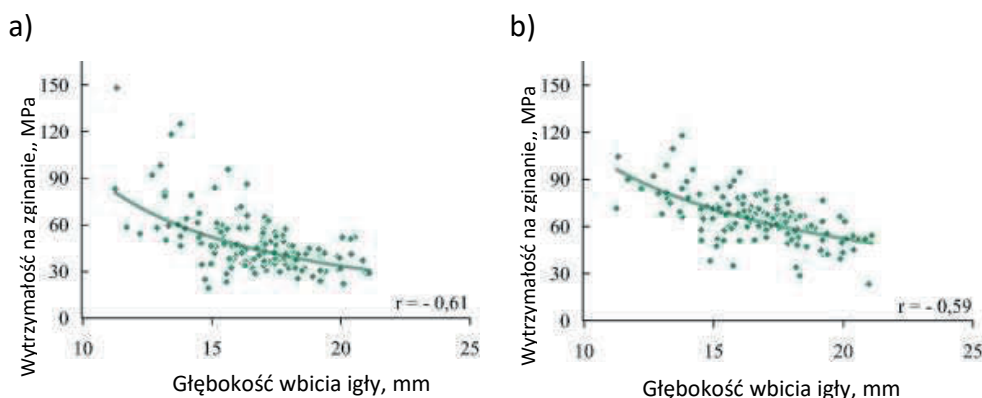
Pomiar twardości drewna wykonywany za pomocą młotka do drewna jest jedną z metod określania cech fizykomechanicznych materiału. Z uwagi na niewielkie punktowe wgłębienia pozostające po badaniu określa się je mianem semi-nieniszczących. Historycznie rzecz ujmując prekursorem testów sklerometrycznych jest użycie noża lub szpikulca do badania substancji drewna i oceny stopnia jego rozkładu [96]. Testy wykonywane za pomocą młotka do drewna są używane do jakościowego określenia stanu materiału. Badania polegają na penetracji materiału cienkim trzpieniem wprowadzanym do materiału za pomocą mechanicznego młotka o stałej energii uderzenia. Jakość warstw przypowierzchniowych określa się przez analizę wielkości zagłębienia igły. Znalezienie zależności między wynikami badań SDT, a badaniami niszczącymi jest potrzebne, a wynika wprost z zaleceń [N11]. W Kraju do niedawna badania przy użyciu młotka do drewna pozwalały na analizę jakościową, natomiast z powodu braku krzywych korelacyjnych z wynikami badań niszczących nie można było odnieść wyników do oceny ilościowej. Obecnie takie badania są prowadzone. Niestety nie ma danych korelacyjnych wyników badań semi-nieniszczących z wytrzymałością drewna historycznego. W Polsce prowadzono wiele badań przy wykorzystaniu tego urządzenia z propozycjami krzywych korelacyjnych dla drewna nowego. Jaskowska-Lemańska przedstawiła w pracach [45], [47] badania nowego drewna konstrukcyjnego pozyskanego z tartaku. Analizowano 3 gatunki drewna: sosnowe, świerkowe, jodłowe z podziałem na klasy sortownicze. Badania przeprowadzano dla próbek o wymiarach 50x50x1000 mm. Badano

elementy w 9 punktach pomiarowych dla każdej próbki. Odczyty dla zagłębień igły młotka odnotowywano dla pojedynczego i dwukrotnego zagłębienia. Wyniki badań sklerometrycznych dla drewna badanych gatunków wykazują silną korelację z gęstością wyrzynka oraz również silną korelację z wytrzymałością na zginanie i ściskanie. W tablicy 6 zamieszczono wyniki badań NDT iSDT dla drewna sosnowego, świerkowego i jodłowego.

Tablica 6. Wyniki badań NDT i SDT zbiorczo dla drewna: sosnowego, świerkowego i jodłowego [47]

Parametr	v	PD_1	PD_2	RM
	[m/s]	[mm]	[mm]	[-]
x_{min}	1134,69	7,65	11,25	93,00
x_{sr}	1904,45	11,57	16,62	114,44
x_{max}	2457,77	17,01	21,10	148,00
s	253,62	1,71	2,06	11,41

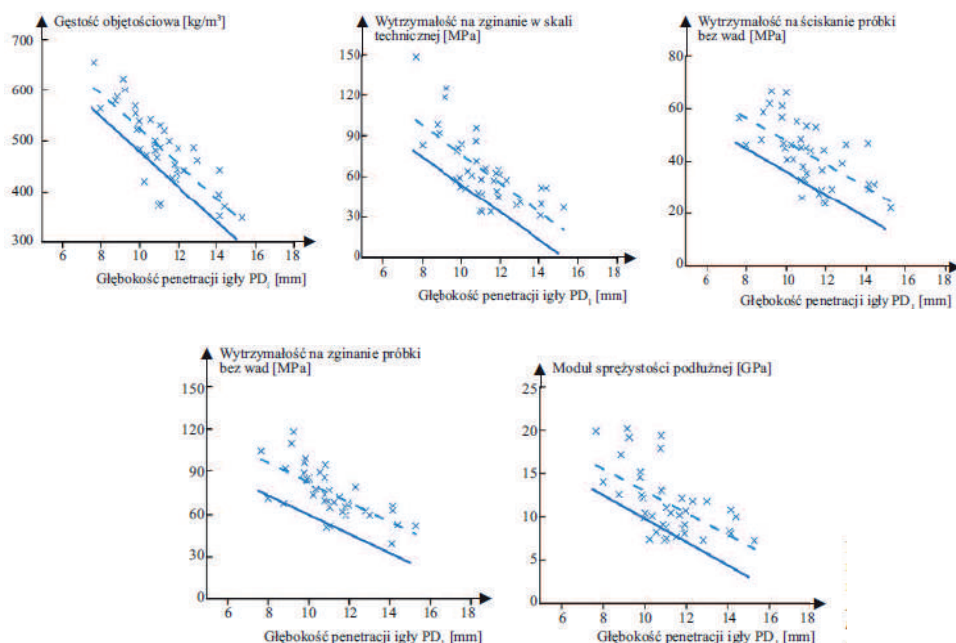
W pracy [47] wykazano, że analizowane zbiorczo badania próbek wykazały przy badaniu sklerometrycznym silną korelację z gęstością ($r=0,74\div0,77$), korelacja o wytrzymałości na zginanie dla próbki $b=1000$ mm jak i dla małej próbki bez wad jest zbliżona, w zakresie $r=0,53\div0,61$. Korelacja pomiędzy badaniami NDT/SDT zbiorcza dla gatunków, a modułem sprężystości i wytrzymałością na ściskanie małej próbki bez wad jest niższa niż dla wyodrębnionych gatunków. Na rys. 19 pokazano korelacje między głębokością wbicia igły po dwukrotnym uderzeniu młotkiem do drewna, a wytrzymałością na zginanie.



Rys. 19. Korelacja badań młotkiem do drewna z wytrzymałością na zginanie: a) większych próbek, b) małych próbek bez wad [47]

Jaskowska-Lemańska w pracy [46] przedstawiła również korelacje pomiędzy wynikami uzyskanymi z badań sklerometrycznych, a badaniami laboratoryjnymi dla drewna sosnowego z różnych siedlisk na terenie Polski. Analizowano próbki nowego drewna sosnowego wymiarach 50x50x1000 mm. Procedura badawcza obejmowała badanie młotkiem do drewna Woodtester z jednokrotnym i dwukrotnym dociskiem igły, badanie wytrzymałości na zginanie, określenie modułu sprężystości przy zginaniu, oznaczenie gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie (dla próbek bez wad). Otrzymano liniowe zależności korelacyjne pomiędzy cechami fizykomechanicznymi drewna a wynikami badań sklerometrycznych. Oprócz umiarkowanie silnej korelacji z modułem sprężystości odnotowano silne korelacje pozostałymi wynikami badań niszczących. Zależność cech fizykomechanicznych od wyników badań sklerometrycznych przedstawia rys. 19. Autorka zaleca, aby przy korzystaniu z zależności w praktyce posługiwać się przekształconymi zależnościami liniowymi sprowadzonymi do poziomu bezpiecznego. Polega to na przyjęciu funkcji odpowiadającej 5 proc. kwantylowi bezpieczeństwa (gruba linia zaznaczona na rys. 19). Proponuje stosowanie uzyskanych wyników do szacowania właściwości fizykomechanicznych drewna w konstrukcjach

istniejących z uwzględnieniem jednak ograniczeń wynikających z naturalnych wad, co wynika z zapisów normy PN-EN 17121 [N11].



Rys. 20. Korelacje między głębokościami penetracji igły, a własnościami mechanicznymi drewna [46]

Zależność między wytrzymałością na zginanie f_m drewna, a głębokością wbicia igły h przy jednokrotnym uderzeniu młotkiem opisano w pracy [46] wzorem:

$$f_m = -10,152h + 176,4, \quad (8)$$

a 5% kwantyl tej wytrzymałości $f_{m5\%}$ wzorem:

$$f_m = -6,8h + 128. \quad (9)$$

W przypadku dwukrotnego uderzenia młotkiem zależności te wynoszą odpowiednio:

$$f_m = -7,5324h + 183,79, \quad (10)$$

$$f_m = -7,5h + 160. \quad (11)$$

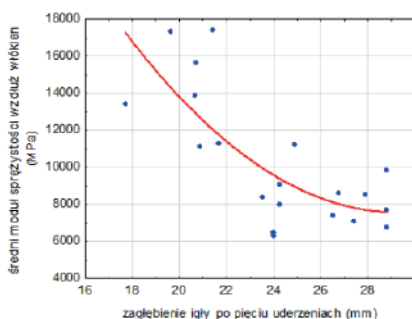
W [43] przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem Woodtestera do badań próbek o wysokiej wilgotności. Z uwagi na wnikanie igły w materiał poza możliwą penetrację, badania wykonano przy pojedynczym i podwójnym uderzeniu młotka, a nie pięciokrotnym jak zaleca producent urządzenia. Przebadano kilka gatunków drewna. Testy wykonane w tym badaniu dowodzą, że nie można pominąć wpływu wilgotności drewna na wyniki testów. Badania sklerometryczne wskazują na wzrost głębokości penetracji wraz ze wzrostem wilgotności drewna. Wszystkie gatunki po przekroczeniu punktu nasycenia włókien wykazały zmniejszenie wpływu wilgoci na uzyskane wyniki.

W Polsce badania sklerometryczne stosowane są do oceny stopnia degradacji istniejących konstrukcji drewnianych. W pracy [70] autorzy wykorzystali Woodtester do badania więźby w XVIII w budynku. Na podstawie głębokości wbicia igły oszacowano gęstość drewna, a następnie moduł sprężystości, który został wykorzystany w obliczeniach statycznych. W [126] i [71] diagnozowano więźbę kościoła z przełomu XVI i XVII z dachem przebudowanym w XX wieku. Inspekcja wizualna z testami młotka do drewna wykazały postępującą korozję biologiczną na niektórych elementach. Klasę drewna określono dzięki zależności między gęstością i modułem sprężystości. Wysłano wniosek, że elementy konstrukcji drewnianych wykonane z dużych, długich kłód charakteryzują się zmiennością parametrów wytrzymałościowych w przekrojach poprzecznych wzdłuż elementu. Wyższe parametry sortymenty przyjmują w części odziomkowej pnia, a niższe są charakterystyczne dla części bliższej korony drzewa.

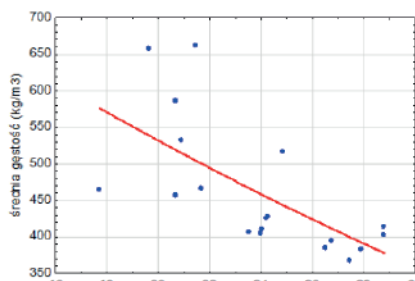
W pracy [128] badano wybrane, 100 i 200 letnie elementy budynków, spełniających kryteria drugiej klasy użytkowania według PN-EN 1995-1-1 [N14]. Badano między innymi więźbę z przełomu XIX i XX wieku, więźbę XVIII-wiecznego kościoła i budynku z XIX wieku. Za pomocą opracowanej przez K. Zimińskiego [127] procedury wykorzystującej badanie sklerometryczne urządzeniem Woodtester określono moduł sprężystości i klasę drewna.

W artykule [127] opisano pomiar twardości drewna przy użyciu urządzenia Woodtester jak również wykonano badania niszczące. Młotkiem do drewna badano próbki wielkoformatowe sosnowe współczesne i zabytkowe w wieku 90-270 lat bez wad spowodowanych przez owady i grzyby. Badania niszczące na małych próbkach przygotowanych z uprzednio zbadanych Woodtesterem. Badano moduł sprężystości wzdłuż włókien oraz wytrzymałość na zginanie na próbkach bez wad. Dla drewna współczesnego stwierdzono silną korelację wyników przy różnych ilościach uderzeń młotka do drewna. Dla drewna historycznego lepszą korelację uzyskano przy 5 uderzeniach i więcej. Zależności pomiędzy wynikami testu sklerometrycznego, a parametrami fizycznymi i wytrzymałościowymi zaprezentowano w formie wykresów dla drewna historycznego (rys. 21).

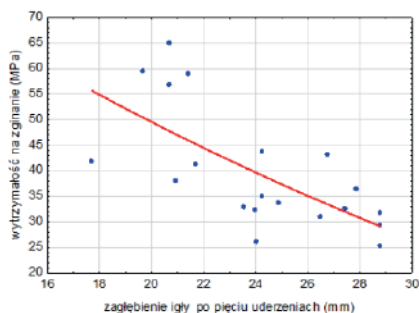
a)



b)



c)



Rys. 21. Korelacje pomiędzy własnościami drewna a głębokością wbicia igły w drewnie historycznym, a: a) średnim modułem sprężystości, b) średnią gęstością, c) wytrzymałością na zginanie [127]

Uzyskana zależność między wytrzymałością na zginanie f_m drewna historycznego, a głębokością wbicia igły h przy pięciokrotnym uderzeniu młotkiem ma postać:

$$f_m = 114 - 3,85h + 0,0313h^2. \quad (12)$$

Autorzy pracy [127] zalecają 5-krotne uderzenia dla drewna historycznego. Pomiarów dokonywano przy poziomym ułożeniu młotka dla wilgotności 15%. Dla drewna zabytkowego stwierdzono silną zależność korelację pomiędzy wynikami badania sklerometrycznego, a gęstością materiału, wytrzymałością na zginanie i modułem sprężystości. Autorzy wysunęli wniosek, iż w przypadku drewna historycznego metoda wykorzystania urządzenia Woodtester jest dobra do określenia następujących parametrów: gęstość, wytrzymałość na zginanie, moduł sprężystości wzdłuż włókien. Należy wykonywać nie mniej niż pięć uderzeń młotkiem. Dalsze zlecenia dotyczą kierunku wbicia igły, którą należy sytuować zawsze w kierunku prostopadłym o słoju. Autorzy zalecają ponadto, aby pomijać w pomiarach okolice sęków, pęknięć, krawędzi oraz rdzenia. W przypadku rozbieżności pomiarów od średniej o więcej niż 20% zaleca się, aby skrajne wyniki odrzucić i powtórzyć pomiar.

W pracy [61] opisano wyniki badań z nowego drewna sosnowego i świerkowego. Badania prowadzono wbijając igłę równolegle (od czoła elementu) i prostopadle do włókien (z boku elementu). W badaniach drewna świerkowego i sosnowego stwierdzono korelację między wgłębieniem igły w poprzek włókien, a wgłębieniem igły wzdłuż włókien, wahającą się od 0,64 do 0,76 (średnio 0,72) dla elementów świerkowych i od 0,66 do 0,84 (średnio 0,70) dla elementów sosnowych. Oznacza to, że aby uzyskać wytrzymałość drewna ze wzorów korelacyjnych, prowadząc badania od czoła (wzdłuż włókien), uzyskane wartości należy pomnożyć przez 0,72 dla elementów świerkowych i przez 0,70 dla elementów sosnowych. Taka korelacja może być potrzebna w badaniach elementów belkowych opartych na ścianach

ryglowych (mur pruski lub szachulcowy), z dostępem od strony elewacji. W artykule podano ponadto własną korelację między wbiciem igły prostopadle do włókien dla drewna sosnowego:

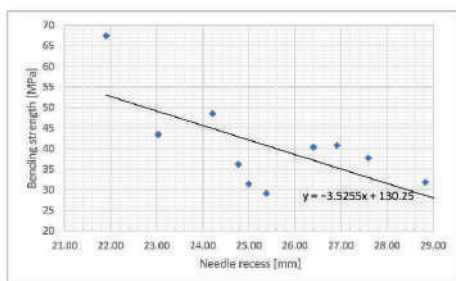
$$f_m = -3,5255h + 130,25, \quad (13)$$

oraz dla drewna świerkowego:

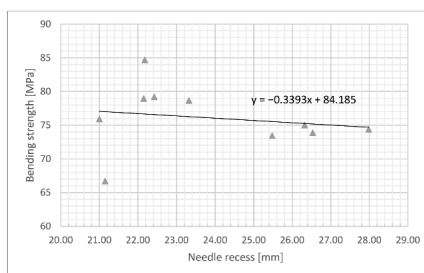
$$f_m = -0,3393h + 84,185. \quad (14)$$

Na rys. 22 pokazano uzyskane z badań korelacje między wytrzymałością na zginanie, a głębokością wbicia igły.

a)



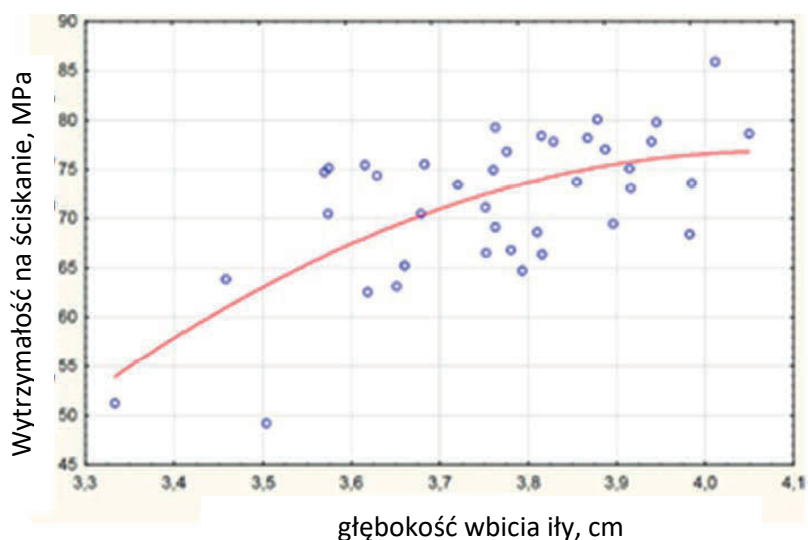
b)



Rys. 22. Korelacje pomiędzy wytrzymałością na zginanie, a głębokością wbicia igły w drewnie nowym

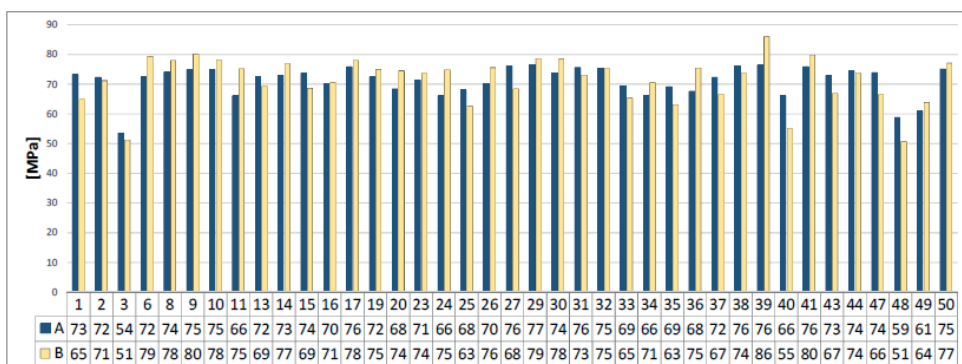
Badania przeprowadzone na bezsęcznych małych próbkach sosnowych o wymiarach 30x60x180 mm (drewno nowe) młotkiem do drewna WOODPecker DRC oraz badana niszczące wytrzymałości próbek na ściskanie opisano w pracy [108]. Badania miały charakter eksperymentalny. Autorzy przedstawili zależność między wytrzymałością na ściskanie, a sklerometrycznymi wynikami badania drewna (rys. 23). Pokazane na rysunku wyniki są nieco dziwne. Im większa wytrzymałość, tym większa gęstość drewna, a co za tym idzie głębokość wbicia igły powinna maleć wraz ze

wzrostem wytrzymałości drewna. Na wykresie jest odwrotnie. Być może autorzy zamiast głębokości wbicia igły analizowali wielkość jej wystawiania ponad badany element, czyli wartość mierzoną miernikiem zegarowym wchodzącym w skład urządzenia pomiarowego (zob. rys. 15a).



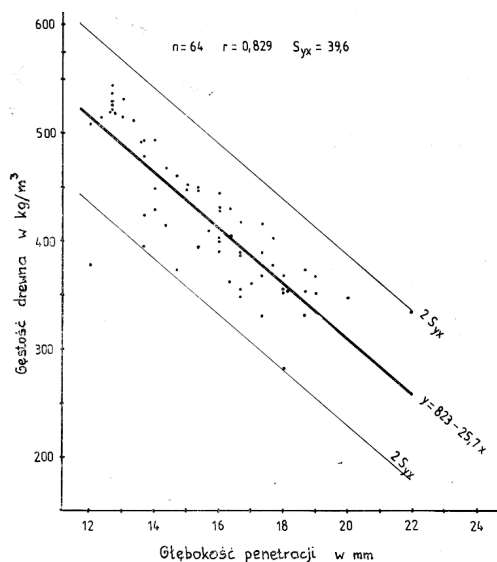
Rys. 23. Korelacja między wytrzymałością na ściskanie, a głębokością wbicia igły [108]

Autorzy pracy [108] porównali wyniki wytrzymałości uzyskanej ze sklerometrycznego testu z wytrzymałością na ściskanie uzyskaną w badaniach niszczących. Wyniki dotyczyły 39 próbek bez wad. Autorzy dowodzą (rys. 24), że istnieje ścisły związek między wytrzymałością na ściskanie, a badaniem sklerometrycznym. Ponieważ wyniki z badań laboratoryjnych i uzyskane z korelacji dla młotka do drewna są zbliżone, potwierdza to tezę, że przy określeniu korelacji, jak i w badaniach pokazanych na rys. 24 mierzono wielkość wystawiania igły, a nie jej zagłębienie.



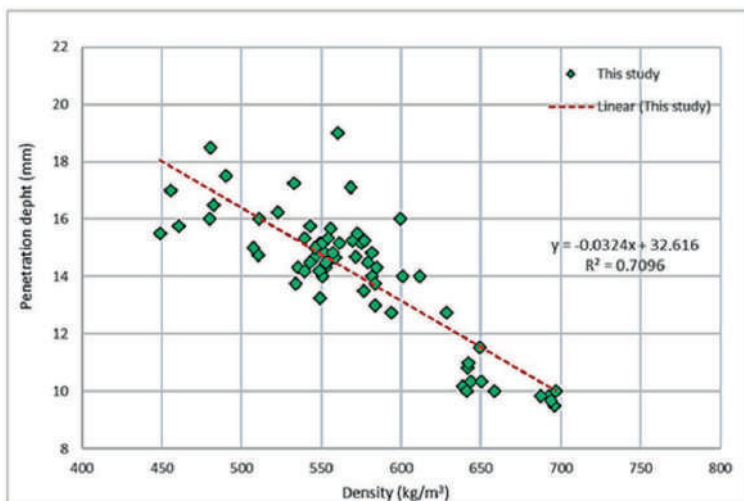
Rys. 24. Porównanie wytrzymałości uzyskanej z badań laboratoryjnych z wytrzymałością uzyskana na podstawie badań młotkiem do drewna [108]

Przed pojawieniem się na rynku młotków do drewna stosowano urządzenia o nawie Pilodyn. Urządzenie działało na podobnej zasadzie, a badanie polegało na wbijaniu stalowej igły o średnicy 2,5 mm w drewno [33]. W pracy [32] zamieszczono korelację dla drewna świerkowego między głębokością penetracji igły, a gęstością drewna (rys. 25).



Rys. 25. Korelacja między głębokością penetracji igły a gęstością drewna świerkowego [33]

W pracy [28] również zaproponowano korelację między głębokością wbicia igły urządzenia Pilodyn, a gęstością drewna iglastego (rys. 26). Korelację tę opracowano na podstawie przeglądu badań z lat 1978÷2024.



Rys. 26. Korelacja między głębokością penetracji igły a gęstością drewna iglastego [28]

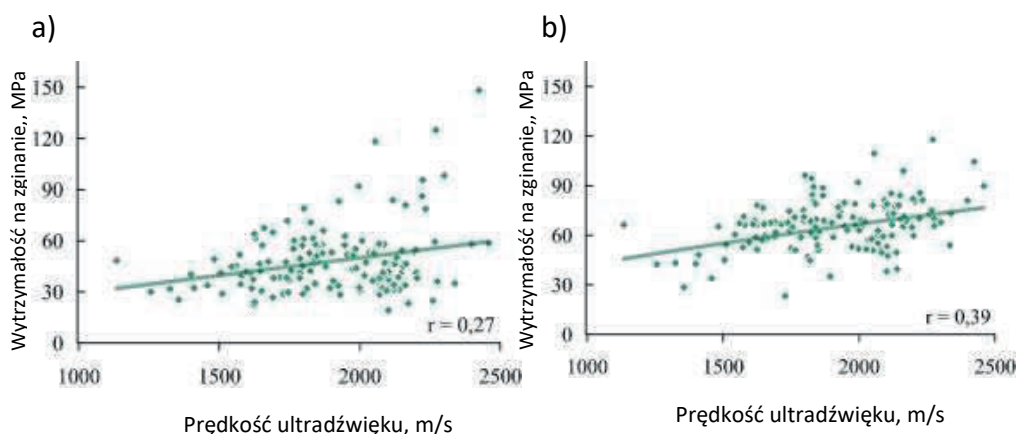
2.3.3. Badania ultradźwiękowe

Praca [30] zawiera informacje na temat metod akustycznych stosowanych do nieniszczących badań drewna. Wykazano w niej, że pierwsze zastosowania metody ultradźwiękowej do badań drewna pochodzą z lat 60-tych XX wieku. Obecnie zastosowanie ultradźwięków staje się coraz bardziej powszechne. Znajdują one zastosowanie w medycynie, w technice wojskowej, a przede wszystkim w zagadnieniach technicznych do badań struktury różnych materiałów, w tym drewna. Zakres częstotliwości stosowanej do badań elementów drewnianych wynosi od 100 do 500 kHz (1MHz). Drewno jako ciało stałe oprócz sprężystości objętościowej ma również sprężystość postaciową.

W takim ośrodku występują fale podłużne (charakterystyczne dla cieczy i gazów) oraz fale poprzeczne, gdzie przemieszczenia cząstek odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali [23], [104]. Przyjmuje się, że podczas propagacji fal akustycznych w materiale stałym charakterystyki magazynowania energii (prędkość fali) i rozpraszania energii (tłumienie lub osłabienie fali) są kontrolowane przez te same mechanizmy, które określają właściwości mechaniczne materiału [48]. Prekursorem użycia techniki NDT wykorzystującej fale ultradźwiękowe do charakterystyki sprężystej drewna promował Hearmon [35]. Określanie właściwości drewna przy zastosowaniu propagacji fal przyciągało uwagę wielu badaczy. W pracy [114] z 1986 r. zbadano z wykorzystaniem ultradźwięków drewniane słupy. Czasy propagacji ultradźwięków były używane jako mierzalne dane do rekonstrukcji komputerowej. Autorzy sugerowali, że ocena drewnianych elementów przy użyciu ultradźwięków zyskała zainteresowanie ze względu na łatwość i bezpieczeństwo obsługi (w porównaniu z młotkiem udarowym czy tomografią rentgenowską) i będzie zapewne powszechnie stosowana [114]. W 1990 r, w pracy [30] zespół badaczy opisuje przegląd metod nieniszczących jako możliwych do wykorzystania w istniejących konstrukcjach drewnianych. W artykule [76] opisano badania 77 próbek drewna z zabytkowego obiektu w Irlandii. Wykorzystano badanie NDT z pomiarem prędkości przepływu fali ultradźwiękowej. Zastosowano ocenę przy użyciu fal akustycznych do określenia właściwości mechanicznych. Na podstawie prędkości fali ultradźwiękowej w połączeniu z gęstością drewna można obliczyć dynamiczny moduł sprężystości. Dynamiczny moduł sprężystości wykorzystywany był natomiast w badaniach [3], [67], [15], [53] w celu oszacowania modułu sprężystości i wytrzymałości próbek drewna. Autorzy tych prac sugerują jednak, aby zachować ostrożność przy takim szacowaniu wytrzymałości elementu konstrukcyjnego, trudno bowiem w taki sposób odnaleźć najsłabszy przekrój z powodu wystąpienia lokalnej wady, której wpływ może decydować o nośności elementu. Próbę oceny właściwości ściskających drewna kasztanowca (ściskanie prostopadłe do włókien) przy użyciu ultradźwięków

podjęto w [68]. Badano próbki drewna starego i nowego. Uzyskane wyniki dowodzą, że wytrzymałość na ściskanie oraz sztywność są dobrze skorelowane z metodą ultradźwiękową. Zwraca się jednak uwagę na uwzględnienie orientacji kierunku obciążenia w stosunku do słoików rocznych. Grupa badawcza z Walencji przeprowadziła studium przypadku [91] na budynku „Villa Ivonne” w Melianie. Wykorzystano ultradźwięki do wyznaczenia modułu sprężystości i na tej podstawie można było dokonać analitycznej weryfikacji nośności. W pracy [92] podjęto próbę określania trwałości elementów szybów górniczych wykorzystując min. badania ultradźwiękami. Badania przeprowadzono w kopalni soli w Wieliczce.

Jaskowska-Lemańska w ramach rozprawy doktorskiej [47] prowadziła również badania nieniszczące urządzeniem ultradźwiękowym PunditLab zaopatrzonym w głowice o częstotliwości 54 kHz generujące podłużne fale ultradźwiękowe. Badaniom poddano te same elementy co w przypadku młotka do drewna. Na rys. 27 pokazano korelacje wyników badań ultradźwiękowych z niszczącymi.

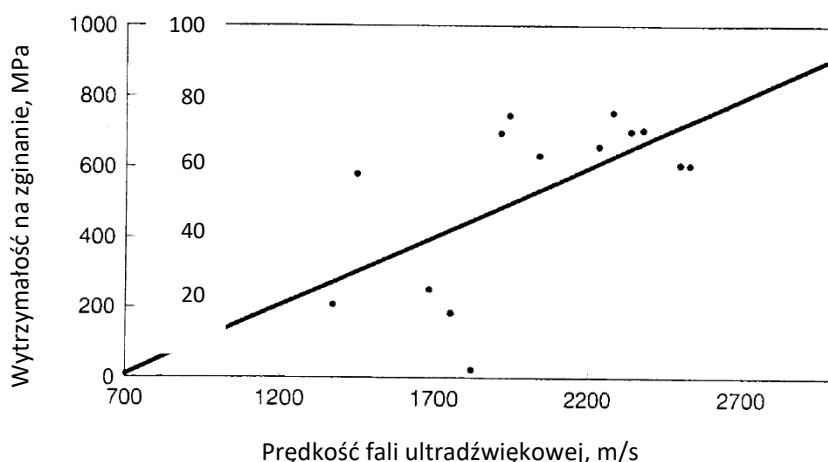


Rys. 27. Korelacja badań młotkiem do drewna z wytrzymałością na zginanie:
a) większych próbek, b) małych próbek bez wad [47]

W pracy [99] wykonano korelację prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej z wynikami badań niszczących wykonywanych zgodnie z normą hiszpańską. Niestety autorzy nie podali wymiarów próbek do badań niszczących ani rodzaju badanego drewna. Zależność między wytrzymałością na zginanie f_m a prędkością ultradźwiękowej fali podłużnej V_n opisano wzorem:

$$f_m = 0,75V_n - 956, \quad (15)$$

a uzyskane wyniki pokazano na rys. 28.



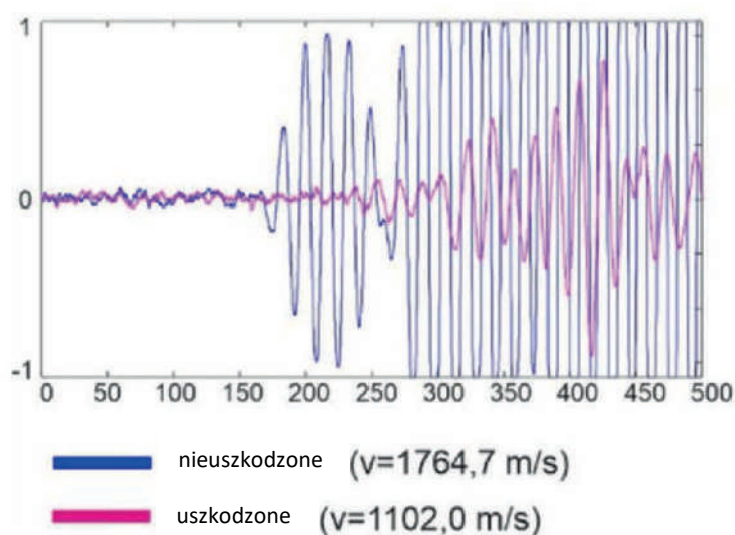
Rys. 28. Korelacja prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej z wynikami badań niszczących [99]

W pracy [117] autorzy wykonali podobną korelację, ale dla fal poprzecznych. Uzyskano następującą zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie f , a prędkością ultradźwiękowej fali podłużnej V_t :

$$f = 44,2V_t + 2338,6, \quad (16)$$

W pracy [130] opisano badania więźb dachowych sześciu kościołów zlokalizowanych na Żuławach. Przeprowadzono badania metodą wizualną oraz badania nieniszczące urządzeniem radarowym i ultradźwiękowym.

Badano wybrane elementy konstrukcji, najczęściej belki wiązarowe, storczyki i krokwie. Wykazano, że badania wizualne nie są w stanie zlokalizować wszystkich wad badanych elementów. Punktowe badania ultradźwiękowe urządzeniem Pandit z eksponencjalnymi głowicami wykazały, że metoda ultradźwiękowa świetnie nadaje się do wykrywania wad wewnętrznych struktury drewna. Na rys. 29 pokazano przykładowy pomiar tego samego elementu (belki wiązarowej) w miejscu uszkodzenia. Można stwierdzić, że w strefie uszkodzonej występuje większe tłumienie fali akustycznej, a jej amplituda jest mniejsza.



Rys. 29. Korelacja prędkości podłużnej dźwiękowej z wynikami badań niszczących [130]

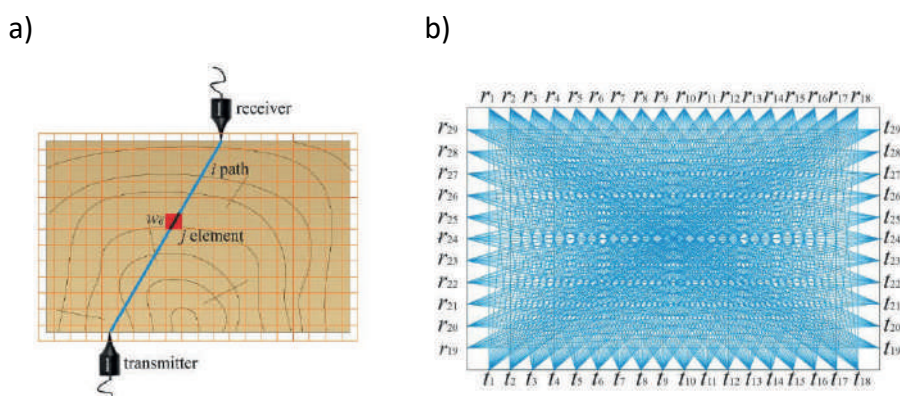
Metoda, w której stosuje się ultradźwięki z wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego zyskuje coraz większą popularność. Tomografia ultradźwiękowa to technika obrazowania pozwalająca na uzyskanie wewnętrznego obrazu elementu przy wykorzystaniu właściwości prędkości fali sprężystej rozchodzącej się w ośrodku [124]. Badania ultrasonografem stosuje się głównie do elementów murowych i diagnostyki obiektów

współczesnych [34], [104]. Diagnostyka tym urządzeniem stosowana do konstrukcji będących elementem dziedzictwa historycznego jest przedmiotem zainteresowań badaczy [101]. Tomografy ultradźwiękowe wykorzystuje się już w badaniach elementów drewnianych [29], [93].

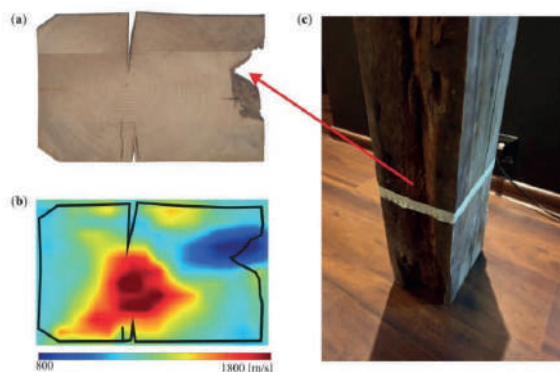
Na jeden pomiar w tomografii ultradźwiękowej składa się od kilkunastu do kilkudziesięciu pomiarów pojedynczych głowic pomiarowych. Urządzenie jest w stanie wykonać mapę wnętrza badanego obiektu. Metodę tomografii ultradźwiękowej stosuje się przede wszystkim do wykrywania pustek, nieciągłości struktury różnych materiałów. Ponieważ badanie i ocena stanu elementów drewnianych ma kluczowe znaczenie dla prawidłowej pracy konstrukcji ważne jest wykrycie wewnętrznych wad w elementach. Oprócz oceny polegającej na ludzkich umiejętnościach tj. rozróżnianie dźwięku przy uderzeniu motkiem charakterystycznego dla zdegradowanego drewna (słyszalność ludzkiego ucha 20Hz), oceny wizualnej [96], analizy numerycznej [13] techniki NDT, w tym tomografia ultradźwiękowa, są coraz częściej stosowane. W pracy [1] badano brazylijski gatunek drewna przy użyciu tomografu akustycznego Fakoop 3D i urządzeń ultradźwiękowych James VMk II. Wyniki wykazały skuteczność zarówno w wykrywaniu nieciągłości struktury jak i w określeniu stałych sprężystości drewna. Kolejne lata zastosowań tomografu ultradźwiękowego dla drewna przyniosły nowe odsłony badań tego materiału. Artykuł [14] opisuje wyniki badań belki tomografem oraz charakterystyki punktowych właściwości mechanicznych materiału. Odcięty fragment poddano analizie wizualnej oraz próbie badania na ściskanie równoległe do włókien. Określono zależności pomiędzy wynikami badania NDT a metodą ultradźwiękową.

Badanie drewna zabytkowego przy pomocy technik tomograficznych stosowane jest od niedawna. Zielińska i Rucka w pracach [123], [124] dokonują analizy i oceny 3 elementów drewnianych pochodzących z obiektu zabytkowego, stosując metodę ultrasonograficzną. Analizowano wpływ anizotropii materiału na propagację fal. Belki znajdowały się w różnym stopniu

degradacji. Tomografię wykonano za pomocą urządzenia PUNDIT PL-200, przy wykorzystaniu dwóch głowic ekponencjalnych o częstotliwości 54 kHz. Mierzono czasy przepływu fal przechodzących przez element. W celu przeprowadzenia badania element podzielono na elementy o skończonej powierzchni (piksele), przy czym rozdzielczość uzyskanego obrazu zależy od liczby pikseli. Dla każdej z trzech próbek wykonano 445 ścieżek pomiarowych. Schemat badania przedstawia rys. 30a, a konfigurację nadajników i odbiorników rys. 30b. Obraz tomografii uzyskane z wykonanych analiz pokazano na rys. 31.



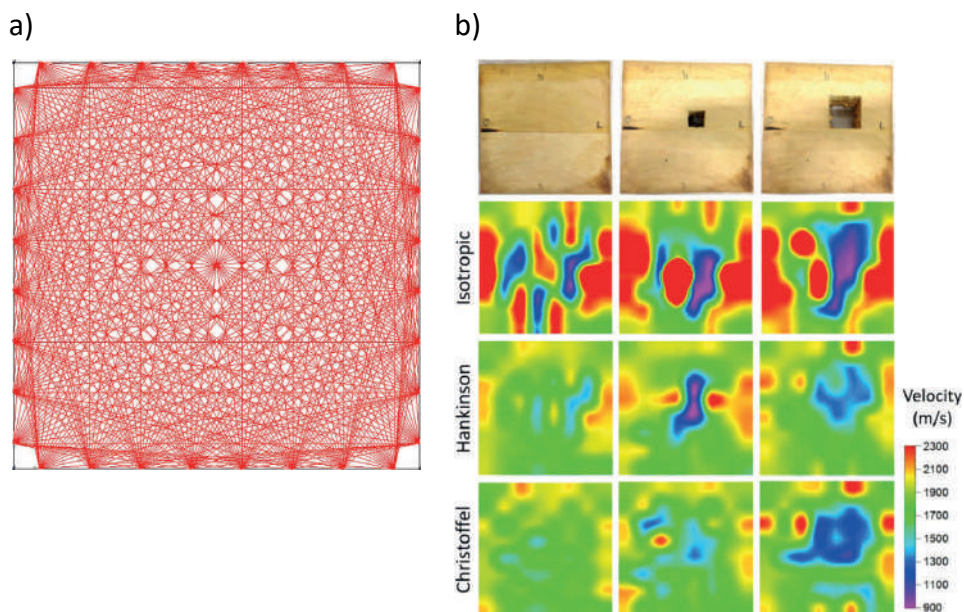
Rys. 30. Schemat przejścia: a) ścieżki przez element j, b) konfiguracja punktów pomiarowych i ścieżki pomiarowe [124]



Rys. 31. Wyniki uzyskane dla belki nr 3: a) widok belki z góry, b) obraz tomografii ultradźwiękowej, c) widok belki z boku [123] [124]

W artykułach [123], [124] zaproponowano nowatorską metodę oceny stanu technicznego materiału z uwzględnieniem położenia rdzenia. Potwierdzono, że tomografia ultradźwiękowa jest skutecznym narzędziem do oceny wewnętrznego przekroju elementu drewnianego.

Na podobnej zasadzie Perlin z zespołem prowadzili analizy przekrojów drewnianych, a ich wyniki opisano w pracach [94], [95]. Przetwarzanie wyników badań na obraz wykonano przy pomocy niekomercyjnego oprogramowania o nazwie TUCOM. Przekroje przyjmowano wpierw za izotropowe, a później ortotropowe, stosując równania Hankinsona i Christoffela jako krzywe odniesienia. Na rys. 32 pokazano schemat badań belek drewnianych oraz uzyskane wyniki. Analizy materiału jako izotropowego wytworzyły niereprezentatywny tomogram. Tomogramy uzyskane przy użyciu równań Christoffela i Hankinsona jako krzywych odniesienia wskazują na stosunkowo jednorodny obraz dla próbek z małymi wadami. W przypadku większych wad lepsze wyniki obrazowania uzyskano stosując równanie Christoffela.



Rys. 32. Schemat badania (a) i wyniki badań (b) [95]

2.4. Podsumowanie wynikające z przeglądu literatury

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy można stwierdzić, że:

- ❑ wady drewna bez wątpienia wpływają na jego parametry mechaniczne,
- ❑ metodą wizualną nie da się określić wszystkich wad drewna, ponieważ znaczna ich część bywa ukryta wewnątrz badanego elementu,
- ❑ do lokalizacji wewnętrznych wad drewna można wykorzystać metody nieniszczące, w szczególności, ultradźwiękowe i penetracyjne,
- ❑ metoda tomografii ultradźwiękowej może być bardzo przydatna do określenia miejsca położenia wad wewnętrznych drewna,
- ❑ metody nieniszczące są ponadto wykorzystywane do wyznaczania parametrów mechanicznych i fizycznych drewna (np. wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na ściskanie, moduły sprężystości, gęstości),
- ❑ tworzone są korelacje opisujące zależność pomiędzy badanym parametrem nieniszczącym a parametrem mechanicznym. Najczęściej korelacje te dotyczą jednak drewna nowego,
- ❑ korelacje dla drewna zabytkowego tworzone są z reguły na małych próbkach, bez uwzględnienia występowania wad drewna,
- ❑ nie odnaleziono w literaturze wyników badań ani korelacji pomiędzy badaniami nieniszczącymi a niszczącymi dla dużej liczby próbek krajowego drewna zabytkowego z badaniami prowadzonymi na próbkach wielkogabarytowych.

3. TEZY I CELE NAUKOWE PRACY

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie badań nieniszczących i semi-nieniszczących drewna zabytkowego przyjęto następujące tezy pracy:

- ❑ Możliwe jest określenie wad wewnętrznych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących.
- ❑ Możliwe jest określenie paramentów wytrzymałościowych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących.
- ❑ Możliwe jest opracowanie metodyki określenia klasy wytrzymałościowej drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących z uwzględnieniem wad wewnętrznych istniejących w badanych elementach.

W celu potwierdzenia powyższych tez przyjęto następujące cele naukowe pracy:

- ❑ Wykonanie badań wstępnych na obiekcie historycznym potwierdzających przydatność metod nieniszczących w określaniu wad drewna,
- ❑ Opracowanie zależności badany parametr nieniszczący – wytrzymałość drewna dla zabytkowego drewna krajowego dla kilku metod badawczych.
- ❑ Opracowanie sposobu nieniszczącej szybkiej lokalizacji wad drewna, w tym wad wewnętrznych.
- ❑ Opracowanie metodyki określenia klasy drewna zabytkowego z uwzględnieniem istniejących wad wewnętrznych.

Do realizacji przyjętych celów naukowych pracy zaplanowano:

- ❑ Wykonanie badań wstępnych na obiekcie historycznym,
- ❑ Pozyskanie zabytkowych wielkoformatowych elementów drewnianych.
- ❑ Wykonanie badań nieniszczących zabytkowych wielkoformatowych elementów drewnianych tomografem ultradźwiękowym w celu określenia wad drewna.
- ❑ Wykonanie badań nieniszczących zabytkowych wielkoformatowych elementów drewnianych trzema metodami: przy użyciu młotka Schmidta do drewna oraz dwóch urządzeń ultradźwiękowych, z których jedno emituje fale podłużne oraz a drugie poprzeczne. Wyniki badań posłużą do stworzenia korelacji między wytrzymałością drewna na zginanie i badanym parametrem nieniszczącym.
- ❑ Wykonanie laboratoryjnych badań niszczących wielkoformatowych elementów drewnianych na zginanie w celu określenia klasy drewna.
- ❑ Przeprowadzenie analizy wyników badań w celu określenia korelacji między badaniami nieniszczącymi a niszczącymi.
- ❑ Zaproponowanie metodyki określenia wytrzymałości drewna zabytkowego metodami nieniszczącymi i semi-nieniszczącymi z uwzględnieniem istniejących wad drewna.

W dalszej części niniejszej dysertacji opisano wyniki wykonanych badań i analiz.

4. BADANIA WSTĘPNE

4.1. Cel badań i badany obiekt

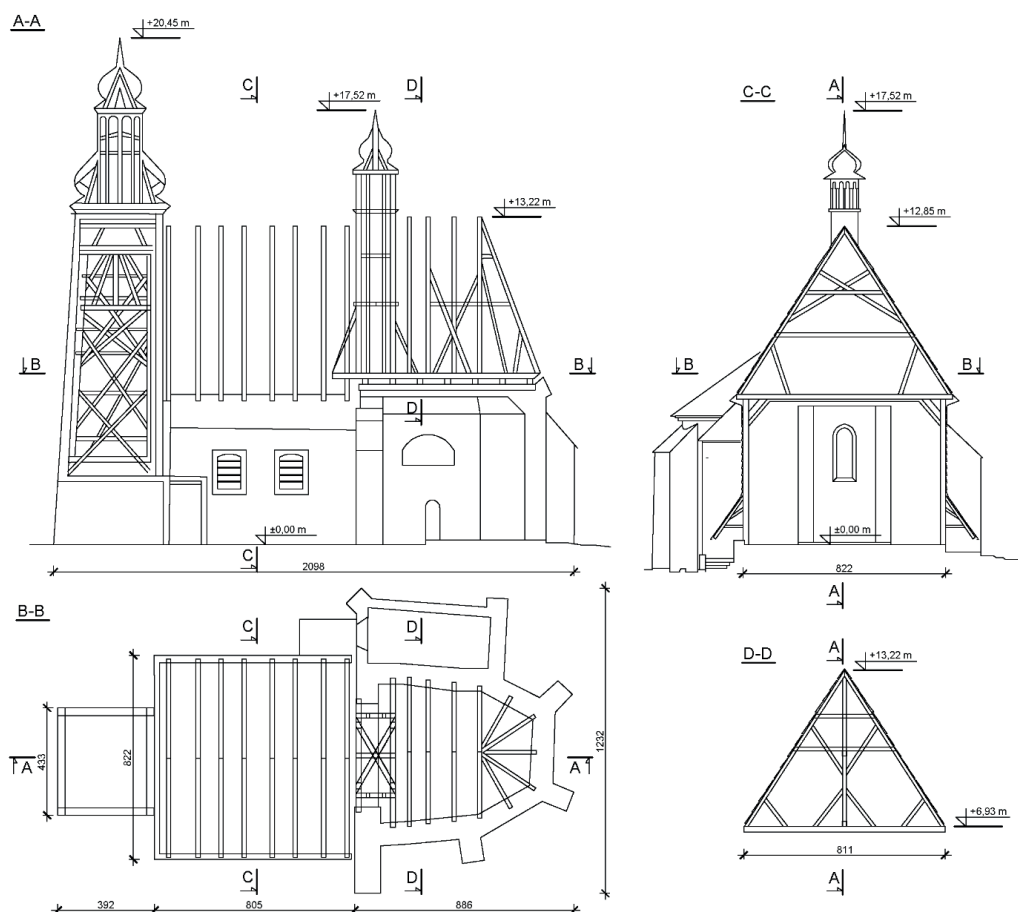
Celem badań było sprawdzenie przydatności metod nieniszczących do lokalizacji wad wewnętrznych w wybranych elementach drewnianych zabytkowego kościoła pw. Wszystkich Świętych w Sierotach. Kościół usytuowany jest na niewielkim wzniesieniu. Ma on bogatą historię budowy, którą udało się odtworzyć dzięki analizom dendrochronologicznym. Pierwotnie sądzono, że świątynia pochodząca z około 1470 r. została zniszczona przez pożar, który miał miejsce w 1700 r., po czym odbudowano jej nawę w roku 1707. Informacje o pożarze przyjęto na podstawie analizy zabytkowego obrazu z przedstawieniem św. Floriana na tle niszczonej przez żywioł wioski. Badania dendrochronologiczne [54], [55] wykazały, że nad prezbiterium zachowała się oryginalna więźba dachowa z 1427 r., wraz z jej podwyższeniem z 1457 roku. Z tego wynika, że drewniane części kościoła nie uległy spaleniowi podczas pożaru wsi. Obecny kształt świątyni jest wynikiem kilku przedsięwzięć budowlanych obejmujących dwie inicjatywy w okresie gotyku (1 i 2 połowa XV w.), jedną w okresie renesansu (XVI w.) oraz dwie z okresu baroku w 2 poł. XVIII w. Pierwsze informacje o obiekcie pochodzą z 1299 r., a kolejne z 1447 r. Świątynia powstała w konstrukcji mieszanej drewniano-murowanej. Murowane z kamienia, otynkowane prezbiterium powstało jako pierwsze w 1427 r., w latach 1456-1457 wybudowano nawę. Wieża kościoła została wzniesiona w 1775 r.

Obiekt jest orientowany, jednonawowy, a jego bryła składa się z:

- murowanego, zamkniętego trójbocznie prezbiterium, wzdłuż którego północnej ściany usytuowana jest również murowana zakrystia z przedsionkiem wzniesiona na planie prostokąta,

- ❑ szerszej, usytuowanej na podmurówce drewnianej nawie, wykonanej w konstrukcji zrębowej, oszalowanej w górnej części gontem, a dołem otoczonej przez przydaszki,
- ❑ trzykondygnacyjnej drewnianej wieży wykonanej w konstrukcji słupowej.

Część murowaną obiektu opinają szkarpy. Budynek wielokrotnie remontowano. Dachy pokryte są gontem. Dach nawy jest dwuspadowy przechodzący nad prezbiterium w wielopołaciowy z sygnaturką. Zakrystię przekrywa dach trójspadowy. Rzut i przekroje kościoła pokazano na rys. 33. Widok kościoła pokazano na rys. 34.



Rys. 33. Przekroje i rzut kościoła

a)

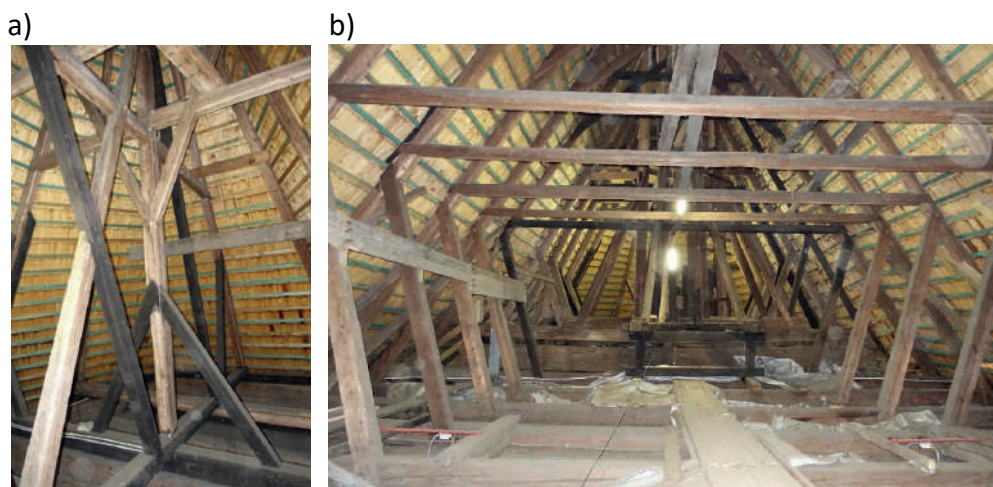


b)



Rys. 34. Widok budynku kościoła: a) od strony północnej, b) od strony południowo-wschodniej

Przedmiotem badań wstępnych była więźba dachowa nad prezbiterium oraz więźba nad nawą kościoła. Więźba dachowa nad prezbiterium wykonana jest w układzie storczykowym, dwujętkowa ze środkową ramą podłużną. Jest to najstarsza, pierwotna konstrukcja drewniana, pochodząca prawdopodobnie z czasu budowy prezbiterium. Ta średniowieczna konstrukcja wykonana jest z drewna jodłowego pozyskanego w trakcie jednej ścinki wiosną roku 1427 [54], [55]. Więźba dachowa nad nawą pochodzi z okresu baroku z 2. poł. XVIII w., kiedy przeprowadzono kolejną fazę przebudowy. Wtedy nawę przykryto nową więźbą dachową. Do budowy użyto drewna jodłowego pochodzącego ze ścinki letniej roku 1753 oraz jesienno-zimowej z końca 1753 r. lub przełomu 1753/54. Wynika z tego, że montaż mógł być wykonany najwcześniej w roku 1754. Do wzmocnienia nowej więźby nad nawą użyto elementów rozbiórkowych pierwotnej więźby z 1457 r. Elementami wykorzystanymi wtórnie są wiatrownice oraz słup skrajnego wiązara od strony zachodniej. Jest to więźba krokwiowa z podwójną jętką i ukośnymi zastrzałami (stężenie krzyżowe). Widok więźby nad prezbiterium oraz nad nawą przedstawiono na rys. 35.



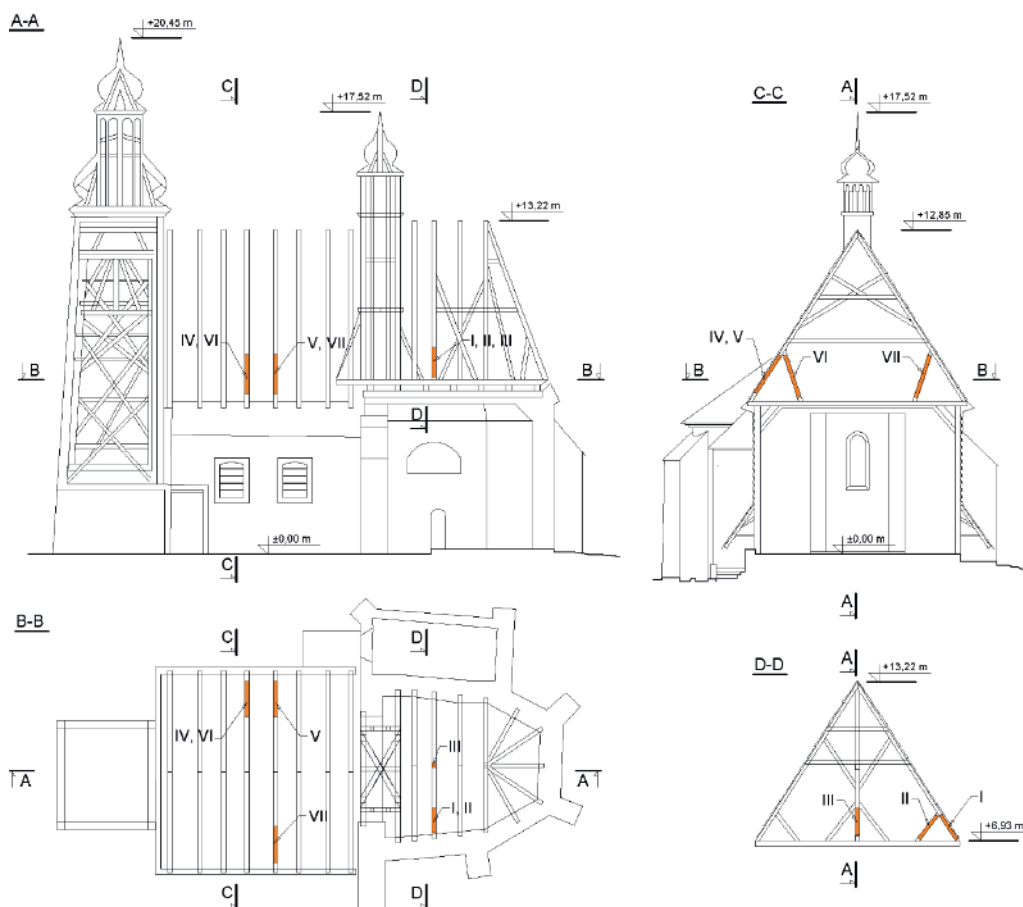
Rys. 35. Widok więźby dachowej: a) więźba nad prezbiterium, b) więźba nad nawą

4.2. Miejsca badań i inwentaryzacja badanych elementów

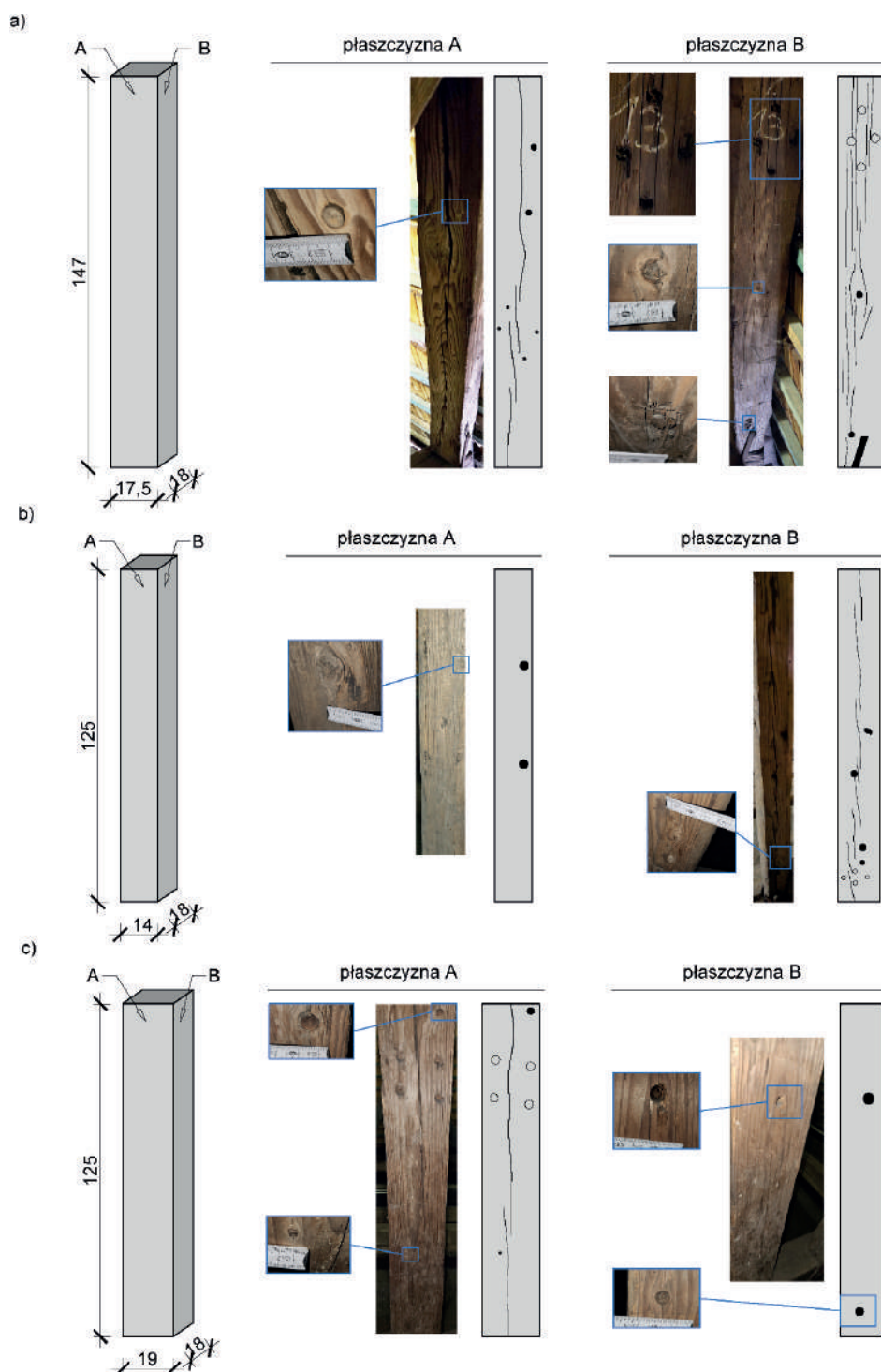
Do badań wybrano losowo 7 elementów więźby dachowej, w tym 3 z więźby nad prezbiterium (krokiew oznaczona numerem I, miecz stopowy oznaczony numerem II i storczyk oznaczony numerem III) oraz 4 elementy więźby nad nawą (dwie krokwie IV i V oraz dwa miecze stopowe VI i VII). Elementy wybrane do badań zaznaczono na rys. 36. Elementy te poddano szczegółowym badaniom nieniszczącym i semi-niszczącym.

Każdy z badanych elementów poddano ponadto szczegółowym oględzinom, podczas których inwentaryzowano widoczne wady w postaci spękań oraz w postaci sęków. Na powierzchni wszystkich badanych elementów nie stwierdzono oznak korozji biologicznej. Na elementach więźby nad prezbiterium występowały oznaczenia ciesielskie w postaci okrągłych nacięć. W celu odróżnienia ich od sęków na rysunkach inwentaryzacyjnych oznaczano je okręgami (bez wypełnienia), a sęki oznaczano wypełnionymi kołami.

Na rys. 37 i 38 pokazano inwentaryzację badanych elementów wieży prezbiterium oraz wieży nawy.



Rys. 36. Elementy wybrane do badań



Rys. 37. Inwentaryzacja badanych elementów z więźby nad prezbiterium



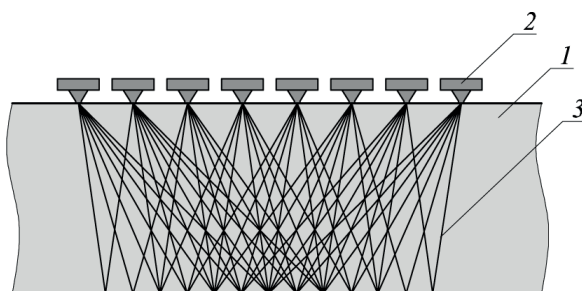
Rys. 38. Inwentaryzacja badanych elementów z więźby nad nawą

4.3. Zastosowany sprzęt i technika badań

Badania lokalizacji wad wybranych elementów drewnianych przeprowadzono metodą tomografii ultradźwiękowej. W badaniach wykorzystano tomograf ultradźwiękowy Pundit Pd 8000 firmy Proceq (rys. 39). W tomografie tym zabudowano 3 rzędy po 8 głowic pomiarowych pracujących w zakresie częstotliwości 50 kHz. Każda głowica pomiarowa transmituje sygnał ultradźwiękowy w postaci fal poprzecznych i echa tych sygnałów są odbierane przez pozostałe głowice. Poszczególne głowice przesyłają własny sygnał po kolei, z opóźnieniem $8 \div 200$ ms. Kompletny pomiar w jednym rzędzie składa się z 28 skanów – tzw. A-skany (rys 40). A-skany służą do tworzenia w czasie rzeczywistym tzw. B-skanu, czyli przekroju badanego elementu usytuowanego prostopadle do powierzchni skanowania. W celu wizualizacji wyników badań amplitudom odebranego sygnału oprogramowanie przyporządkowuje kolory i tworzy mapy. Amplitudom o najmniejszych wartościach przyporządkowany jest kolor granatowy, a amplitudom o wartościach największych kolor czerwony. Kolor czerwony oznacza pustkę powietrzną lub istotne zmniejszenie gęstości elementu. Kolory żółty i niebieski odpowiadają mniejszym zmianom gęstości, a kolor granatowy oznacza jednolity materiał. Wynikiem badania jest poprzeczny przekrój badanego elementu. Badanie prowadzono na dwóch prostopadłych płaszczyznach każdego elementów, co pozwoliło na uzyskanie przekrojów elementów w dwóch kierunkach.

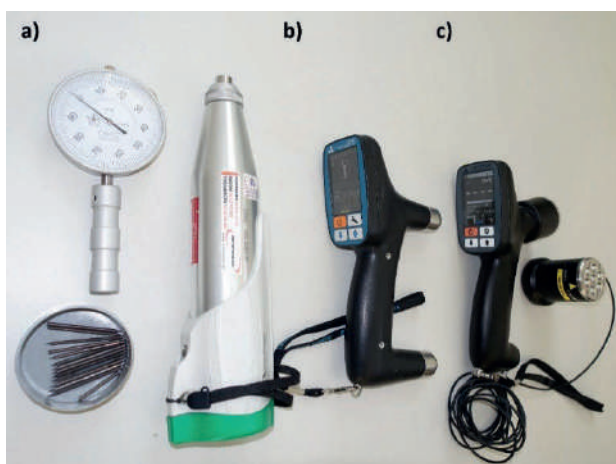


Rys. 39. Tomograf ultradźwiękowy Pundit Pd 8000



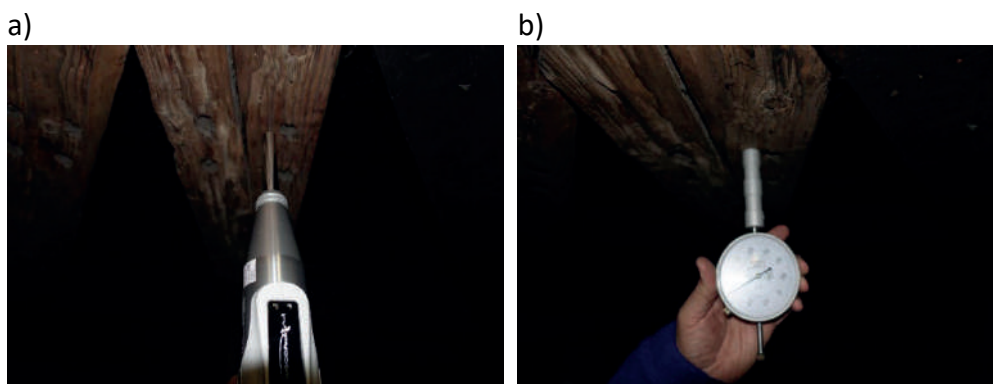
Rys. 40. Zasada pomiaru tomografem ultradźwiękowym: 1 – badany element, 2 – głowica ultradźwiękowa, 3 – wiązka ultradźwięku

W dalszej części wybrane elementy więźby dachowej nad prezbiterium oraz nad nawą poddano punktowym badaniom semi-nieniszczącym i nieniszczącym. Przeprowadzono badania sklerometryczne młotkiem do drewna Wood Peko DRC 19C0085M (rys. 41a) oraz badania wykorzystujące ultradźwięki z zastosowaniem urządzenia UK 1401 SURFER (rys. 41b) mierzącego prędkość przepływu fali poprzecznej wzdłuż włókien, jak również urządzenia UK 1410 PULSAR (rys. 41c), za pomocą którego dokonano pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w poprzek włókien. Dokonano również pomiaru wilgotności wytypowanych 9 elementów więźby.



Rys. 41. Urządzenia wykorzystane w badaniach: a) Wood Peko DRC 19C0085M, b) UK 1401 SURFER, c) UK 1410 PULSAR

Zasada działania młotka Schmidta do drewna polega na wbiciu igły o średnicy 2,5 mm, długości 50 mm, wykonanej ze stali o twardości 60 HRC i zakończonej stożkiem o kącie 35°. Energia uderzenia wynosi 2,207 Nm. Po pięciokrotnym uderzeniu młotkiem, przy użyciu wskaźnika zegarowego, zostaje zmierzone zagłębienie igły i na tej podstawie z tabel lub wzorów określa się parametry wytrzymałościowe drewna. Widok urządzenia podczas badań pokazano na rys. 42a, a przykładowy wynik pomiaru igły na rys. 42b.



Rys. 42. Badanie młotkiem Schmidta do drewna (storczyk więźby storczykowej)

Przeprowadzono nieniszczące ultradźwiękowe badania elementów więźby nad prezbiterium oraz więźby nad nawą. W urządzeniu UK1401 Surfer ultradźwiękowa fala poprzeczna z częstotliwością 50 kHz rozchodzi się wzdłuż włókien badanego elementu. W urządzeniu UK1410 Pulsar wykorzystuje się ultradźwiękową falę podłużną, a badanie wykonuje się w poprzek włókien. Częstotliwość robocza urządzenia to 50 kHz. Urządzenia UK1401 Surfer i UK1410 Pulsar zaopatrzone są w ultradźwiękowe głowice eksponencjalne (punktowe), które nie wymagają dodatkowego sprzężenia akustycznego. Aparat UK1401 Surfer ma zabudowane dwie głowice w stałym rozstawie 15 cm, natomiast w urządzeniu UK1410 Pulsar zabudowano 2x po 7 głowic (rozstaw regulowany). Urządzenia posiadają głowice na sprężynach, które

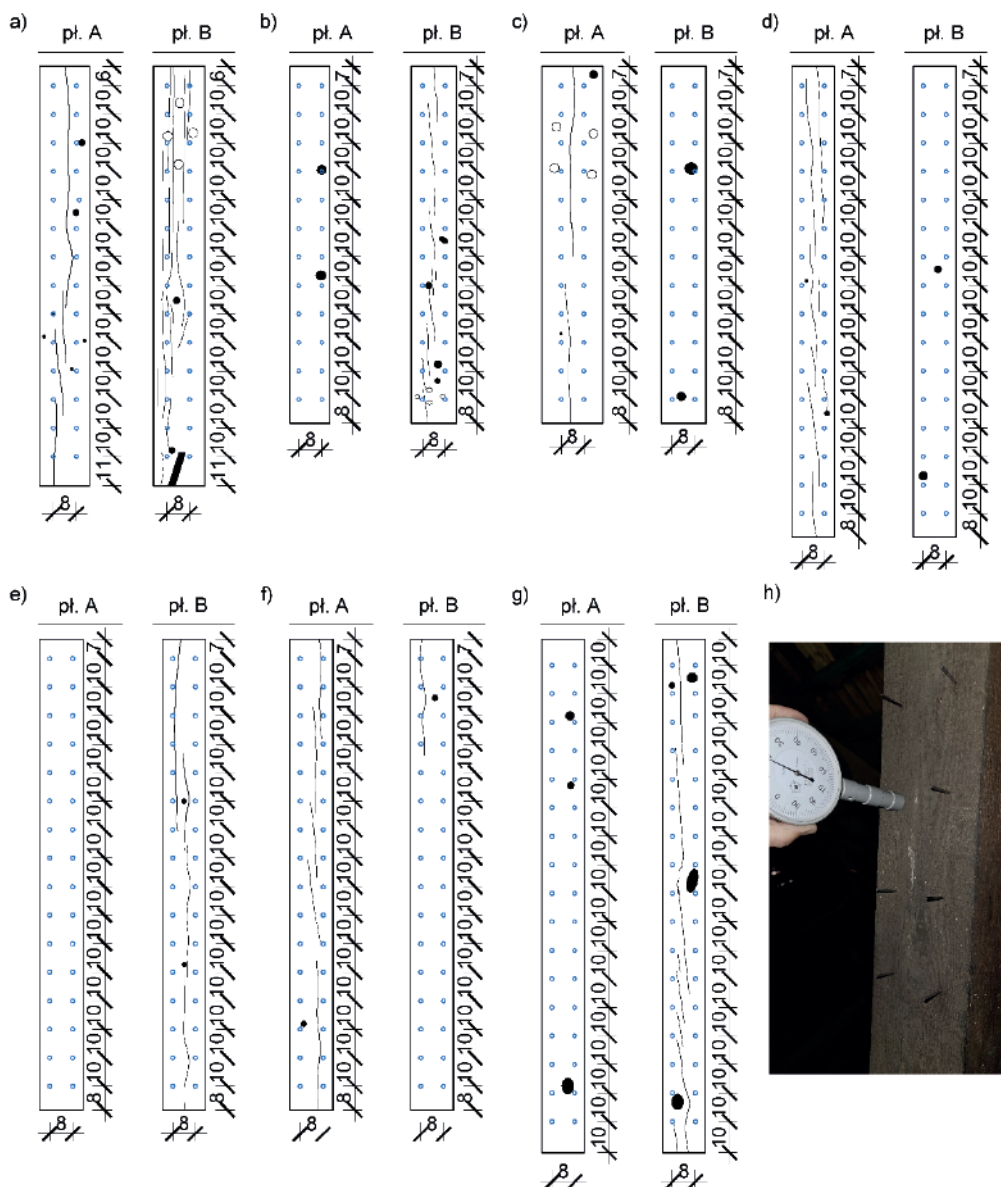
dostosowują się do płaszczyzny badanego elementu. W obu przypadkach możliwe jest wykonanie badania przez wady drewna (np. sęki). Widok jednego z urządzeń podczas badań pokazano na rys. 43.



Rys. 43. Badanie urządzeniem UK1401 Surfer

Punktowe badania młotkiem do drewna Wood Peker oraz urządzeniami ultradźwiękowymi UK 1401 SURFER i UK 1410 PULSAR wykonywano na siatce 8x10 cm. Na powierzchni elementu ołówkiem naniesiono siarkę pomiarową i w zadanych punktach prowadzono badania. Młotkiem do drewna i urządzeniem UK 1410 PULSAR badano dokładnie w zadanym punkcie. W przypadku UK 1410 PULSAR, który wymaga dostępu dwustronnego, z uwagi na występowanie pokrycia dachu, nie było możliwe zbadanie krokwi w kierunku jej wysokości. Miecze stopowe i storczyk badano urządzeniem UK 1410 PULSAR w obu kierunkach. Drugi z urządzeń ultradźwiękowych UK 1401 SURFER ma stałą bazę pomiarową o długości 15 cm. Urządzenie to podczas badania sytuowano w taki sposób, aby punkt pomiarowy znajdował się w połowie długości tej bazy. Na rys. 44 pokazano punkty pomiarowe na

każdym z badanych elementów oraz przykładowe zdjęcie wbitych igieł w badaniu młotkiem do drewna.



Rys. 44. Punkty pomiarowe w badaniach młotkiem do drewna i urządzeniami ultradźwiękowymi: a) element I, b) element II, c) element III, d) element IV, e) element V, f) element VI, g) element VII, h) siatka igieł z badania młotkiem do drewna na elemencie VII

Wykonano ponadto lokalne badania wilgotności drewna urządzeniem T510 firmy Trotec. W wilgotnościomierzu tego typu pomiar wilgotności następuje poprzez czujniki pojemnościowe za pomocą dielektrycznej igły pomiarowej, wbijanej do drewna. Dokładność pomiaru wilgotności drewna urządzeniem T510 wynosi $\pm 0,8\%$ przy wilgotności do 5%, $\pm 0,2\%$ przy wilgotności od 5 do 30% i $\pm 0,1\%$ przy wilgotności większej.

Badania prowadzono w 9 wybranych miejscach na elementach więźby dachowej. Przykładowe wyniki badań pokazano na rys. 45.

a)



b)



Rys. 45. Wyniki pomiaru wilgotnościomierzem T510: a) storczyk – wilgotność 17,7%,
b) zastrzał – wilgotność 18%

Według [77] elementy drewniane znajdujące się w nieogrzewanych pomieszczeniach zamkniętych powinny cechować się wilgotnością równowagową $12\% \pm 3\%$, a wilgotność równowagowa dla konstrukcji wystawionych na działanie warunków atmosferycznych wynosi $18\% \pm 6\%$. W analizowanych więźbach uzyskano wilgotność odpowiednio:

- więźba nad prezbiterium 16,8-18,3%,
- więźba nad nawą 15,6-17,8%,

co wskazuje na przekroczenie przyjętych wartości dla pomieszczeń zamkniętych.

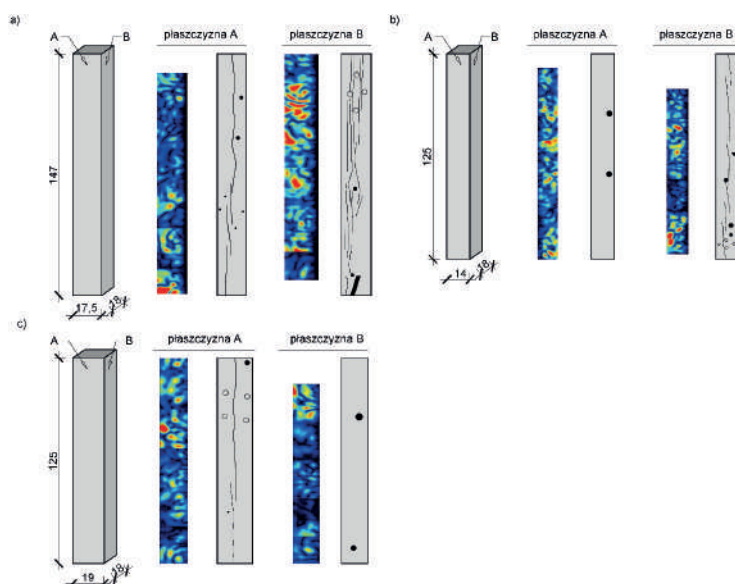
Literatura [77] podaje ponadto, że przy wilgotności $< 20\%$ nie występuje zagrzybienie drewna. W badaniach zawsze uzyskiwano wilgotność $< 20\%$ (najwyżej $17,8\%$), a podczas wizji nie stwierdzono śladów zagrzybień ani charakterystycznego zapachu stęchlizny.

4.4. Wyniki badań wstępnych

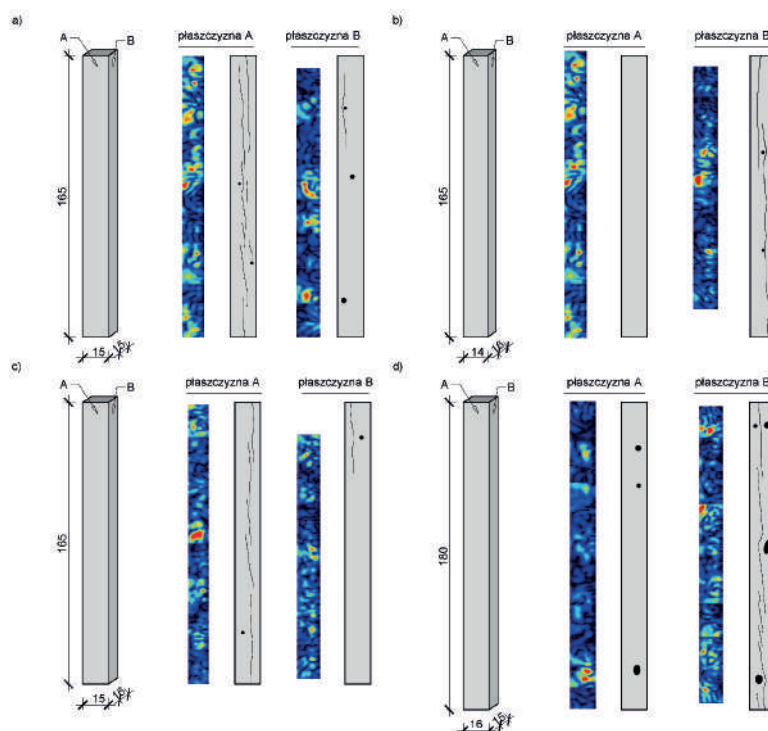
Na rys. 46 i 47 pokazano porównanie wyników uzyskanych z tomografu ultradźwiękowego z inwentaryzacją badanych elementów nad prezbiterium i nawą. Wyniki uzyskane z badania tomografem ultradźwiękowym są dokładniejsze od wizualnej inwentaryzacji, ponieważ diagnozują również wady wewnętrzne elementu. Metodą wizualną stwierdzono tylko około $30\div 50\%$ wad badanego elementu.

W tablicach 7, 8 i 9 pokazano wyniki badań młotkiem do drewna i urządzeniami ultradźwiękowymi w punktach wskazanych na rys. 44. Kolejność wyników w tablicach odpowiada układowi punktów na rys. 44. Przykładowo wynik podany w pierwszej kolumnie i pierwszym wierszu oznacza badanie w punkcie lewym górnym punkcie na płaszczyźnie A, a wynik podany w ostatniej kolumnie i ostatnim wierszu oznacza najniższy punkt w prawej kolumnie na płaszczyźnie B.

W przypadku młotka do drewna uzyskano wartości głębokości wbicia igły z przedziału $22,71\div 32,15$ mm. W badaniach ultradźwiękowych uzyskiwano przedziały wartości fal poprzecznych $3220\div 6140$ m/s, a fal podłużnych $1230\div 2250$ m/s.



Rys. 46. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami inwentaryzacji więźby nad prezbiterium: a) element I, b) element II, c) element III



Rys. 47. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami inwentaryzacji więźby nad nawą: a) element IV, b) element V, c) element VI, d) elementy VII

Tablica 7. Wyniki badań młotkiem do drewna Wood Peker – głębokość wbicia igły, mm

Badany element	płaszczyzna A		płaszczyzna B	
	kolumna lewa	kolumna prawa	kolumna lewa	kolumna prawa
Element I	23,42	23,05	22,81	22,87
	22,71	24,42	23,43	23,32
	23,54	25,65	27,86	23,46
	24,86	23,54	28,05	23,65
	34,18	24,42	24,76	24,54
	22,98	25,87	26,07	23,89
	23,65	24,65	23,45	24,67
	24,14	24,83	25,84	25,85
	23,02	23,86	26,97	22,98
	28,62	26,06	23,45	23,76
	24,04	24,15	24,43	23,32
	25,75	25,76	29,34	24,31
	24,87	23,87	23,56	24,78
	30,21	23,96	26,06	24,98
Element II	22,98	23,54	22,98	22,87
	23,06	23,21	23,43	23,51
	23,57	23,14	25,67	23,65
	24,85	25,76	23,76	23,54
	23,43	23,67	26,42	23,71
	22,87	28,76	22,95	25,69
	23,78	23,85	26,41	26,48
	23,45	26,51	24,89	25,76
	24,06	24,65	23,40	23,86
	24,58	24,51	23,73	23,84
	24,76	26,73	26,54	23,65
Element III	26,87	27,89	32,15	24,98
	23,97	28,76	23,51	24,03
	26,54	28,53	30,12	27,21
	22,98	22,89	26,76	26,83
	23,57	23,62	23,87	26,50
	23,75	28,65	23,41	24,52
	23,43	23,83	23,65	24,68
	23,65	23,67	24,43	24,32
	23,12	23,80	24,32	23,80
	23,19	29,04	23,86	23,78
	23,71	23,58	24,02	24,04
Element IV	22,96	23,08	24,64	24,68
	25,61	23,49	23,89	23,71
	23,76	28,97	22,97	23,43
	23,04	22,98	23,58	23,74
	24,32	24,12	26,07	24,87
	27,88	23,76	23,45	22,81

	23,56	23,37	24,61	23,72
	24,04	24,82	24,08	23,29
	24,67	25,73	23,73	24,16
	28,61	22,87	31,24	24,31
	23,45	23,54	22,94	24,28
	24,03	23,06	23,59	27,07
	23,78	23,87	23,65	23,64
	23,52	24,17	24,13	23,55
	25,87	23,47	24,67	24,76
	23,82	24,16	24,22	23,63
	23,79	24,76	26,18	24,41
	26,43	24,98	23,58	24,48
Element V	26,96	28,76	23,04	23,41
	23,41	23,57	23,53	23,75
	23,64	24,33	24,52	24,79
	26,02	24,59	23,97	24,08
	24,07	24,23	23,78	23,87
	24,54	24,37	24,62	27,21
	31,25	27,04	24,78	24,56
	23,45	23,41	31,02	24,89
	23,65	24,31	24,52	24,58
	23,68	24,36	24,73	24,81
	24,03	23,86	24,68	24,72
	28,53	23,68	24,31	24,33
	26,54	24,32	23,58	23,41
	23,51	23,64	23,42	23,87
	24,24	24,52	26,43	24,67
Element VI	25,72	24,69	26,54	24,98
	25,06	23,43	24,30	23,75
	26,43	23,45	23,87	26,59
	23,45	24,33	26,41	23,41
	23,31	23,48	23,54	23,57
	23,56	23,51	23,57	23,71
	23,85	23,35	23,50	23,43
	24,05	24,42	24,22	24,03
	31,63	29,32	24,31	23,57
	23,47	23,67	24,53	29,03
	23,87	23,34	23,79	26,54
	26,71	28,61	23,65	24,51
	23,56	23,41	24,32	24,73
	23,87	23,44	24,98	26,43
	28,65	26,54	23,65	26,72
Element VII	24,76	23,06	24,76	23,58
	24,96	23,74	24,09	24,62
	22,87	22,91	23,45	23,54
	23,04	23,40	26,52	22,87
	23,42	26,48	22,98	22,79
	23,45	23,47	23,04	23,03
	23,56	23,34	23,43	22,89

	23,33	23,50	23,47	23,43
	24,08	24,62	26,77	23,37
	23,87	24,71	23,31	23,52
	23,73	24,28	23,57	23,71
	23,77	24,37	23,42	23,53
	24,41	23,88	23,39	24,22
	24,52	24,16	23,53	24,37
	24,37	23,75	24,15	24,05
	23,89	23,84	24,26	23,74
	24,35	24,19	24,37	23,54
	26,53	28,31	24,32	24,26
	24,67	23,86	24,81	24,18

Tablica 8. Wyniki badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1401 SURFER – prędkość poprzecznej fali ultradźwiękowej, m/s

Badany element	płaszczyzna A		płaszczyzna B	
	kolumna lewa	kolumna prawa	kolumna lewa	kolumna prawa
Element I	5450	5640	5690	5740
	5830	5670	5800	5760
	5760	3220	3990	4120
	5560	5780	5680	5730
	5830	5710	5710	5760
	5630	5670	4480	5670
	5910	5820	5720	5890
	5690	5730	4110	5620
	5760	5870	4230	5740
	4350	4430	5890	5980
	5890	5820	5870	5750
	5680	5810	5730	5690
	5790	5920	5810	5920
	4570	5640	5230	6000
Element II	6100	5890	6020	5980
	5880	6010	5870	5860
	5640	5720	6030	5920
	5730	3300	5880	5930
	5670	5690	5910	6110
	5720	5760	5880	4350
	5730	5850	5760	4420
	5820	4530	3340	5670
	5780	5740	4120	5820
	5630	5750	4760	4860
	5720	5840	5730	3850
	4350	4460	3780	5780
Element III	6030	4450	5790	5870
	4880	5620	4030	5890

	4830	4990	4260	5760
	5200	5120	4150	3770
	5670	5770	5780	5780
	5890	5730	5690	5460
	5780	5850	5740	5560
	5720	5830	5660	5550
	5690	5540	5830	5730
	5580	5560	5870	5700
	5870	5690	5720	5830
	4350	5890	4450	5780
Element IV	5490	5780	5690	5780
	5570	5480	5640	5690
	5540	5560	5710	5830
	5630	5770	5690	5700
	5570	5680	5760	5670
	5630	5890	5660	5690
	5890	5820	5670	5320
	3350	5760	5760	4550
	5870	5550	5780	5680
	5530	5490	5810	5760
	5610	5690	5830	5710
	5800	5630	5900	7550
	5780	5840	5920	5750
	5740	5850	5820	5640
	5760	5790	4320	5670
Element V	4430	5860	5780	5640
	5710	4560	5700	5670
	5670	5730	5760	5690
	5760	5800	5820	5740
	4320	5670	5980	5580
	5780	5820	6040	5590
	5830	5750	6120	4550
	4230	5670	5980	5570
	5680	5790	4600	5680
	5790	5830	5780	5720
	5670	5850	5790	5560
	5800	5760	5830	5840
	5920	5820	5920	5720
	6010	5760	5900	5770
	6780	5880	5940	5580
Element VI	5980	5900	5870	5750
	4380	5980	4590	5830
	4550	5860	5700	4670
	4450	5810	5740	4460
	5670	5850	5820	4490
	5640	5800	5730	5670
	5630	5780	5650	5640
	5690	5760	5870	5700
	5750	5820	5760	5760

	5210	5790	5740	5720
	5780	5860	5590	5820
	5760	5770	5630	5660
	5830	5810	5790	5730
	5850	3990	5690	5670
	5830	5690	5760	5690
	4430	5640	5720	4330
	5680	5620	5760	5630
Element VII	5690	5640	5710	5570
	5560	5610	5610	5670
	5630	5620	4600	5650
	5670	3820	5750	5770
	5680	5720	5760	5590
	5680	4310	5640	5590
	5670	5670	5780	5620
	5620	5640	5860	5610
	5700	5630	5820	5640
	5730	5740	5790	5660
	5720	5750	5810	5680
	5750	5720	5900	5730
	5740	5630	5780	5710
	5790	5660	6010	5690
	5830	5730	6030	5730
	5820	5760	5890	5780
	5730	3650	5920	5800
	5710	5630	4550	5760

Tablica 9. Wyniki badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1410 PULSAR – prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej, m/s

Badany element	płaszczyzna A		płaszczyzna B	
	kolumna lewa	kolumna prawa	kolumna lewa	kolumna prawa
Element I	-	-	2020	2100
	-	-	2050	2110
	-	-	1230	1600
	-	-	1320	2050
	-	-	2040	2110
	-	-	1380	2090
	-	-	2080	2100
	-	-	1550	2120
	-	-	1630	2210
	-	-	2150	2040
	-	-	2230	2010
	-	-	1840	2070
	-	-	2050	2130
	-	-	1890	2170

Element II	2020	2100	2040	2110
	2040	2080	2090	2140
	1550	2050	2200	2190
	1620	1640	2170	2160
	2110	2130	1810	2070
	1690	1330	1630	1640
	2110	2190	1700	1550
	2060	1310	1640	1520
	2040	2080	2040	2050
	2255	2210	2010	2090
	2090	1970	1920	1930
	1990	1700	1360	2060
Element III	2050	1780	2020	2130
	1830	1890	1320	1520
	2050	1820	1630	1820
	2110	1940	2010	1340
	1370	1550	2040	2010
	2130	2100	2100	2050
	2080	2090	2010	2060
	2110	2020	2130	2170
	2060	1820	2150	2130
	2180	2040	2200	2110
	2030	2130	1920	1840
	1790	2200	1850	1790
Element IV	-	-	2120	2040
	-	-	2110	2160
	-	-	1840	2050
	-	-	1950	2030
	-	-	2090	2060
	-	-	2130	2110
	-	-	1920	2050
	-	-	1670	2030
	-	-	2050	2210
	-	-	1880	1520
	-	-	2050	2050
	-	-	2170	2130
	-	-	2120	2030
	-	-	2080	2050
	-	-	1950	2120
	-	-	2070	2080
Element V	-	-	2110	2040
	-	-	2050	2120
	-	-	2090	2010
	-	-	2150	2200
	-	-	2070	2080
	-	-	1430	1890
	-	-	2060	2010
	-	-	1230	2010
	-	-	2030	2050

	-	-	2050	2060
	-	-	2190	2120
	-	-	2200	2040
	-	-	2080	2050
	-	-	2070	2130
	-	-	2050	2060
	-	-	1950	2130
Element VI	2120	2150	2110	2090
	1850	2050	2080	2040
	2110	2070	2060	2130
	2030	2100	1890	2060
	2070	2010	2080	2130
	2130	2090	1790	1840
	2110	2080	2050	2110
	1340	1510	2080	2110
	2060	2100	1810	1790
	2050	2140	2100	2110
	1580	1620	2030	2050
	1840	1940	2140	2200
	2070	2150	1870	1850
	1700	1830	2230	1640
	2060	2080	2210	2050
	2020	2120	2120	2130
Element VII	2130	2110	2130	2120
	2090	2120	1670	2070
	2050	1540	2090	2110
	2160	2130	2080	2200
	2060	1840	2100	2040
	2060	2080	2050	2150
	2110	2060	1290	1780
	2030	2080	2120	2080
	1790	2010	2070	2140
	2050	2160	2040	2030
	2050	2030	2020	1530
	2130	2020	2060	1820
	2090	2070	2050	2020
	2040	2090	1760	2120
	2100	2120	1830	2040
	1810	1340	2020	2110
	2010	2090	1510	2090

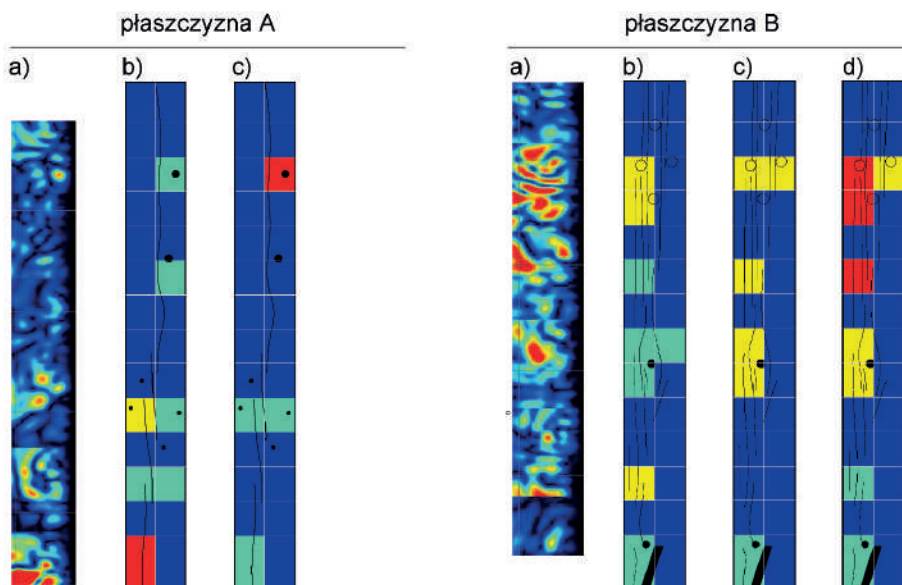
4.5. Analiza wyników badań wstępnych

W celu porównania wyników badań punktowych z wynikami badań tomografem ultradźwiękowym zbadanym wartościami (głębokościami wbicia

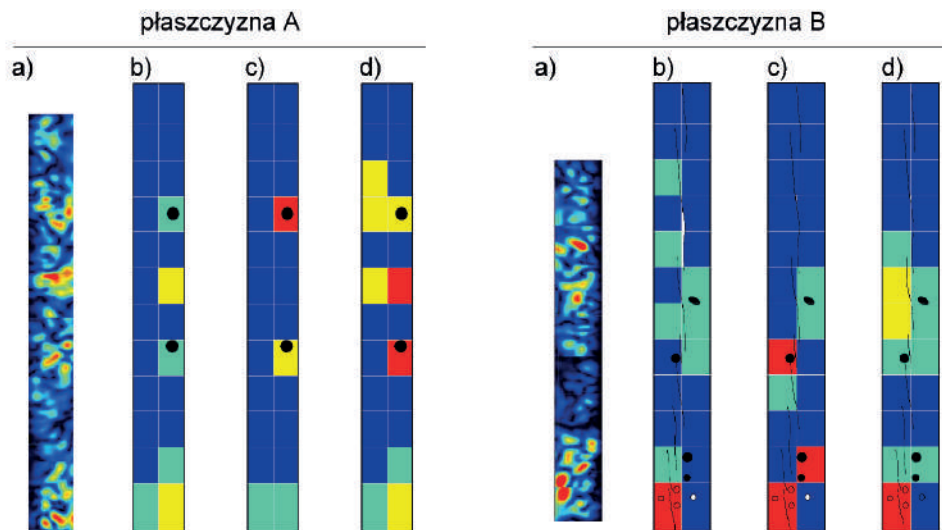
igły oraz prędkościom ultradźwiękowych fal podłużnych i poprzecznych) przyporządkowano cztery dominujące kolory w skanach z tomografu: granatowy, seledynowy, żółty i czerwony. Przedziały uzyskanych wartości z badań podzielono na 4 równe części, którym przydzielono kolory, gdzie kolor czerwony oznacza wartości najmniej korzystane, a granatowy najkorzystniejsze. Podział ten podano w tablicy 10. Na tej podstawie dla każdego z pomiarów punktowych wykonano kolorowe mapy. Porównanie tych map z wynikami badań tomografem ultradźwiękowym pokazano na rys. 48÷54.

Tablica 10. Przyporządkowanie wartościom z badań kolorystyki

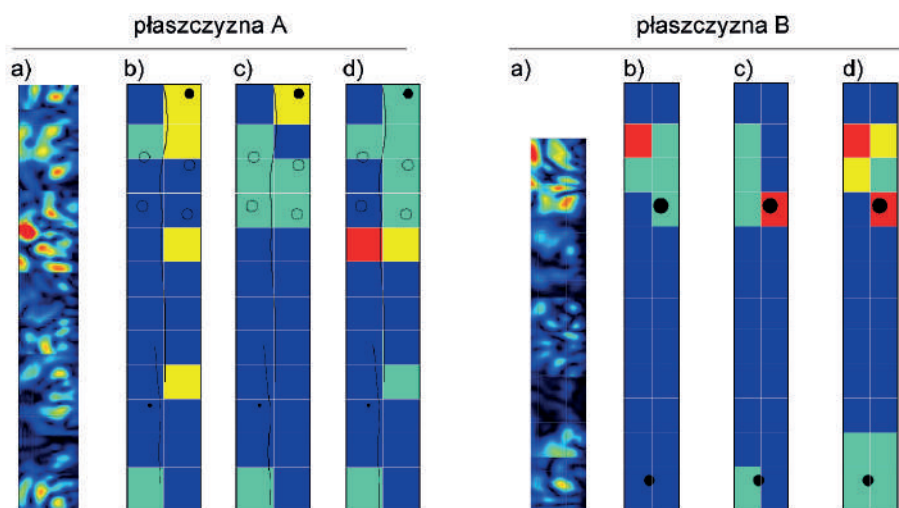
Badany parametr	Kolor granatowy	Kolor seledynowy	Kolor żółty	Kolor czerwony
Głębokość wbicia igły, mm	22,71÷25,00	25,01÷27,40	27,41÷29,80	29,81÷32,15
Prędkość fali poprzecznej, m/s	6140÷5410	5400÷4690	4680÷3960	3950÷3220
Prędkość fali podłużnej, m/s	2255÷2010	2000÷1750	1740÷1490	1480÷1230



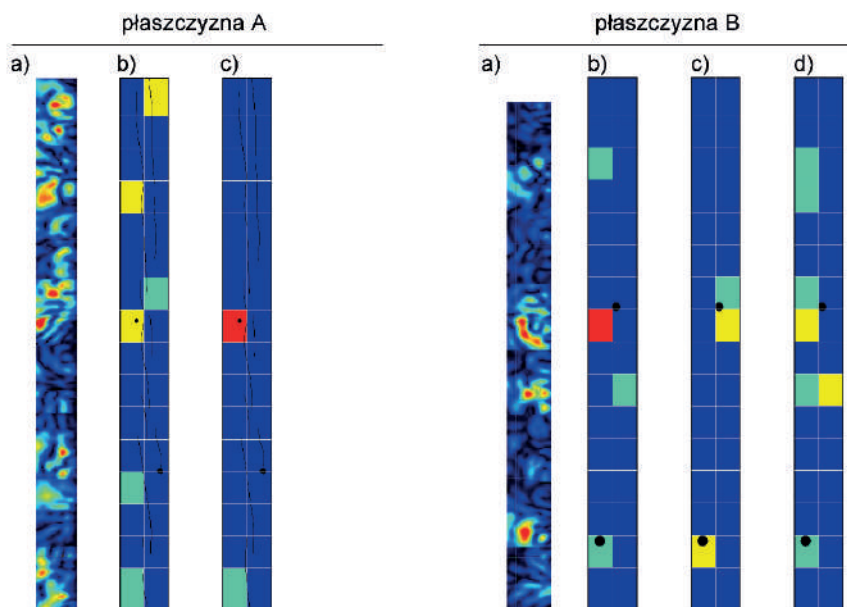
Rys. 48. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie I: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Peker, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER, d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR



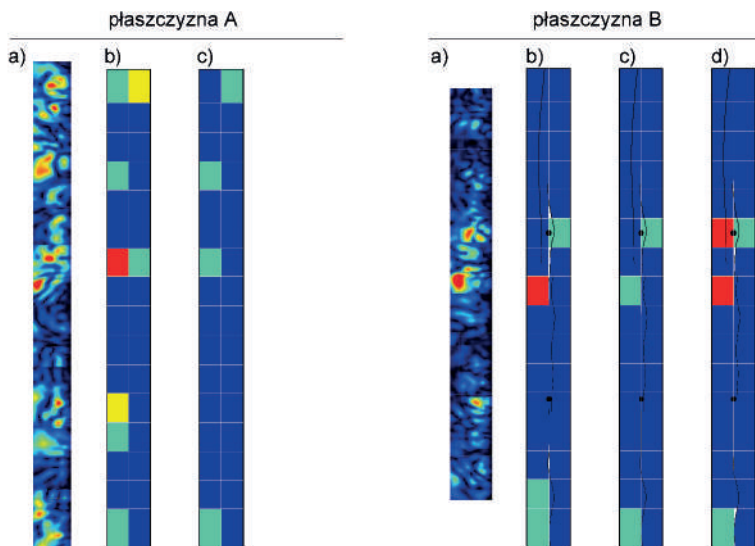
Rys. 49. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie II: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Peker, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER, d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR



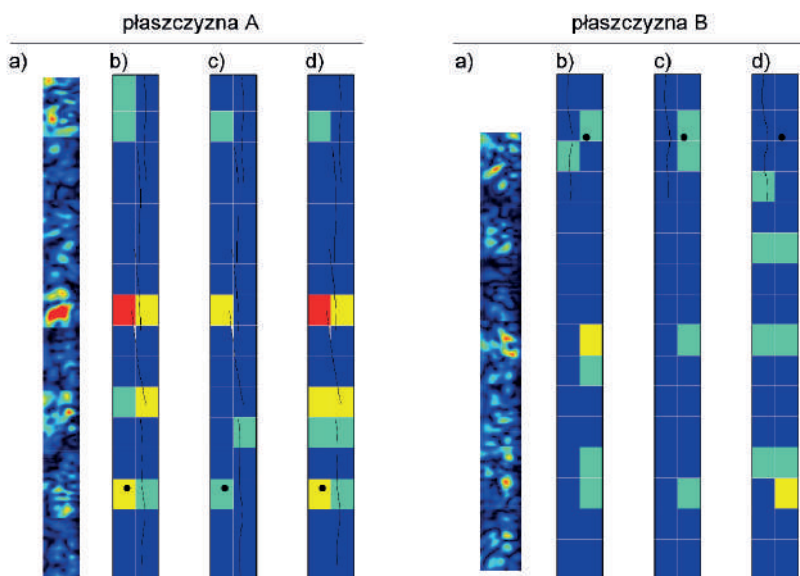
Rys. 50. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie III: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Peko, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER , d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR



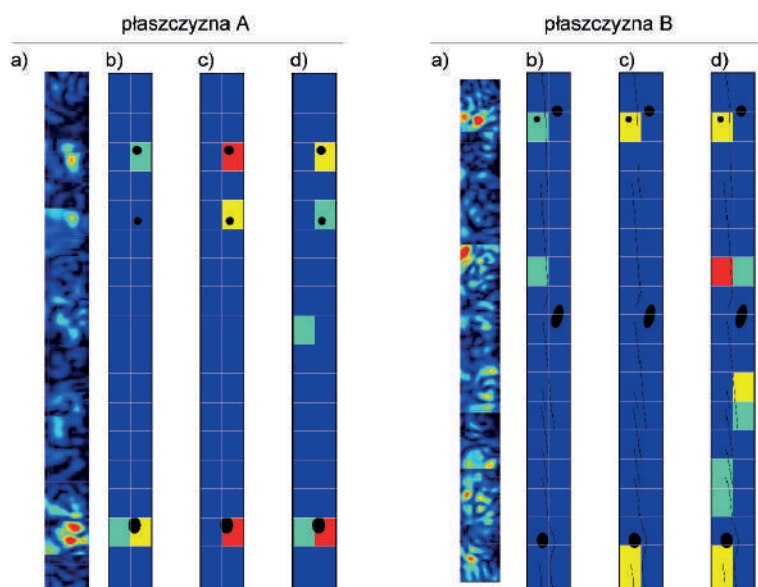
Rys. 51. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie IV: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Peko, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER , d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR



Rys. 52. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie V: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Pekar, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER , d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR

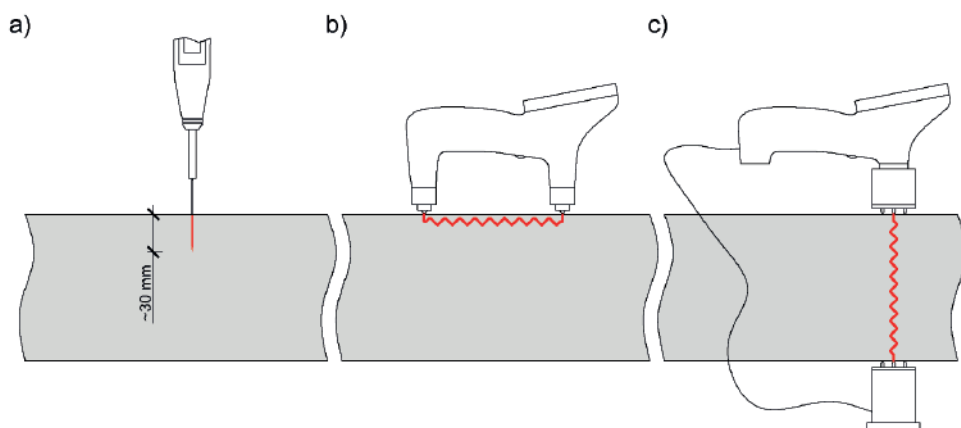


Rys. 53. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie VI: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Pekar, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER , d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR



Rys. 54. Porównanie wyników pomiaru tomografem ultradźwiękowym z wynikami badań punktowych w Elemencie VII: a) mapa uszkodzeń uzyskana z tomografu ultradźwiękowego, b) mapa uszkodzeń uzyskana z badań młotkiem do drewna Wood Peko, c) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1401 SURFER, d) mapa uszkodzeń uzyskana z badań UK 1410 PULSAR

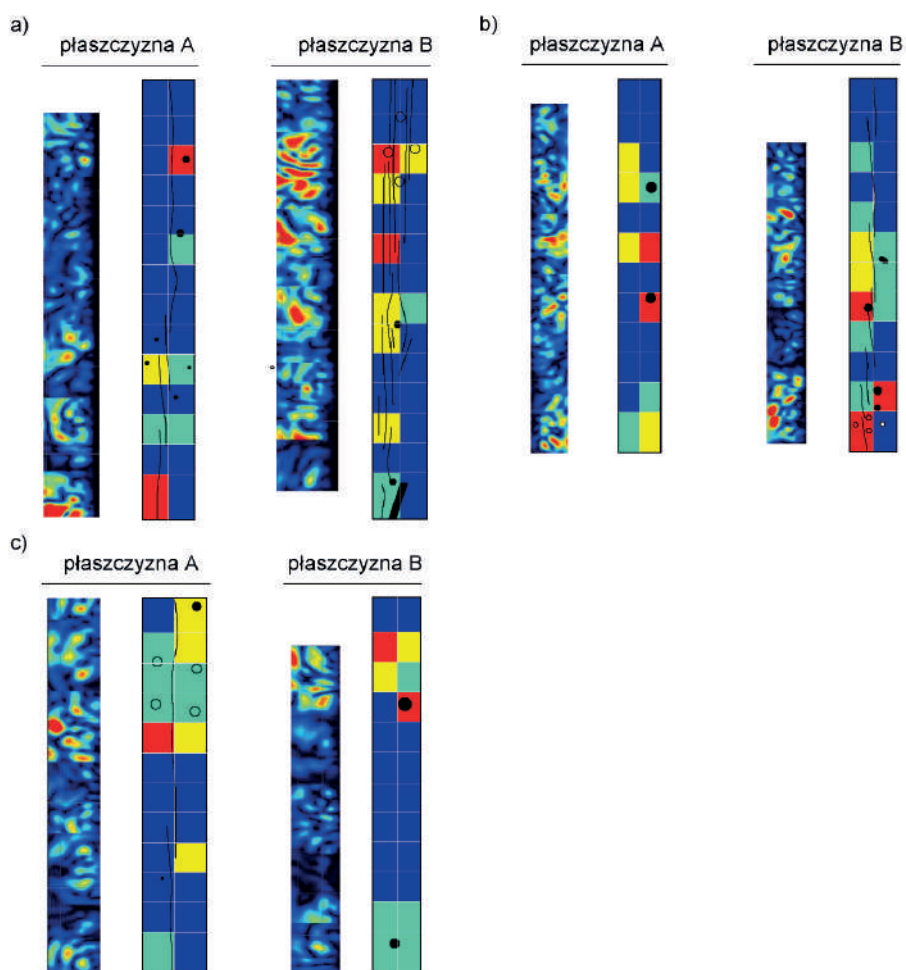
Porównując wyniki badań punktowych z wynikami uzyskanymi z tomografu ultradźwiękowego można stwierdzić zgodność w zakresie największych uszkodzeń. Wyniki uzyskane z metod punktowych różnią się jednak między sobą, czasami dość istotnie. Wpływ na te różnice ma oczywiście zakres pomiarowy i charakter pracy każdego z urządzeń. W przypadku młotka do drewna Wood Peko pomiar jest punktowy i przypowierzchniowy, obejmujący głębokości do około 30 mm (rys. 55a). Badanie urządzeniem UK 1401 SURFER jest liniowe i przypowierzchniowe, analizowana jest ultradźwiękowa fala poprzeczna (rys. 55b), natomiast badanie urządzeniem UK 1410 PULSAR jest również liniowe, lecz obejmuje całą grubość elementu i analizuje się tu prędkość ultradźwiękowej fali podłużnej (rys. 55c). Tłumaczy to różnice w uzyskanych wynikach badań różnymi urządzeniami w tym samym punkcie pomiarowym.



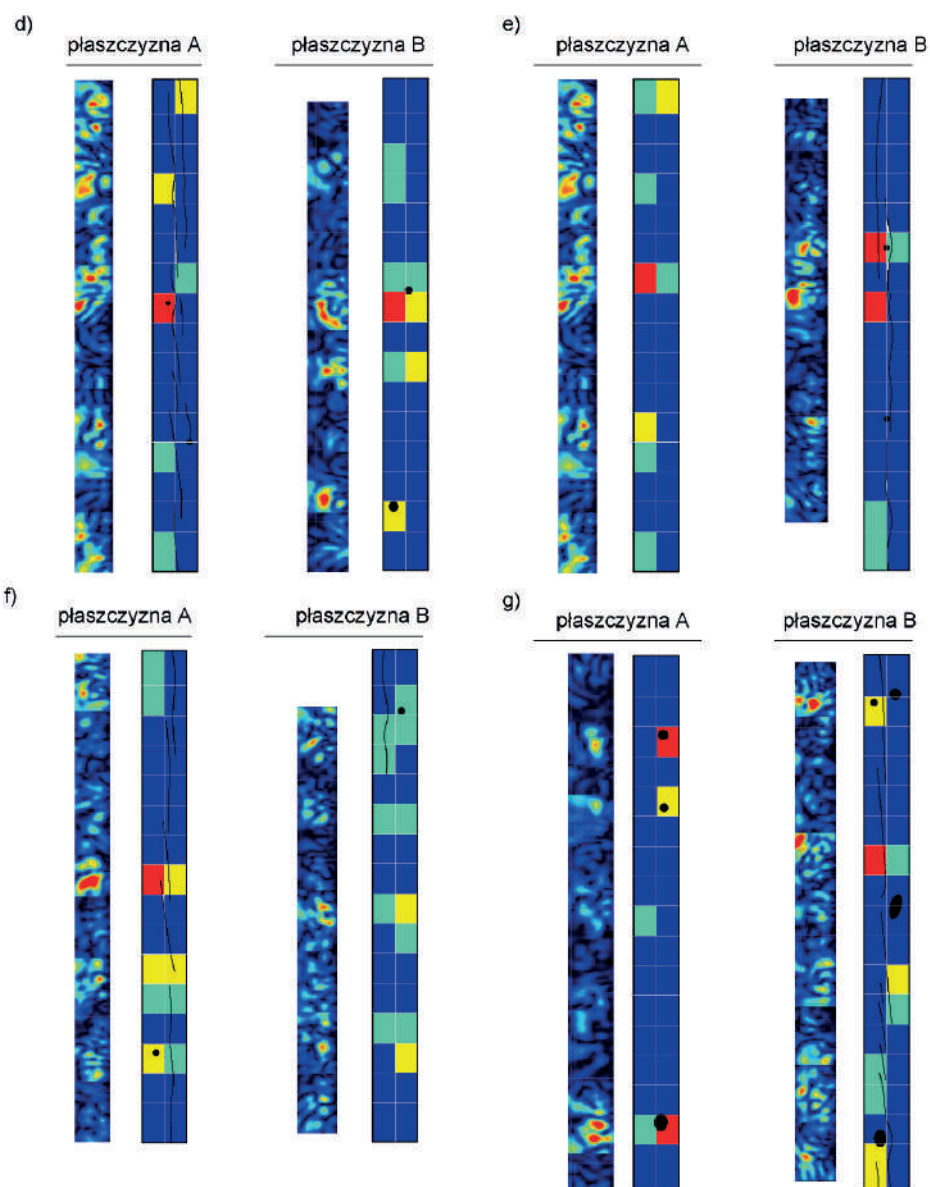
Rys. 55. Obszar badań w zastosowanych urządzeniach: a) młotek do drewna Wood Peko, b) UK 1401 SURFER, c) UK 1410 PULSAR

Uzyskane z badań młotkiem do drewna i urządzeniami ultradźwiękowymi wyniki pokazano jako sumaryczne na jednej mapie – rys. 56 i 57. Przyjęto przy tym założenie, że na danym obszarze wyświetlony zostanie najbardziej niekorzystny wynik pomiaru. Na rys. 56 i 57 widać lepszą zgodność między badaniami wykonanymi tomografem ultradźwiękowym a połączonymi wynikami badań z trzech urządzeń pomiarowych: młotka do drewna oraz urządzeń ultradźwiękowych UK 1401 Surfer i UK 1410 Pulsar.

Przeprowadzone badania wykazały zatem, że jeśli nie dysponuje się tomografem ultradźwiękowym lub innym urządzeniem mapującym strukturę wewnętrzną najlepiej jest łączyć kilka punktowych metod badawczych.



Rys. 56. Porównanie wyników badań tomografem ultradźwiękowym i połączonych badań punktowych więźby nad prezbiterium



Rys. 57. Porównanie wyników badań tomografem ultradźwiękowym i połączonych badań punktowych więzby nad nawą

4.6. Wnioski z badań wstępnych

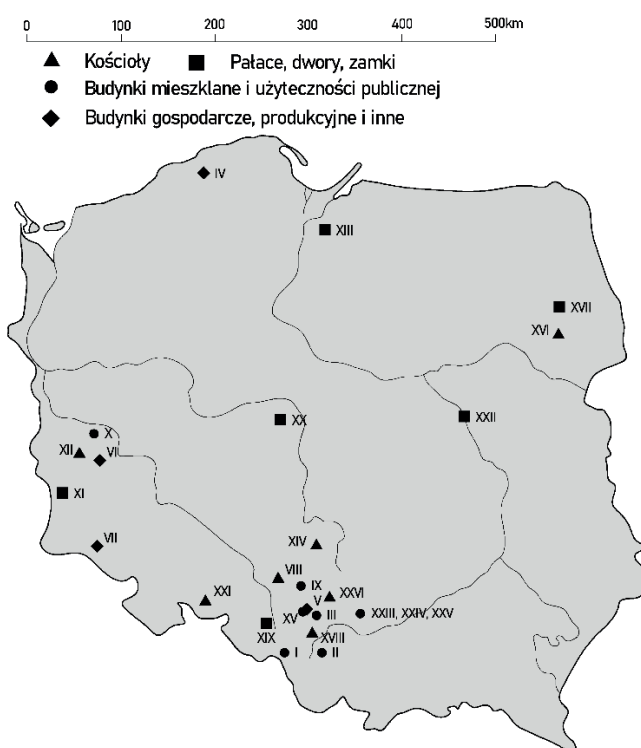
W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że metody semi-nieniszczące i nieniszczące można stosować do jakościowej oceny drewna w budynkach zabytkowych. Metodami tymi można wykryć ogniska korozji biologicznej, nieciągłości w budowie oraz określać wpływ wad wewnętrznych na jakość drewna. Z przedstawionych badań wynika, że z uwagi na sposób działania zastosowanych urządzeń najlepiej stosować kilka metod badań równocześnie. Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- ❑ Wizualne oględziny pozwoliły na wykrycie około 30÷50% uszkodzeń badanych elementów.
- ❑ Tomograf ultradźwiękowy może być z powodzeniem zastosowany do diagnostyki wad elementów drewnianych.
- ❑ Do diagnostyki wad można również zastosować metody semi-nieniszczące i nieniszczące pozwalające na wykonanie badania w konkretnym punkcie elementu. Uzyskanie odpowiedniej dokładności badań wymaga wtedy jednak ich prowadzenia w dość gęstej siatce pomiarowej. W przedmiotowych badaniach przyjęto siatkę 8x10 cm, co wydaje się być wartościami minimalnymi.
- ❑ Lepsze efekty w wykrywaniu wad uzyskano łącząc kilka metod nieniszczących.
- ❑ Wykonywanie badań na gęstej siatce jest pracochłonne, a w przypadku obiektów zabytkowych wykonywanie badań semi-nieniszczących (np. młotkiem do drewna) może być niemożliwe z uwagi na gęstą perforację. Dlatego w analizie należy raczej stosować nowoczesne metody pozwalające na uzyskanie obrazu wnętrza badanego elementu, takie jak tomografy ultradźwiękowe, urządzenia radarowe lub urządzenia wykorzystujące promieniowanie przenikliwe.

5. NIENISZCZĄCE I SEMI-NIENISZCZĄCE BADANIA WŁASNE

5.1. Materiał do badań

Do badań pozyskano 70 zabytkowych elementów drewnianych z terenu całej Polski (rys. 58). Elementy pochodziły z ostatnich 500 lat – najstarszy z początku XV wieku, a najmłodszy z pierwszej połowy XX wieku. Widok elementów pokazano na rys. 59÷61. Dokonano rozpoznania gatunku drewna. Zestawienie pozyskanych elementów zamieszczono w tablicy 11. Elementy podzielono na serie przyporządkowane obiektowi pochodzenia. Serie oznaczono kolejnymi numerami rzymskimi. Poszczególne elementy w danej serii numerowano kolejnymi liczbami arabskimi.



Rys. 58. Lokalizacja miejsc pozyskanych elementów z drewna zabytkowego:

I – Jastrzębie-Zdrój, II – Czechowice-Dziedzice, III – Katowice, VI – Swołowo, V – Chorzów, VI – Borów Wielki, VII – Piechowice, VIII – Poniszowice, IX – Tarnowskie Góry, X – Kożuchów, XI – Lipna, XII – Brzeźnica, XIII – Malbork, XIV – Sądów, XV – Chorzów, XVI – Turośń Kościelna, XVII – Białystok, XVIII – Mikołów, XIX – Rudziniec, XX – Słodków, XXI – Nysa, XXII – Warszawa, XXII÷XXV Sławków, XXVI – Czeladź



Rys. 59. Widok elementów pozyskanych do badań



Rys. 60. Widok elementów pozyskanych do badań



Rys. 61. Widok wybranych elementów pozyskanych do badań

Tablica. 11. Zestawienie pozyskanych elementów z drewna zabytkowego

Nr serii	obiekt	Rok lub wiek wbudowania	Ilość	Nr elementu	Przeznaczenie	gatunek drewna
I	Budynek pouzdrowski, Jastrzębie-Zdrój, ul. Witczaka 4	1912 r.	2	I-1	krokiew, więźba dachowa	świerk
				I-2	belka ściany ryglowej	świerk
II	Budynek mieszkalny, Czechowice-Dziedzice	XIX w.	2	II-1	krokiew, więźba dachowa	świerk
				II-2	krokiew, więźba dachowa	świerk
III	Budynek mieszkalny, Katowice	XIX w.	2	III-1	krokiew, więźba dachowa	świerk
				III-2	krokiew, więźba dachowa	świerk
IV	Swołowo, budynek gospodarczy o konstrukcji szachulcowej	XVIII w.	1	IV-1	Miecz stopowy więźby dachowej	sosna
V	Belka z krzyża przydrożnego, Chorzów	XX w.	1	V-1	belka pozioma	sosna
VI	Borów Wielki, zabudowania folwarczne	1869 r.	5	VI-1*	zastrzał, więźba dachowa	sosna
				VI-2*	zastrzał, więźba dachowa	sosna
				VI-3	miecz, więźba dachowa	sosna
				VI-4	krokiew, więźba dachowa	sosna
				VI-5	krokiew, więźba dachowa	sosna

VII	Piechowice, budynek fabryki papieru WEPA	1861 r.	2	VII-1	krokiec, więźba dachowa	sosna
				VII-2	krokiec, więźba dachowa	świerk
VIII	Poniszowice, dzwonnica	1570 r.	2	VIII-1	podwalina	dąb
				VIII-2	podwalina	dąb
IX	Budynek mieszkalny, Tarnowskie góry ul. Tylna 5	1743 r.	4	IX-1	belka stropowa	sosna
				IX-2	krokiec, więźba dachowa	świerk
				IX-3	krokiec, więźba dachowa	świerk
				IX-4	plątew, więźba dachowa	sosna
X	Kożuchów, budynek mieszkalny	XVII w.	1	X-1	belka stropowa	sosna
XI	Pałac w Lipnej, wozownia	XVIII w.	1	XI-1	belka stropowa	sosna
XII	Kościół w Brzeźnicy	XVII w.	1	XII-1	jętką	sosna
XIII	Zamek w Malborku	XX w.	3	XIII-1	belka mostu na zamek wysoki	dąb
				XIII-2	belka mostu na zamek wysoki	dąb
				XIII-3	belka mostu na zamek wysoki	dąb
XIV	Kościół w Sadowie	1412 r.	8	XIV-1*	krokiec, więźba dachowa	jodła
				XIV-2	zastrzał, więźba dachowa	jodła

				XIV-3	krokiew, więźba dachowa	jodła
				XIV-4	krokiew, więźba dachowa	jodła
				XIV-5	zastrzał, więźba dachowa	jodła
				XIV-6*	zastrzał, więźba dachowa	jodła
				XIV-7	krokiew, więźba dachowa	jodła
				XIV-8	krokiew, więźba dachowa	jodła
XV	Budynek szpitala, Chorzów, ul. Strzelców Bytomskich 11	1915 r.	6	XV-1*	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XV-2	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XV-3*	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XV-4	płatew, więźba dachowa	sosna
				XV-5	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XV-6	płatew, więźba dachowa	sosna
XVI	Kościół w Turośni Kościelnej	1870 r.	8	XVI-1	Element sygnaturki	sosna
				XVI-2	Element sygnaturki	sosna
				XVI-3	Element sygnaturki	sosna
				XVI-4	Element sygnaturki	sosna

				XVI-5	Element sygnaturki	sosna
				XVI-6	Element sygnaturki	sosna
				XVI-7	Element sygnaturki	sosna
				XVI-8	Element sygnaturki	sosna
XVII	Budynek mieszkalny, Białystok, ul. Kisielewskiego „Kisiela”	XIX w.	4	XVII-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XVII-2	słup, więźba dachowa	sosna
				XVII-3	słup, więźba dachowa	Sosna
				XVII-4	Brak w zestawie, wyniki są	sosna
XVII I	Kościół Matki Boskiej Śnieżnej, Mikołów	1911 r.	6	XVIII-1	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
				XVIII-2	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
				XVIII-3	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
				XVIII-4	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
				XVIII-5	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
				XVIII-6	elementy wzmocnienia więźby dachowej	jodła
XIX	Pałac w Rudzińcu	1907 r.	1	XIX-1	krokiew, więźba dachowa	jodła

XX	Dwór w Słodkowie	XIX w.	4	XX-1	belka stropowa	sosna
				XX-2	belka stropowa	sosna
				XX-3	belka stropowa	sosna
				XX-4	belka stropowa	sosna
XXI	Kościół w Nysie	XVIII/XIX w.	4	XXI-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XXI-2	krokiew, więźba dachowa	świerk
				XXI-3	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XXI-4	krokiew, więźba dachowa	świerk
XXII	Budynek mieszkalny, Warszawa, Bawełniana 16	1932 r.	1	XXII-1	Belka ze ściany ryglowej	sosna
XXII I	Wikarówka, Sławków, ul. Kościelna 22	1787 r.	1	XXIII-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
XXI V	Ratusz, Sławków, ul. Rynek 1	1907 r.	2	XXIV-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XXIV-2	krokiew, więźba dachowa	sosna
XXV	Budynek mieszkalny, Sławków, ul. Mały Rynek 9	1862 r.	2	XXV-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
				XXV-2	krokiew, więźba dachowa	świerk
XXV I	Czeladź Kościół	1913 r.	1	XXVI-1	krokiew, więźba dachowa	sosna
Suma:			75			

* elementy nie przebadane z uwagi na znaczą degradację drewna

Na pozyskanych elementach stwierdzono występowanie inskrypcji i ciesielskich znaków montażowych (rys. 62). Znak słońca widoczny na rys. 62a zdaniem Zubrzyckiego [129] oznaczał błogosławieństwo dla mieszkańców. Tłoczek [112], Tajchman [110] i Mazur [73] rozetę i słońce uważają za godło mistrza cechowego. Dodatkowe nacięcie pod innym kątem za numerem XXI (rys. 62b) oznaczało rozróżnienie połaci dachowej, w sakralnych obiektach orientowanych zwykle na popłacie północną i południową, w pozostałych na lewą i prawą [72].

a)



b)



Rys. 62. Inskrypcje i oznaczenia na pozyskanych belkach: a) „ANNO 1743 DIE 19IVLI IK” (belka IX-1), b) ciesielski znak montażowy „XXI I” (belka IV-1)

Wykonano badania nieniszczące i semi-nieniszczące pozyskanych elementów z drewna zabytkowego tymi samymi urządzeniami, które wykorzystano w badaniach wstępnych. Dodatkowo wykonano badania wilgotności drewna. Zrezygnowano z badań 6 elementów (oznaczone gwiazdką w tablicy 11) z uwagi na ich zbyt dużą degradację.

Poniżej opisano wyniki badań nieniszczących, a w punkcie 6 wyniki badań niszczących pozyskanych elementów. Badania prowadzono w okresie od lipca 2023 r. do maja 2025 r. w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej.

5.2. Badania tomografem ultradźwiękowym

Każdy element przebadano przy pomocy tomografu ultradźwiękowego Pundit Pd 8000 (rys. 63). Opis urządzenia oraz zasady jego działania zamieszczono w punkcie 4.3. Badania prowadzono na dwóch sąsiednich płaszczyznach każdej belki, dzięki czemu uzyskano rzut wszystkich wad na dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny. Skany przeniesiono do programu typu CAD, gdzie obrysowano wady i określono ich powierzchnię (rys. 64). Przyjęto przy tym zasadę, że za wady uznaje się plamy o wyraźnym w kolorze czerwonym, żółtym i seledynowym. Szarości nie uwzględniano jako wadę. Następnie przeliczono stosunek sumy powierzchni wad do sumy powierzchni badanej płaszczyzny i pomnożono przez 100, uzyskując w ten sposób procentowy udział wad w badanym elemencie:

$$A_{1,2} = \frac{A_1 + A_2}{L_1 h_1 + L_2 b_2} 100, \quad (17)$$

gdzie:

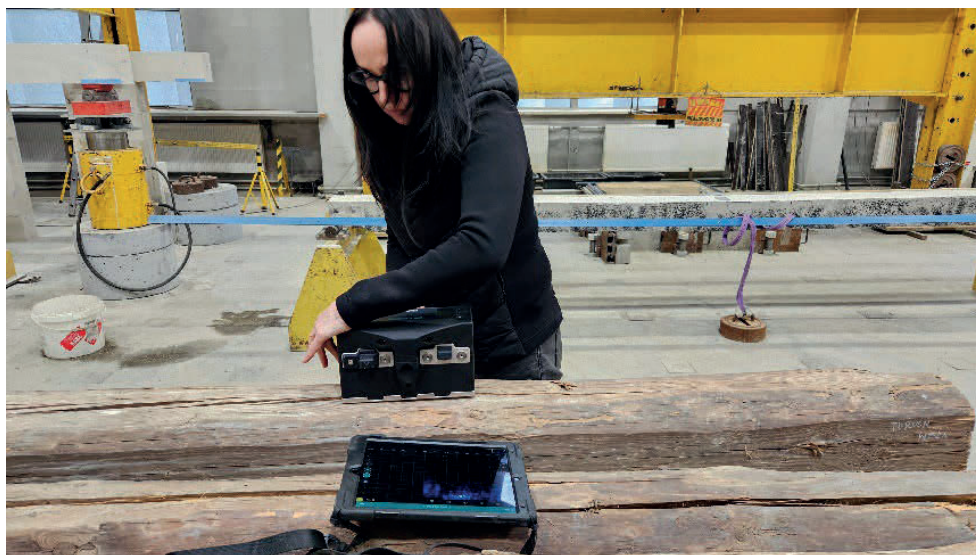
$A_{1,2}$ – procentowy udział rzutu wad na obie badane powierzchnie,

A_1 – pole rzutu wad na pierwszą powierzchnię,

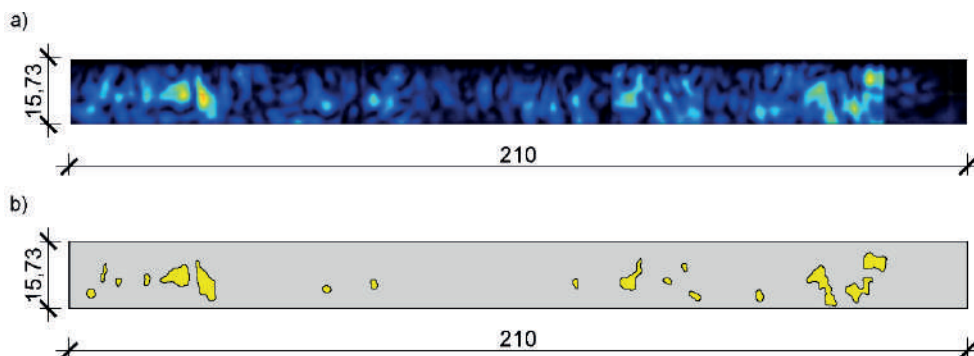
A_2 – pole rzutu wad na drugą powierzchnię,

L_1 – długość pierwszej badanej powierzchni,

h_1 – wysokość pierwszej badanej powierzchni,
 L_2 – długość drugiej badanej powierzchni,
 b_2 – wysokość drugiej badanej powierzchni.



Rys. 63. Badanie tomografem ultradźwiękowym

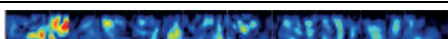
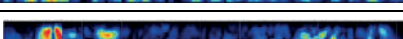
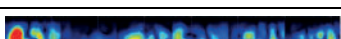


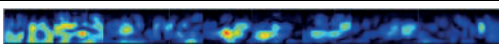
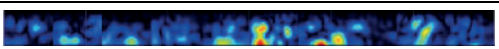
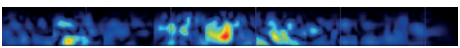
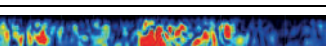
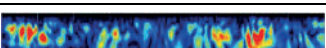
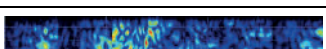
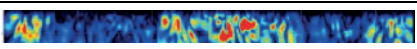
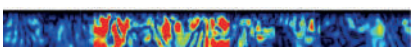
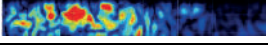
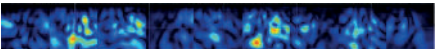
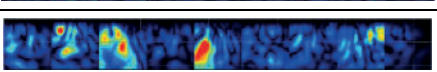
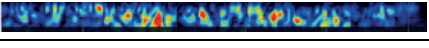
Rys. 64. Sposób określania powierzchni wad na przykładzie belki I-1: a) obraz uzyskany z tomografu ultradźwiękowego, b) wady uwzględniane w analizie (kolor żółty)

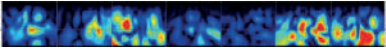
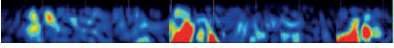
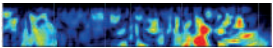
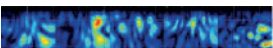
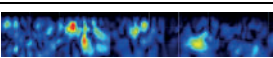
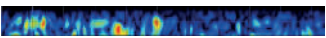
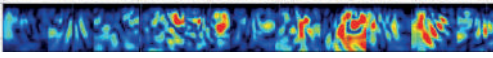
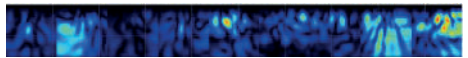
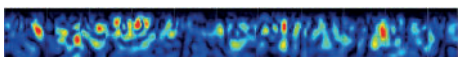
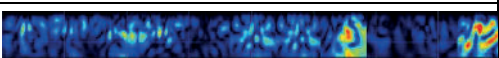
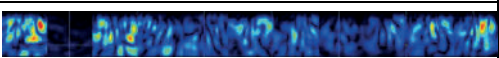
Wyniki badań zamieszczono w tablicy 12. Stosunek powierzchni wad od powierzchni elementu waha się w przedziale 2,43÷29,12%. Najwięcej wad

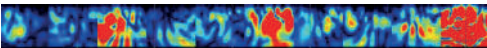
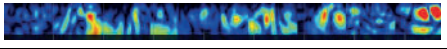
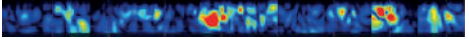
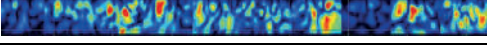
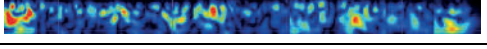
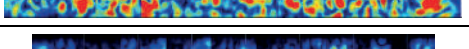
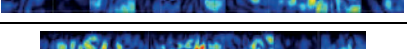
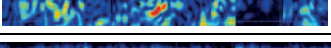
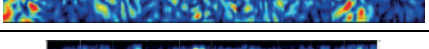
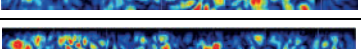
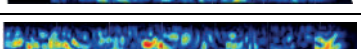
wykazuje element XVII-1, a najmniej element XIII-2. Obliczone stosunki powierzchni wad zostaną wykorzystane w rozdziale 8 dysertacji, gdzie podaje się propozycję metodyki określania wytrzymałości na zginanie w zabytkowych elementach drewnianych.

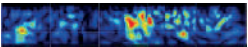
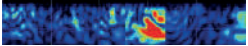
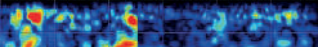
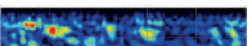
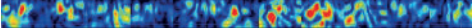
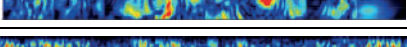
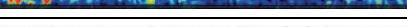
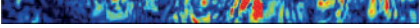
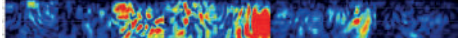
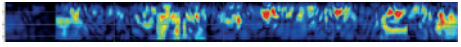
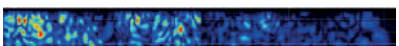
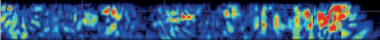
Tablica. 12. Wyniki badań tomografem ultradźwiękowym

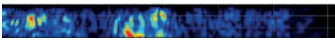
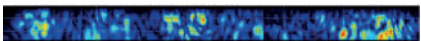
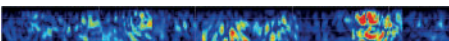
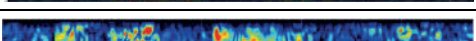
Nr belki	Obraz uzyskany z tomografu ultradźwiękowego	Długość skanu, L_i , m	powierzchnia wad na jednej płaszczyźnie A_i , cm ²	procento wy udział rzutu wad $A_{1,2}$ wg (17), %
I-1		2,1	144,35	4,84
		1,47	94,39	
I-2		1,26	118,05	6,53
		1,26	90,09	
II-1		1,47	222,83	11,98
		1,47	210,32	
II-2		2,00	289,26	13,21
		2,00	354,35	
III-1		1,47	107,10	7,55
		1,47	104,93	
III-2		1,85	283,06	8,27
		1,78	98,32	
IV-1		1,25	118,17	4,92
		1,34	60,05	
V-1		2,10	189,51	10,57
		2,12	240,81	
VI-3		1,26	248,03	18,17
		1,05	259,65	

VI-4		2,1	234,54	7,66
		2,1	175,55	
VI-5		1,87	87,61	5,40
		1,87	173,97	
VII-1		1,28	68,79	4,64
		1,28	85,23	
VII-2		1,28	297,85	20,27
		1,28	330,02	
VIII-1		1,26	77,13	5,27
		1,26	102,21	
VIII-2		1,05	52,64	4,90
		1,03	63,63	
IX-1		2,3	125,18	3,90
		1,9	218,04	
IX-2		1,9	402,44	10,62
		1,9	693,63	
IX-3		2,31	301,19	23,42
		2,5	673,70	
IX-4		0,95	232,05	25,85
		0,85	264,70	
X-1		1,75	616,53	30,89
		1,65	443,74	
XI-1		1,9	263,13	9,07
		1,9	443,79	
XII-1		1,88	473,32	21,26
		1,93	343,98	
XIII-1		1,45	25,82	

		1,46	409,53	14,79
XIII-2		1,47	32,02	2,43
		1,57	43,23	
XIII-3		1,47	127,76	18,04
		1,47	249,31	
XIV-2		1,25	47,97	5,25
		1,47	112,60	
XIV-3		1,05	334,15	17,40
		1,05	232,25	
XIV-4		1,05	216,03	12,6
		1,05	167,64	
XIV-5		1,25	80,72	9,59
		1,25	136,18	
XIV-7		1,25	124,28	9,34
		1,47	113,70	
XIV-8		1,15	113,32	8,40
		1,45	89,29	
XV-2		1,45	99,39	8,01
		1,45	256,03	
XV-4		2,45	1064,31	13,72
		2,35	178,94	
XV-5		1,9	248,50	9,28
		1,9	421,69	
XV-6		2,3	377,87	7,42
		2,3	277,61	
XVI-1		2,3	764,83	25,14

		2,1	1075,77	
XVI-2		1,88	501,12	18,41
		2,12	485,02	
XVI-3		1,9	481,86	18,96
		1,9	531,57	
XVI-4		1,9	620,83	21,59
		1,9	585,39	
XVI-5		2,30	894,55	24,46
		2,30	893,07	
XVI-6		1,9	386,72	13,22
		2,1	434,73	
XVI-7		2,1	610,89	19,04
		1,9	488,91	
XVI-8		2,3	971,83	22,71
		2,3	487,09	
XVII-1		2,1	1191,21	23,09
		1,9	163,81	
XVII-2		1,45	250,00	13,44
		1,9	414,29	
XVII-3		1,45	94,75	8,23
		1,47	233,35	
XVII-4		1,65	470,26	22,92
		1,65	516,90	
XVIII-1		1,6	419,47	10,67
		1,6	100,46	
XVIII-2		1,6	390,70	13,48
		1,6	278,00	

XVIII-3		1,25	254,65	12,26
		1,25	205,31	
XVIII-4		1,25	275,31	10,32
		1,25	95,85	
XVIII-5		1,45	451,73	14,92
		1,25	107,82	
XVIII-6		1,25	287,87	13,13
		1,25	178,11	
XIX-1		2,3	775,68	20,36
		2,3	708,96	
XX-1		1,30	345,69	14,14
		1,41	107,31	
XX-2		1,68	168,28	6,48
		1,66	112,51	
XX-3		1,26	81,42	5,70
		1,47	123,41	
XX-4		1,62	308,72	15,05
		1,65	297,37	
XXI-1		1,85	234,06	14,32
		1,67	500,84	
XXI-2		1,8	441,09	5,11
		1,9	431,35	
XXI-3		1,87	359,70	17,43
		1,9	244,60	
XXI-4		1,67	236,68	12,83
		1,64	383,79	
XXII-1		1,45	145,25	7,09

		1,45	119,03	
XXIII-1		1,9	287,99	10,29
		1,88	199,51	
XXIV-1		1,7	188,56	9,62
		1,88	222,03	
XXIV-2		1,94	206,86	10,71
		1,94	378,25	
XXV-1		1,71	184,81	6,37
		1,67	87,54	
XXV-2		1,92	478,41	18,71
		1,9	349,16	
XXVI-1		1,45	266,15	15,01
		1,75	381,21	

5.3. Badania wilgotności

Wykonano badania wilgotności drewna urządzeniem T510 firmy Trotec. Opis urządzenia i zasady jego działania zamieszczono w punkcie 4.3. Badania prowadzono na dwóch sąsiednich płaszczyznach każdego elementu, mierząc wilgotność co około $\frac{1}{4}$ jego długości. Wyniki badań pokazano w tabelicy 13, gdzie zamieszczono wyniki z każdego pomiaru i wartość średnią. Badania wilgotności prowadzono tuż przed badaniami nieniszczącymi i niszczącymi. Stwierdzono, że wilgotność badanych elementów waha się w przedziale $7,98 \div 22,27\%$. Największą średnią wilgotność miał element XV-6, a najmniejszą element XVII-2. Przykładowy wynik pomiaru pokazano na rys. 65.



Rys. 65. Przykładowy pomiar wilgotności

Tablica. 13. Wyniki badań wilgotności

Nr elementu	Wilgotność, %					Średnia wilgotność, %
I-1	11,0	12,0	11,2	11,0	11,4	11,27
	12,0	11,2	11,2	11,9	9,8	
I-2	9,7	11,2	10,2	10,2	9,8	10,33
	11,0	11,3	10,0	9,9	10,0	
II-1	11,1	10,0	9,8	9,7	11,0	10,25
	11,2	10,4	10,3	10,0	9,0	
II-2	10,2	10,2	10,6	10,0	10,0	10,14
	10,0	9,9	10,3	10,0	10,2	
III-1	10,0	9,8	9,8	9,7	10,0	10,03
	10,2	10,4	10,2	10,4	9,8	
III-2	9,7	9,7	9,7	10,0	10,0	9,91
	10,2	9,8	9,8	10,0	10,2	
IV-1	14,6	14,9	15,5	12,4	16,2	13,59
	15,7	12,0	11,3	10,5	12,8	
V-1	10,2	11,7	11,3	13,1	12,2	10,58
	8,7	9,3	9,9	9,9	9,5	
VI-3	11,8	12,5	12,8	12,9	11,6	12,3
	12,5	12,8	12,9	11,6	11,6	
VI-4	12,4	13,9	13,1	14,0	13,6	13,4
	13,9	13,1	14,0	13,6	12,4	
VI-5	12,2	12,3	12,0	12,1	11,2	11,94
	12,3	12,0	12,1	11,2	12,0	

VII-1	11,9	13,0	12,6	10,9	13,3	13,45
	14,5	15,1	14,3	15,2	13,7	
VII-2	12,2	13,1	13,6	14,3	14,9	13,54
	11,3	13,3	13,5	14,7	14,5	
VIII-1	15,8	15,0	14,0	14,4	12,7	14,36
	13,4	14,2	14,2	14,7	15,2	
VIII-2	14,4	14,2	15,0	15,2	14,2	14,32
	13,1	14,7	13,2	14,7	14,5	
IX-1	12,5	12,6	11,4	11,7	12,6	12,01
	12,6	11,4	11,7	12,6	11,0	
IX-2	8,8	16,4	14,4	13,5	12,7	13,21
	12,6	13,2	13,7	12,7	14,1	
IX-3	12,7	12,7	12,7	12,7	12,6	12,68
	12,5	12,6	12,6	12,7	13,0	
IX-4	7,2	9,6	10,0	10,1	8,8	9,46
	8,7	10,2	10,1	10,0	9,9	
X-1	12,2	11,2	11,0	12,0	10,6	11,08
	11,1	11,2	10,4	10,1	11,0	
XI-1	10,3	10,5	10,2	10,8	10,3	10,27
	10,0	10,1	10,3	9,9	10,3	
XII-1	12,5	12,0	13,7	13,0	13,9	12,86
	12,4	12,1	13,6	13,1	12,3	
XIII-1	12,7	14,6	10,9	13,2	11,5	13,53
	14,6	14,6	14,1	15,1	14,0	
XIII-2	15,9	17,1	18,6	15,5	12,9	14,74
	11,6	14,6	13,5	14,1	13,6	
XIII-3	15,7	15,6	16,5	15,8	12,4	15,53
	15,3	17,8	16,1	17,1	13,0	
XIV-2	16,8	17,4	15,8	16,1	19,6	18,4
	20,5	21,0	17,7	18,0	17,5	
XIV-3	13,2	13,7	14,1	14,6	15,0	14,11
	14,5	14,4	14,1	13,8	13,7	
XIV-4	12,3	12,4	12,7	13,3	13,6	12,75
	12,4	12,6	13,1	12,4	12,7	
XIV-5	14,0	13,5	13,8	13,3	13,0	13,13
	12,8	13,0	12,8	13,0	12,1	
XIV-7	15,0	18,2	19,8	21,5	18,1	17,65
	17,2	15,7	14,7	18,3	18,0	
XIV-8	26,3	24,5	20,9	21,4	17,0	22,14
	26,4	22,8	22,3	19,4	20,4	
XV-2	18,2	19,5	20,9	18,8	18,4	18,73
	18,3	18,0	18,7	18,2	18,3	
XV-4	20,3	19,7	18,5	19,3	19,0	19,42
	20,1	19,6	18,6	20,1	19,0	
XV-5	18,2	21,1	21,0	17,9	21,8	20,01
	18,1	21,2	21,1	18,0	21,7	
	33,2	22,5	20,3	20,6	17,9	

XV-6	18,9	18,0	17,9	20,1	20,2	22,27
XVI-1	11,6	11,3	12,1	11,8	11,7	11,58
	11,4	12,0	11,0	11,2	11,7	
XVI-2	12,4	12,5	12,2	12,0	11,1	11,77
	11,7	11,8	11,2	11,2	11,6	
XVI-3	14,5	15,1	14,6	12,4	13,3	13,04
	11,2	11,9	13,4	11,3	12,7	
XVI-4	12,5	13,0	12,7	13,2	12,4	12,19
	11,1	12,4	12,7	11,0	10,9	
XVI-5	8,9	8,4	8,2	8,5	8,3	8,7
	9,9	8,9	8,6	9,6	8,6	
XVI-6	9,1	9,2	9,1	10,2	9,2	9,33
	9,8	9,4	8,7	9,2	9,4	
XVI-7	9,0	8,4	9,1	9,5	8,7	8,91
	8,5	9,5	8,7	8,7	9,0	
XVI-8	9,3	9,1	9,1	9,1	9,1	9,35
	9,4	9,7	9,8	9,9	9,0	
XVII-1	8,5	7,9	9,0	8,6	8,4	8,47
	9,1	8,5	8,5	8,2	8,0	
XVII-2	6,6	7,1	6,9	6,0	5,4	7,98
	7,9	10,2	9,2	10,0	10,5	
XVII-3	11,6	11,6	11,9	12,4	12,5	11,93
	12,2	11,0	12,1	12,1	11,9	
XVII-4	8,5	8,3	8,1	8,1	7,9	8,23
	9,5	9,1	7,8	8,6	6,4	
XVIII-1	10,6	11,3	11,2	10,8	10,8	10,40
	9,9	10,6	10,4	9,1	9,3	
XVIII-2	10,9	11,7	11,7	11,4	11,7	11,7
	11,2	12,9	12,5	11,9	11,7	
XVIII-3	11,6	11,8	11,0	11,2	11,3	10,2
	8,8	8,9	9,1	9,1	9,2	
XVIII-4	8,9	8,9	9,0	9,1	8,8	9,25
	10,1	8,6	9,9	10,2	9,0	
XVIII-5	11,3	11,3	11,8	11,9	11,5	11,59
	12,0	11,9	11,1	11,7	11,4	
XVIII-6	10,2	11,2	11,4	11,5	10,6	10,60
	9,2	8,2	13,3	10,2	10,2	
XIX-1	12,1	12,3	12,1	12,2	12,5	11,99
	11,9	11,5	12,0	12,3	11,0	
XX-1	12,6	11,6	12,9	10,7	13,2	10,91
	10,7	7,3	8,5	10,9	10,7	
XX-2	10,3	10,4	10,6	10,9	10,9	10,62
	11,0	10,9	10,6	10,4	10,2	
XX-3	10,9	12,5	10,9	14,8	12,8	11,84
	10,5	12,0	12,5	12,3	9,2	
XX-4	11,6	11,6	12,9	10,7	13,2	10,86
	10,7	7,3	9,0	10,9	10,7	

XXI-1	10,2	10,7	11,2	11,6	12,7	11,07
	10,8	11,6	10,5	10,9	10,5	
XXI-2	10,3	11,5	11,4	11,1	11,3	10,83
	10,6	12,2	10,2	9,2	10,5	
XXI-3	10,3	10,2	10,3	10,5	9,9	10,27
	10,1	10,2	10,	10,2	11,0	
XXI-4	10,2	11,2	10,1	7,9	9,9	10,14
	9,7	11,5	8,3	11,6	11,0	
XXII-1	12,1	12,7	12,6	13,1	11,2	12,72
	14,3	12,8	12,5	13,0	12,9	
XXIII-1	12,	12,1	11,7	11,5	11,2	11,39
	11,0	10,9	11,2	11,3	11,0	
XXIV-1	12,3	9,7	10,9	7,5	9,1	10,04
	8,4	8,9	10,7	117	11,2	
XXIV-2	9,8	10,0	11,7	10,7	14,9	11,12
	11,2	12,0	10,7	9,5	10,7	
XXV-1	10,0	9,2	10,2	9,6	10,4	10,08
	10,2	10,4	9,4	10,9	10,5	
XXV-2	9,7	9,8	10,3	10,6	11,3	11,02
	11,2	12,0	11,9	12,2	11,2	
XXVI-1	10,2	10,3	10,5	10,3	10,7	10,60
	10,2	10,8	11,5	11,0	10,5	

5.4. Badania młotkiem do drewna

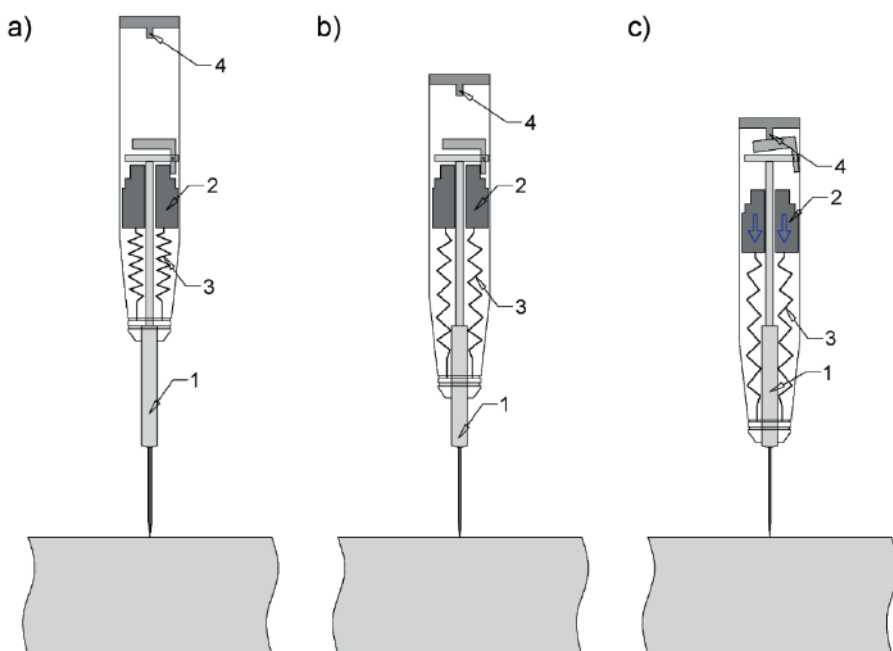
5.4.1. Określenie współczynnika poprawkowego z uwagi na położenie młotka

Podobnie jak w przypadku klasycznych młotków Schmidta do betonu, przy położeniu innym niż poziomym należy stosować współczynnik poprawkowy uwzględniający położenie młotka. Wynika to z budowy samego urządzenia i zasady jego działania. Młotek uruchamia się przykładając trzpień 1 z igłą do powierzchni elementu drewnianego (rys. 66a). Maksymalne wciśnięcie trzpienia powoduje cofanie się masy uderzeniowej 2 usytuowanej wewnątrz młotka i naciągnięcie sprężyny 3 (rys. 66b). Cofnięcie się masy uderzeniowej 2 do urządzenia spustowego 4 powoduje zaś jej automatyczne zwolnienie i uderzenie tej masy w trzpień 1 (rys. 66c), co z kolei powoduje wbicie igły w badany element. Oznacza to, że przy ułożeniu młotka pionowo w dół siła

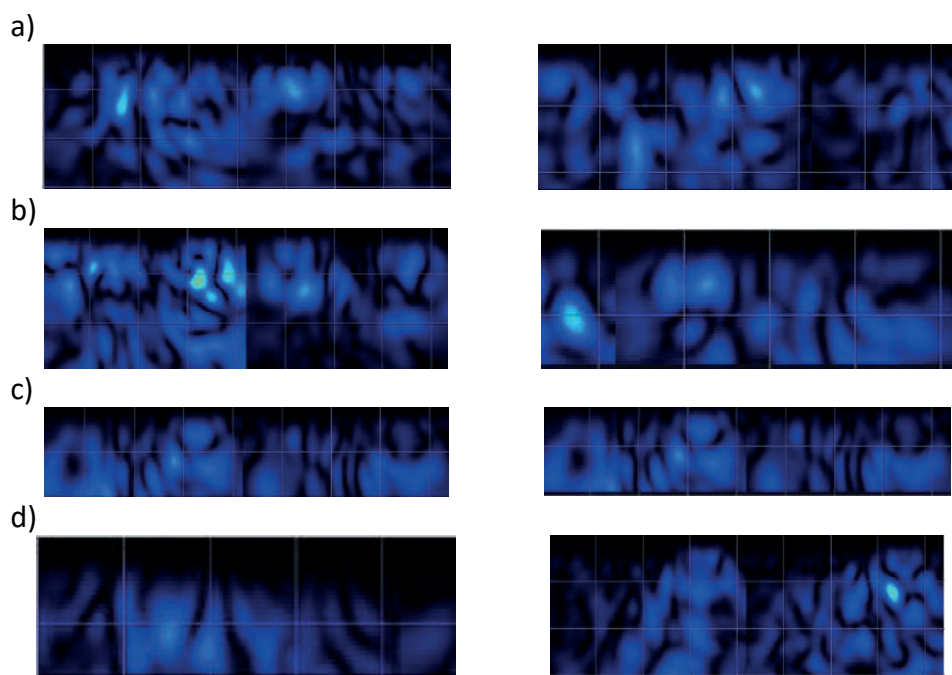
gravitacji przyspieszy masę uderzeniową, a przy ułożeniu pionowo w górę spowolni masę uderzeniową. Ponieważ producent urządzenia nie podaje współczynników korekcyjnych postanowiono takie współczynniki wyznaczyć. Dotychczas podobne współczynniki skalibrowano dla drewna nowego [44]. Nie znaleziono w literaturze współczynników poprawkowych dla drewna zabytkowego.

Do określenia współczynników korekcyjnych wycięto z pozyskanych elementów zabytkowych cztery próbki o długości 60 cm. Wycięto próbki dębu jodły, sosny i świerku. Starano się wybrać nieuszkodzone elementy. Elementy sprawdzono na okoliczność występowania wad wewnętrznych tomografem ultradźwiękowym na dwóch prostopadłych płaszczyznach (rys. 67). Stwierdzono, że wybrane elementy nie miały istotnych wad wewnętrznych.

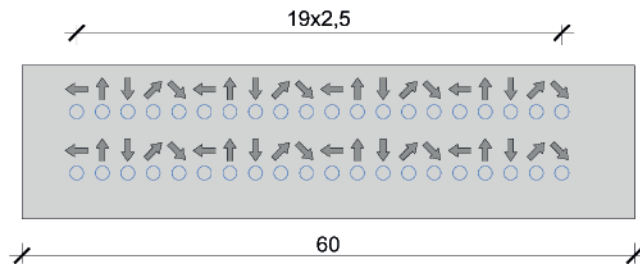
Badania prowadzono w 5 położeniach młotka do drewna Wood Peker DRC 19C0085M: poziomym, pionowo w dół, pionowo w górę, pod kątem 45° w dół i pod kątem 45° w górę. Na każdej belce naniesiono dwa rzędy punktów pomiarowych w rozstawie co 25 mm każdy. Schemat badań pokazano na rys. 68. Miejsca pomiarowe znaczone niebieskimi kółkami, a strzałki nad nimi obrazują kierunek badania. Elementy do badań w odpowiednim ułożeniu stabilizowano w imadle (rys. 69). Już w trakcie badania gołym okiem widać było różnicę między głębokością wbicia igły przy różnych ułożeniach młotka (rys. 70). Na rys. 71 pokazano elementy z wbitymi igłami. Wyniki badań zestawiono w tablicach 14÷17.



Rys. 66. Zasada działania młotka do drewna (opis w tekście)



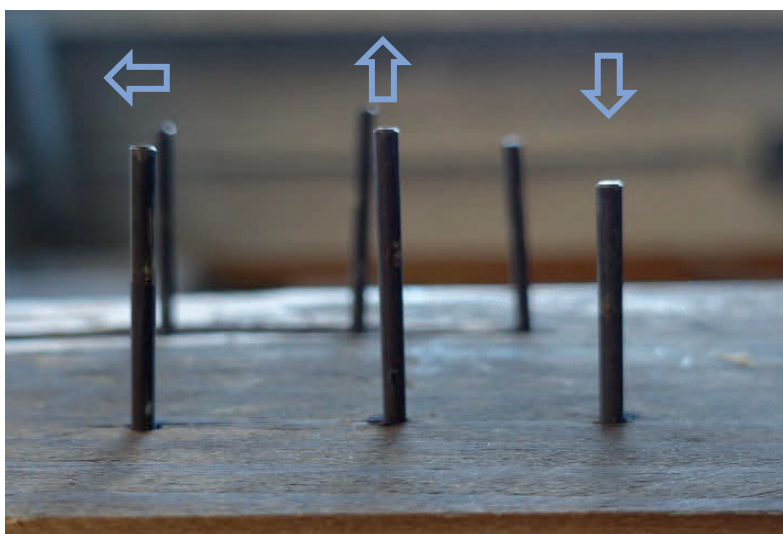
Rys. 67. Wyniki badań tomografem ultradźwiękowym: a) sosna, b) świerk, c) jodła, d) dąb



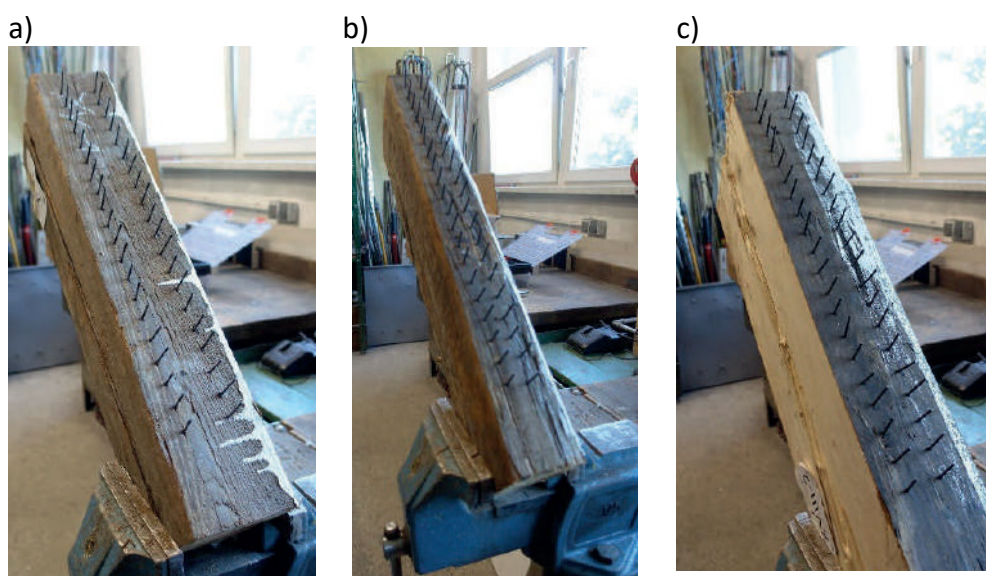
Rys. 68. Schemat miejsc badań do wyznaczenia współczynnika poprawkowego z uwagi na położenie młotka



Rys. 69. Badania do wyznaczenia współczynnika poprawkowego z uwagi na położenie młotka (element dębowy): a) położenie poziome, b) położenie pionowo w górę, c) położenie pionowo w dół, d) położenie pod kątem 45° w górę, e) położenie pod kątem 45° w dół



Rys. 70. Widoczna różnica głębokości zagłębienia igły w zależności od kierunku ułożenia młotka (strzałka)



Rys. 71. Elementy drewniane z wbitymi igłami: a) sosna, b) świerk, c) jodła

Tablica 14. Wyniki badań elementu sosnowego przy różnych położeniach młotka do drewna

Lp.	Kierunek uderzenia młotkiem do drewna				
	←	↑	↓	↖	↘
1	16,95	15,35	19,97	16,95	18,1
2	17,69	15,1	17,74	16,52	16,17
3	16,88	15,9	19,02	16,42	18,16
4	17,13	15,89	19,12	17,11	18,9
5	17,18	16,52	19,68	17,21	18,35
6	17	16,49	19,62	16,9	18,2
7	17,9	16,06	19,92	16,6	18,94
8	18,68	17,7	19,47	16,19	18,6
Średnia, mm	17,43	16,13	19,32	16,74	18,18
Odchylenie standardowe, mm	0,62	0,80	0,72	0,36	0,87
Współczynnik zmienności, %	3,58	4,99	3,74	2,14	4,81

Tablica 15. Wyniki badań elementu świerkowego przy różnych położeniach młotka do drewna

Lp.	Kierunek uderzenia młotkiem do drewna				
	←	↑	↓	↖	↘
1	18,92	17,26	21,67	18,35	20,48
2	20,45	18,49	22	18,74	19,94
3	18,5	17,34	20,5	19,51	20,22
4	18,78	18,4	20,43	17,57	18,98
5	20,07	17,49	20,9	19,24	20,11
6	19,19	18,36	21,3	19,06	20,4
7	19,48	19,02	21,89	18,36	20,64
8	19,79	18,88	21,26	19,15	20,3
Średnia, mm	19,40	18,16	21,24	18,75	20,13
Odchylenie standardowe, mm	0,67	0,70	0,60	0,63	0,51
Współczynnik zmienności, %	3,47	3,84	2,82	3,36	2,55

Tablica 16. Wyniki badań elementu jodłowego przy różnych położeniach młotka do drewna

Lp.	Kierunek uderzenia młotkiem do drewna				
	←	↑	↓	↖	↘
1	19,41	16,93	20,26	18,49	20,23
2	20,48	18,35	20,7	18,6	20,37
3	19,99	18,79	21,42	19,48	20,25
4	20,5	17,56	21,45	19,42	20,96
5	21,05	18,95	22,32	19,29	19,25
6	19,24	19,85	22,8	19,57	20,25
7	18,82	18,48	21,9	18,98	22,19
8	19,36	18,94	21,88	19,38	22,16
Średnia, mm	19,86	18,48	21,59	19,15	20,71
Odchylenie standardowe, mm	0,77	0,90	0,83	0,41	1,02
Współczynnik zmienności, %	3,88	4,87	3,83	2,16	4,92

Tablica 17. Wyniki badań elementu dębowego przy różnych położeniach młotka do drewna

Lp.	Kierunek uderzenia młotkiem do drewna				
	←	↑	↓	↖	↘
1	14,2	13,3	16,1	14,67	15,57
2	14,78	13,7	16,66	14,5	16,04
3	14,58	13,51	16,38	14,2	15,53
4	14,2	13,2	16,9	14,75	15,88
5	14,9	13,06	16,31	14,45	15,43
6	15,05	13,27	16,22	14,24	15,9
7	15,2	13,38	15,28	14,96	15,9
8	15,42	13,5	16,25	14,47	15,3
Średnia, mm	14,79	13,37	16,26	14,53	15,69
Odchylenie standardowe, mm	0,44	0,20	0,47	0,26	0,27
Współczynnik zmienności, %	3,01	1,51	2,92	1,76	1,71

Przyjęto odczyt poziomy jako odczyt referencyjny. W tablicy 18 zestawiono współczynniki poprawkowe określone jako różnice średnich wyników z badań przy poziomym położeniu młotka do drewna i średnich wyników przy kolejnych położeniach młotka. Widać, że współczynnik dla drewna dębowego odbiega od pozostałych elementów. Współczynnik poprawkowy dla drewna iglastego (świerk, sosna, jodła), jest podobny dla tych samych kierunków.

Tablica 18. Współczynniki poprawkowe dla różnego położenia młotka do drewna

Lp.	Współczynnik poprawkowy (mm), przy kierunku uderzenia młotkiem do drewna:			
	↑	↓	↖	↘
Sosna	+1,30	-1,89	+0,69	-0,75
Świerk	+1,24	-1,85	+0,65	-0,74
Jodła	+1,38	-1,74	+0,70	-0,85
Dąb	+1,43	-1,47	+0,26	-0,90

5.4.2. Badania elementów drewnianych

Pozyskane elementy drewniane (zob. rys. 59÷61) poddano badaniom młotkiem Schmidta do drewna Wood Peker DRC 19C0085M. Opis urządzenia oraz zasady jego działania zamieszczono w punktach 4.3 i 5.4.1. Elementy badano na dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach, na każdej płaszczyźnie w pięciu punktach pomiarowych równomiernie rozmieszczonych wzdłuż długości badanej belki. Rozstaw punktów pomiarowych wynosił $L/4 - 30$ cm (skrajne punkty pomiarowe sytuowano 15 cm od krawędzi elementu), gdzie L oznacza długość badanego elementu. Łącznie zbadano 680 punktów pomiarowych. W każdym punkcie igłę wbijano poprzez pięciokrotne uderzenie młotkiem do drewna. Igłę wbijano zawsze kierując młotek pionowo w dół, co jest najwygodniejsze i co, jak pokazały badania nad współczynnikiem kierunkowym (pkt. 5.4.1), zapewnia najmniejsze odchyłki od założonego

kierunku wbicia igły do badanego elementu. Przykładową fotografię urządzenia podczas badań pokazano na rys. 72. Wyniki badań zamieszczono w tablicy 19. W ostatniej kolumnie tablicy zamieszczono wynik badania skorygowany o współczynnik poprawkowy z tablicy 18, przyjęty w zależności od gatunku badanego drewna.



Rys. 72. Badanie belki młotkiem do drewna

Tablica. 19. Wyniki badań młotkiem do drewna

Nr elementu	Głębokość wbicia igły, mm					Średnia głębokość wbicia igły, mm	Średnia skorygowana a głębokość wbicia igły, mm
I-1	19	20,42	18,93	19,72	20,18	19,85	18,00
	19,88	20,2	19,7	20,36	20,14		
I-2	19,31	22,8	18,27	21,5	18,19	21,75	19,90
	26,3	22,8	22,4	23,7	22,18		

II-1	23,41	25,46	26,46	26,3	27,46	23,98	22,13
	24,38	20,91	22,65	20,96	21,81		
II-2	31,2	31,3	29,88	31,69	31,19	27,25	25,40
	23,51	22,67	21,77	25,11	24,13		
III-1	27,06	27,95	31,99	30,06	31,46	29,69	27,84
	26,96	27,95	31,99	30,06	31,46		
III-2	24,95	27,71	27,23	24,8	26,19	25,70	23,85
	25,22	24,97	25,44	27,13	23,35		
IV-1	14,72	19,89	26,68	25,37	25	21,21	19,32
	22,6	21,47	19,23	20,18	16,98		
V-1	27,83	22,3	24	23	21,98	24,63	22,74
	25,44	24,57	25,33	25,39	26,44		
VI-3	27,68	28,9	24,7	27,66	25,87	26,18	24,29
	23,29	23,49	28,8	24,53	26,87		
VI-4	21,29	23,64	24,5	24,82	24,5	23,86	21,97
	21,9	23	25,26	25	24,72		
VI-5	19,78	21	26,39	20,36	20,87	21,26	19,37
	21,78	22,78	20,5	20,04	19,11		
VII-1	25,34	29,97	31,22	29,55	31,94	28,56	26,67
	30,9	29,51	27,69	26	23,47		
VII-2	34,79	38,4	38,98	33	28,71	35,70	33,85
	40,49	43,57	32,73	28,92	37,4		
VIII-1	23,18	16,19	17	14,56	15,57	17,19	15,72
	15,4	17,3	12,67	19,64	20,42		
VIII-2	16,46	15,68	16,32	16,64	14,02	15,78	14,31
	14,66	16,42	15,02	16,28	16,33		
IX-1	28,48	33,27	25,54	26,38	24,66	27,56	25,67
	25,91	28,61	27,27	27,64	27,85		
IX-2	39,24	41,14	39,01	41,78	40,34	40,01	38,12
	39,56	39,47	40,96	40,14	38,42		
IX-3	27,88	34,27	34,75	27,82	29,52	29,58	27,73
	30,2	29,98	29,29	25,32	26,74		
IX-4	34,07	34,13	34,68	34,43	35,48	34,63	32,78
	36,36	34,65	34,62	34,14	33,69		
X-1	35,77	34,7	32,39	35,65	32,75	33,96	32,07
	34,22	32,45	32,9	34,82	33,98		
XI-1	18,3	18,03	22,98	19,68	19,74	21,05	19,16
	21,38	23,98	21,94	23,68	20,74		
XII-1	36,98	38,36	40,36	40,13	39,8	34,10	32,21
	38,53	20,28	24,19	28,4	34		
XIII-1	14,77	13,49	14,84	12,23	13,3	14,21	12,74
	14,43	13,92	14,05	14,12	16,92		
XIII-2	19,32	19,3	20,44	19,01	18,88	19,08	17,61
	18,72	17,55	19,71	18,94	18,92		
XIII-3	16,16	16,56	21	16,3	15,12	17,42	15,95
	20,77	16,01	15,77	16,18	20,3		
	16,32	15,05	14,48	13,88	15,56		

XIV-2	13,5	14,79	16,13	14,35	14,33	14,84	13,10
XIV-3	24,83	27,25	27,46	27,26	26,44	26,23	24,49
	29,54	24,39	25,22	23,99	25,95		
XIV-4	21,78	26,01	24,64	28,46	20,66	23,67	21,95
	22,74	23,31	23,43	21,75	23,89		
XIV-5	26,87	27,44	32,01	25,41	26,41	27,33	25,59
	24,43	30,02	27,45	26,45	26,85		
XIV-7	20,48	20,05	21,24	20,4	20,04	20,64	18,90
	20,72	19,75	22,53	20,94	20,21		
XIV-8	33,72	31,8	33,02	28,05	29,52	31,42	29,68
	32,4	33,52	30,71	31,81	29,68		
XV-2	34,02	34,54	27,2	25,76	21,51	27,79	25,90
	27,66	24,57	28,55	27,24	26,8		
XV-4	29,9	30,68	27,34	35	35,18	31,29	29,40
	32,53	35,53	29,05	28,64	29,04		
XV-5	29,38	32,93	26,49	28,31	25,01	28,52	26,63
	29,72	30,49	29,67	26,78	26,39		
XV-6	19,21	19,18	21,24	22,69	23,42	22,32	20,67
	23,31	21,44	26,95	24,95	22,81		
XVI-1	30,16	31,69	26,26	25,93	25,68	27,88	25,99
	26,28	27,93	26,5	29,25	29,14		
XVI-2	33,87	32,27	30,89	30,54	29,07	31,74	29,85
	29,07	34,7	35,79	29,7	31,54		
XVI-3	25,46	21,28	22,86	23,27	22,77	26,47	24,58
	37,48	29,12	30,53	30,98	20,95		
XVI-4	30,45	28,55	32,43	27,65	32,75	29,52	27,33
	21,51	32,51	30,32	30,84	25,15		
XVI-5	33,18	32,68	31,82	30,96	32,28	28,70	26,81
	24,72	27,99	21,96	24,87	26,5		
XVI-6	22,02	25,42	25,47	30,43	26,35	24,83	22,94
	27,98	23,53	22,27	21,87	22,96		
XVI-7	36,26	38,36	28,04	29,93	26,62	30,69	28,28
	25,23	28,96	34,35	32,19	26,94		
XVI-8	26,19	27,4	30,25	24,26	25,12	26,87	24,98
	24,28	26,69	29,21	30,5	24,79		
XVII-1	21,28	24,13	23,19	23,5	25,95	23,46	21,57
	24,36	23,27	22,48	22,28	24,18		
XVII-2	23,96	23,14	22,31	22	24,31	23,13	21,24
	24,2	24,5	21,42	22,39	23,03		
XVII-3	21,33	22,36	23,02	24,52	23,7	23,40	21,51
	22,49	23,21	23,36	24,18	25,87		
XVII-4	26,46	24,79	25,84	27,84	25,98	27,20	25,31
	28,22	28,67	28,92	28,75	26,51		
XVIII-1	24,53	25,7	23,12	23,71	22,44	24,09	22,35
	23,54	24,98	23,66	24,97	24,21		
XVIII-2	25,46	24,98	25,42	23,71	24,91	24,43	22,69
	25,05	23,16	24,53	23,48	23,64		

XVIII-3	24,34	26,13	25,83	26,35	23,94	25,22	23,48
	25,84	28,65	21,42	27,19	22,52		
XVIII-4	24,97	24,64	27,97	24,77	26,29	25,01	23,27
	23,05	28,36	25,88	24,4	19,8		
XVIII-5	23,23	23,24	21,92	22,84	25,45	23,93	22,19
	23,74	25,73	24,39	22,82	25,96		
XVIII-6	24,48	24,83	25,53	25,77	23,96	23,68	21,94
	22,42	19,39	22,7	25,43	22,3		
XIX-1	24,25	22,67	23,41	20,85	18,5	23,18	21,33
	24,16	25,67	23,72	25,07	23,49		
XX-1	27,96	25,07	27,4	27,48	25,65	25,09	23,20
	24,86	20,02	21,5	21,68	29,27		
XX-2	30,28	30,92	29,01	24,28	30,02	26,14	24,25
	24,56	22,36	23,44	21,85	24,66		
XX-3	23,69	19,82	26	26,46	27,18	24,22	22,33
	27,48	22,7	22,85	22,8	23,18		
XX-4	25,57	24,46	25,59	21,07	24,61	24,32	22,43
	23,97	25,26	23,16	25,86	23,68		
XXI-1	27,29	27,34	25,85	26,76	24,33	25,70	23,81
	22,24	24,4	26,99	27,78	23,97		
XXI-2	27,37	27,37	27,98	26,33	29,68	29,86	28,01
	31,94	29,3	31,37	33,64	33,64		
XXI-3	36,7	24	32,69	30,53	33,68	18,76	16,87
	14,5	25,9	18,23	18,66	17,95		
XXI-4	35,31	31,16	25,49	23,48	30,93	27,79	25,94
	26,46	23,85	27,15	27,15	26,89		
XXII-1	24,32	22,63	25	19,92	21,91	22,83	20,94
	19,36	25,39	23,37	23,2	23,17		
XXIII-1	21,52	26,93	24,38	25,57	28,02	28,02	26,13
	33,89	31,42	33,8	30,27	24,35		
XXIV-1	28,7	28,79	24,73	23,22	30,97	25,81	23,92
	23,29	25,13	25,63	23,4	24,25		
XXIV-2	28,93	25,92	23,66	25,76	29,27	27,40	25,51
	28,7	31,23	25,23	27,32	27,93		
XXV-1	27,9	31,19	26,83	23,47	27,66	27,49	25,60
	30,88	27,82	27,75	25,24	26,2		
XXV-2	34,46	35,68	35,25	32,74	34,4	34,66	32,81
	33,46	35,62	35,68	34,88	34,46		
XXVI-1	30,67	25,45	29,96	23,14	17,87	25,54	23,65
	19,26	24,34	20,05	26,86	31,2		

5.5. Badania ultradźwiękowe – fala poprzeczna

W dalszej kolejności pozyskane elementy drewniane (zob. rys. 59÷61) poddano badaniom urządzeniem ultradźwiękowym UK 1401 SURFER. Opis

urządzenia oraz zasady jego działania zamieszczono w punkcie 4.3. Elementy badano w podobnych miejscach jak w badaniach młotkiem do drewna, na dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach belek. Przykładową fotografię urządzenia podczas badań pokazano na rys. 73. Wyniki badań zamieszczono w tablicy 20.



Rys. 73. Badanie belki urządzeniem UK 1401 SURFER

Tablica. 20. Wyniki badań urządzeniem UK 1401 SURFER

Nr elementu	Prędkość fali, m/s					Średnia prędkość, m/s
	5560	5830	4910	5850	5760	
I-1	5540	5840	5560	5820	4900	5557
	5250	5470	5520	5770	5470	
I-2	5590	5280	5520	4750	4900	5352
	6210	6240	6350	6210	6010	
II-1	6260	6040	6230	5920	5960	6143

II-2	5770	6150	6140	4340	5500	5686
	5770	5960	5730	5980	5520	
III-1	5020	5060	5110	5230	5040	5149
	5050	5140	5340	5450	5050	
III-2	5660	5680	5730	5670	5680	5693
	5720	5720	5580	5740	5750	
IV-1	4770	5180	5010	5590	5250	4982
	4910	4880	4720	4740	4770	
V-1	4660	4690	4580	4690	5180	4916
	5010	4940	5300	5020	5090	
VI-3	5480	5240	5270	4220	5480	5185
	4820	5190	5310	5500	5340	
VI-4	5500	5150	5210	5090	5340	5340
	5510	5620	5520	5160	5300	
VI-5	5560	5490	5640	5850	5400	5480
	5530	5340	5390	5120	5480	
VII-1	5160	5240	5360	4980	5380	5247
	5080	5250	5310	5270	5440	
VII-2	3990	4440	4080	3470	4120	3782
	3470	3200	3630	3440	3980	
VIII-1	3730	4250	3860	4500	4580	4303
	4530	4230	4230	4550	4570	
VIII-2	4560	4620	4520	4700	4610	4593
	4550	4590	4610	4550	4620	
IX-1	4870	5940	5250	4430	5170	4892
	4770	4580	5030	4320	4560	
IX-2	1040	1040	1110	1040	1080	1046
	980	1080	990	980	1120	
IX-3	4700	5610	5790	5640	4760	4971
	4430	5370	4510	4680	4220	
IX-4	1040	960	970	1100	1120	1041
	990	1040	1060	1070	1060	
X-1	970	1930	1950	1920	980	1540
	1340	2060	2240	1010	1000	
XI-1	3890	3680	3980	4021	3980	3920
	4010	3890	3790	3940	4020	
XII-1	1100	1030	1080	1060	1050	1054
	1140	1050	980	950	1100	
XIII-1	4970	4390	6210	6040	6230	5750
	5920	5960	5650	6190	5940	
XIII-2	3980	3520	3580	3320	3160	3379
	3800	3810	3010	2980	2630	
XIII-3	4630	3640	4250	3820	4100	4520
	4710	5020	4920	5140	4970	
XIV-2	6090	5930	6260	5700	5710	6026
	5920	5970	6280	6160	6240	
	5310	5270	5440	4060	4210	

XIV-3	3440	3550	4210	4990	5440	4592
XIV-4	5630	5440	4980	3860	3980	4920
	5770	4540	4260	5460	5280	
XIV-5	5890	5590	5580	5260	6240	5632
	5700	5240	5760	5210	5850	
XIV-7	5440	5590	6410	6180	5960	5853
	5960	5960	5970	5720	5340	
XIV-8	5770	5580	5860	6150	5850	5761
	5740	5850	6150	4900	5760	
XV-2	4810	4790	4580	5190	4680	4996
	5320	5340	5330	5120	4800	
XV-4	4290	4300	4490	4790	4580	4743
	5250	5140	4900	4850	4840	
XV-5	5260	5390	5090	5060	4960	5040
	6010	3790	4740	5170	4930	
XV-6	5510	5440	4460	5270	5140	4871
	4710	4510	4570	4660	4440	
XVI-1	5220	5950	4640	4550	3690	4267
	3760	3440	4450	3650	3320	
XVI-2	3540	3420	3410	3570	3320	3468
	3640	3160	3950	3240	3430	
XVI-3	3800	3610	3270	3560	3520	3461
	3320	3560	3470	3180	3320	
XVI-4	4380	4600	4740	4500	4230	4379
	4480	4510	3980	4020	4350	
XVI-5	4810	4830	5450	4670	5180	5191
	5510	5470	5200	5480	5310	
XVI-6	4500	4940	4980	5250	5200	4925
	4380	4840	4350	5200	5610	
XVI-7	4720	5000	5560	5190	5300	4936
	5030	4310	4820	4390	5040	
XVI-8	4630	5200	4970	5390	5350	5043
	4660	4980	4780	5150	5320	
XVII-1	5370	5300	4650	5250	4760	5139
	4980	5130	5250	5510	5190	
XVII-2	5810	5970	5710	5990	5730	5698
	5130	5930	5740	5770	5200	
XVII-3	5950	5450	6220	6180	6020	6006
	6050	6020	6150	5980	6040	
XVII-4	5530	5200	5780	5490	5500	5189
	4930	4750	5190	4950	4570	
XVIII-1	5810	5720	6180	5860	5940	5885
	6020	5840	5950	6010	5520	
XVIII-2	6220	6160	5710	6100	5460	6037
	6100	6260	6180	6230	5950	
XVIII-3	5620	5740	5950	5870	5910	5849
	5420	6120	6010	5910	5940	

XVIII-4	5470	5550	5310	5780	5110	5627
	6220	5800	5700	5690	5640	
XVIII-5	5960	5650	5930	6070	6050	5858
	5800	5800	5520	5800	6000	
XVIII-6	5220	5780	5960	5720	6010	5730
	5870	5340	5910	5480	6010	
XIX-1	5120	5120	5030	4900	4880	5145
	4770	5460	6020	4860	5290	
XX-1	5200	4280	5330	5160	5250	4917
	5010	5480	4800	4000	4660	
XX-2	5050	4940	5100	5030	5010	4917
	5130	4950	4570	4790	4600	
XX-3	4940	4510	5140	4140	5020	4832
	5040	4630	5120	4880	4900	
XX-4	4520	5110	5890	4820	4750	4935
	4650	4780	4820	4900	5110	
XXI-1	5160	4960	5030	5190	5170	5099
	5370	4740	4570	5460	5340	
XXI-2	4430	3930	4730	3930	4060	4394
	4580	4760	4390	4990	4140	
XXI-3	4680	4320	4270	4330	5030	4794
	5130	5110	5140	5120	4810	
XXI-4	5530	4330	4840	5370	5240	5170
	5310	5070	5610	5120	5280	
XXII-1	6240	6040	5870	6050	6160	6051
	5990	5500	6980	5950	5730	
XXIII-1	5090	5420	5310	5510	5650	5353
	4710	5380	5650	5610	5200	
XXIV-1	5350	5300	4690	5520	5230	5212
	5000	4780	5640	5420	5190	
XXIV-2	4130	5690	5080	4340	4190	4736
	4510	5340	4800	4670	4610	
XXV-1	4980	5570	5520	5790	5640	5467
	4940	5290	5350	5900	5690	
XXV-2	2540	2770	2830	2690	2920	2809
	2700	3070	2660	3000	2910	
XXVI-1	5580	5410	5480	5410	5440	5388
	5420	5060	5350	5500	5230	

5.6. Badania ultradźwiękowe – fala podłużna

W dalszej kolejności pozyskane elementy drewniane (zob. rys. 59÷61) poddano badaniom urządzeniem ultradźwiękowym UK 1410 PULSAR. Opis urządzenia oraz zasady jego działania zamieszczono w punkcie 4.3. Elementy

badano w podobnych miejscach jak w badaniach młotkiem do drewna, na dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach belek. Przykładową fotografię urządzenia podczas badań pokazano na rys. 74. Wyniki badań zamieszczono w tablicy 21.



Rys. 74. Badanie belki urządzeniem UK 1410 PULSAR

Tablica. 21. Wyniki badań urządzeniem UK 1410 PULSAR

Nr elementu	Prędkość fali, m/s					Średnia prędkość, m/s
I-1	1960	1870	1460	1480	1270	1683
	1530	1510	1860	2020	1870	
I-2	1960	1770	1820	1940	1460	1765
	1480	1180	2120	2040	1880	
II-1	1790	1780	1790	1820	1850	1806
	2060	1720	1740	1780	1730	
II-2	1690	1660	1970	1220	1400	1616
	1850	1770	1490	1540	1570	

III-1	2070	2100	2050	2130	2080	2098
	2160	2120	2160	2080	2030	
III-2	1510	1680	1710	1590	1650	1611
	1680	1620	1640	1710	1320	
IV-1	1510	1860	1660	1710	1740	1752
	1840	1570	1700	2000	1930	
V-1	1810	2180	1790	1950	1630	1652
	1300	1250	1490	1630	1490	
VI-3	1980	1500	1960	1960	1820	1709
	1500	1530	1510	1720	1610	
VI-4	1580	1530	1550	1540	1550	1575
	1570	1660	1550	1670	1550	
VI-5	1670	1690	1740	1700	1830	1690
	1680	1570	1630	1680	1710	
VII-1	1650	1540	1610	1630	1620	1595
	1500	1510	1520	1670	1700	
VII-2	850	940	840	980	920	919
	960	870	960	930	940	
VIII-1	2100	1930	2010	1710	1990	2065
	2130	2020	2270	2280	2210	
VIII-2	2110	2100	2060	2100	2050	
	2150	2040	2160	2040	2070	2088
IX-1	1450	1430	1030	1220	1240	1310
	1210	1560	1370	1300	1290	
IX-2	450	390	370	330	350	396
	370	390	460	470	380	
IX-3	2050	1890	1890	2090	1800	1817
	1650	1720	1910	1480	1690	
IX-4	450	560	470	610	530	509
	490	520	510	480	470	
X-1	610	660	620	590	680	599
	540	500	570	600	620	
XI-1	1790	1780	1740	1750	1710	1803
	1880	1900	1800	1790	1890	
XII-1	740	470	350	280	450	448
	360	470	250	730	380	
XIII-1	2680	2090	2180	2260	2230	2301
	2250	2230	2480	2340	2270	
XIII-2	1140	1190	1320	1140	1070	1142
	1110	1070	1150	1170	1060	
XIII-3	1460	1640	1540	1490	1640	1503
	1470	1500	1380	1400	1510	
XIV-2	2120	2010	2120	2110	2050	2087
	2010	2090	2050	2160	2150	
XIV-3	1730	1790	1690	1710	1700	1683
	1750	1780	1520	1520	1640	
	1260	1660	1610	1560	1660	

XIV-4	1840	1860	1840	1790	1840	1692
XIV-5	1820	1820	1790	1770	1420	1780
	2090	1880	1740	1840	1630	
XIV-7	1510	1560	1520	1390	1470	1461
	1440	1480	1530	1380	1330	
XIV-8	1590	1500	1520	1560	1330	1405
	1290	1350	1260	1320	1330	
XV-2	1480	1570	1800	1790	1970	1824
	1940	1980	1880	1900	1930	
XV-4	1280	1440	1630	1590	1560	1471
	1680	1570	1310	1450	1200	
XV-5	1520	1410	1540	1270	1510	1476
	1590	1660	1340	1600	1320	
XV-6	1510	1420	1990	1870	1840	1719
	1160	1580	1860	1920	2040	
XVI-1	1210	1190	1130	1070	1290	1210
	1180	1170	1160	1410	1290	
XVI-2	280	460	560	820	690	679
	680	870	860	780	790	
XVI-3	1210	1140	1310	1050	1220	1197
	1060	1150	1230	1480	1120	
XVI-4	1250	1290	1140	1050	1230	1245
	1190	1320	1350	1240	1390	
XVI-5	540	630	1080	690	470	762
	320	1190	1500	720	480	
XVI-6	1370	1230	1250	1090	1420	1230
	1320	1100	1130	1130	1260	
XVI-7	900	940	800	900	990	913
	920	910	950	950	870	
XVI-8	1320	1290	1520	1490	610	1226
	1230	1340	1470	1340	650	
XVII-1	1620	1950	1880	1830	1830	1861
	1790	1840	2070	1930	1870	
XVII-2	1880	1780	1820	1970	1830	1843
	1790	1860	1850	1860	1790	
XVII-3	1980	1900	1860	1820	1870	1905
	1840	1990	1890	1940	1960	
XVII-4	1640	1690	1520	1540	720	1499
	1730	1000	1900	1600	1650	
XVIII-1	1570	1520	1660	1880	1300	1682
	1800	1710	1700	1890	1790	
XVIII-2	1590	1500	1550	1590	1710	1543
	1290	1590	1610	1490	1510	
XVIII-3	1570	1310	1220	1490	1520	1682
	2000	2010	2040	1950	1710	
XVIII-4	1350	1290	1440	1440	1440	1570
	1590	1530	1830	1830	1960	

XVIII-5	1440	1420	1470	1440	1510	1537
	1580	1660	1690	1510	1650	
XVIII-6	1450	1410	1470	1310	1390	1477
	1630	1390	1590	1550	1580	
XIX-1	1680	1810	2010	1650	1900	1841
	1790	1800	1960	1740	2070	
XX-1	780	700	420	1410	1500	1281
	1490	1580	1770	1340	1820	
XX-2	2000	1890	1820	1870	1730	1656
	860	1600	1650	1630	1510	
XX-3	1570	1760	1620	1660	1680	1775
	1730	2110	1890	1880	1850	
XX-4	1640	1780	1750	1690	1800	1761
	1750	1590	1900	1850	1860	
XXI-1	1920	1270	1800	1590	1670	1628
	1530	1550	1750	1560	1640	
XXI-2	1480	1340	1490	1330	1370	1377
	1470	1450	1380	1120	1340	
XXI-3	2060	370	1870	660	1330	1386
	1240	1540	1230	1690	1870	
XXI-4	1760	1780	2090	2090	2160	1710
	1960	240	1600	1700	1720	
XXII-1	1720	1730	1720	1880	1820	1738
	1780	1630	1710	1650	1740	
XXIII-1	1500	1550	1420	1410	1330	1613
	1700	1670	1690	2080	1780	
XXIV-1	1910	1960	2060	2000	1860	1897
	2120	1960	1470	1720	1910	
XXIV-2	1850	1920	1930	1910	1740	1902
	1560	1880	2070	2060	2100	
XXV-1	1640	1840	2050	1980	1630	1773
	1590	1640	1810	1700	1850	
XXV-2	660	680	780	690	660	691
	800	670	640	670	660	
XXVI-1	1330	1450	1520	1750	1440	1618
	1790	1800	1790	1680	1630	

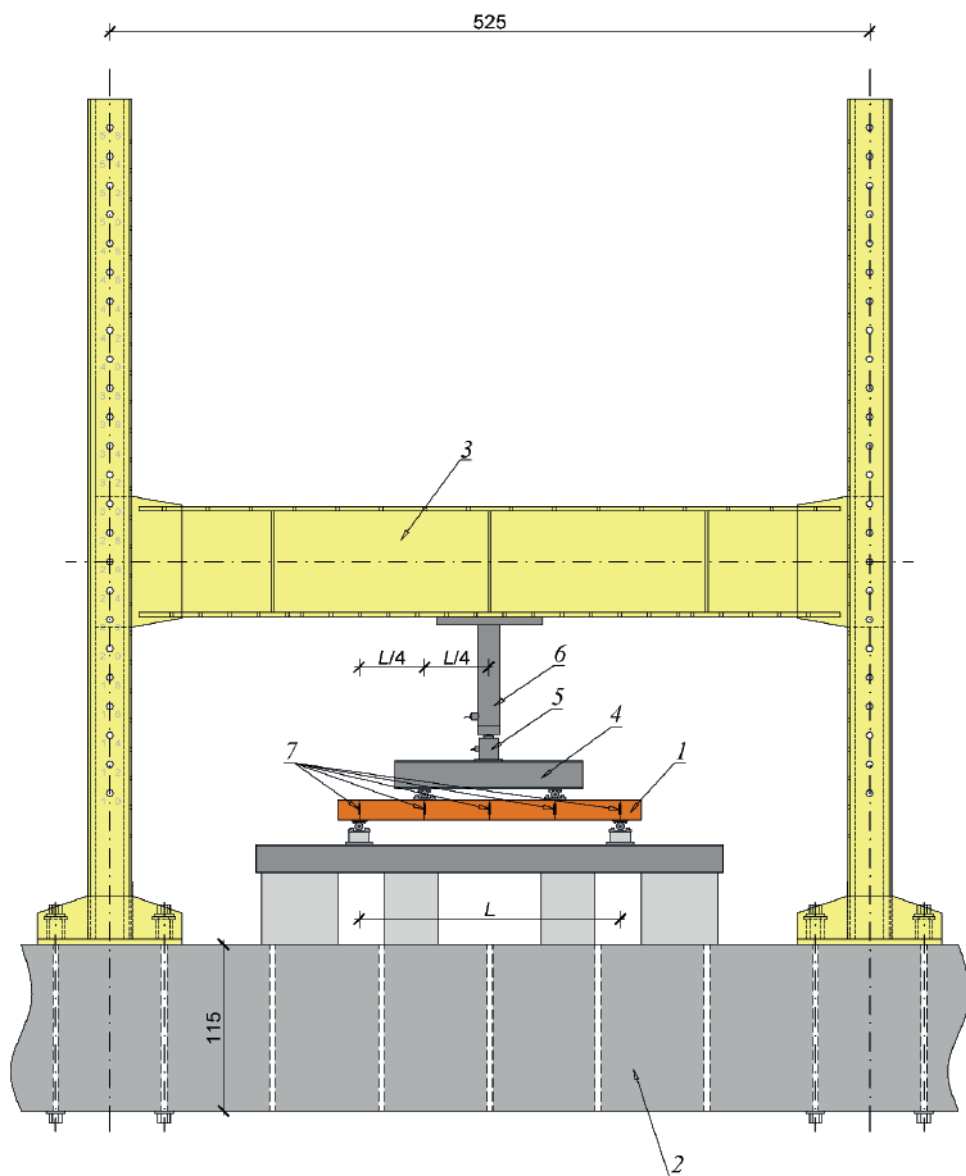
6. NISZCZĄCE BADANIA WŁASNE

6.1. Stanowisko badawcze i technika badań

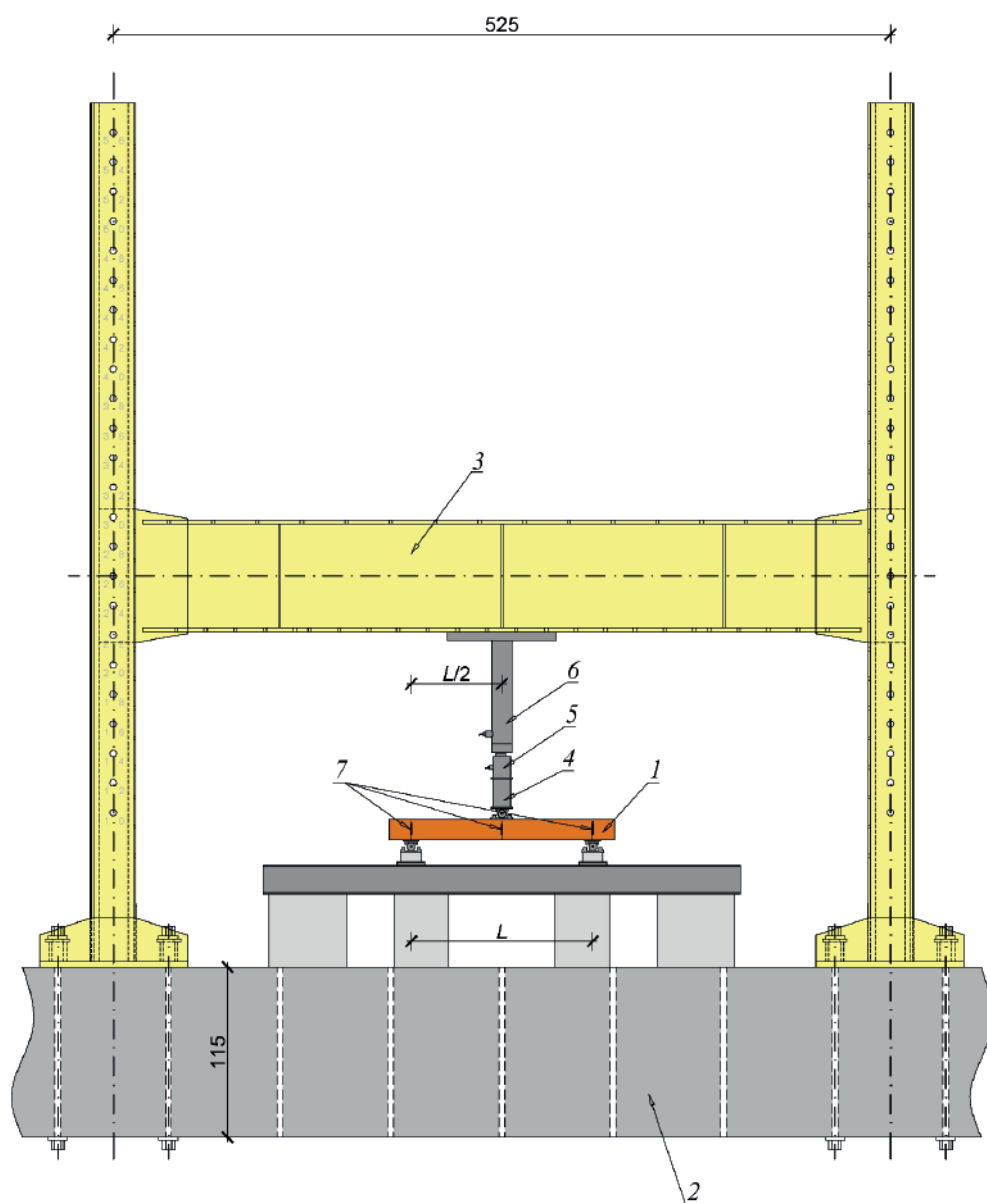
Po przeprowadzeniu badań nieniszczących pozyskane belki poddano badaniom niszczącym. Belki badano na zginanie, ponieważ celem pracy było określenie wytrzymałości drewna zabytkowego, a przez to jego klasy. Klasa drewna zależy od charakterystycznej wytrzymałości drewna na zginanie, a cyfra w opisie klasy (np. klasa C27) oznacza właśnie tę wytrzymałość. Podczas badań starano się spełniać wszystkie wymagania norm PN-EN 380 [N17], PN-EN 384 [N22] i PN-EN 408 [N18]. Pomimo wyraźnych zaleceń norm (zob. pkt. 2.2.2), aby badania prowadzić w schemacie czteropunktowego zginania, w przypadku belek o rozpiętości równej lub krótszej niż 1,4 m zdecydowano się badania prowadzić w schemacie trójpunktowego zginania. Obawiano się, że przy czteropunktowym zginaniu w krótkich belkach może dojść do zniszczenia z uwagi na ścinanie (obciążenie byłoby blisko podpory), a nie z uwagi na zginanie. Belek badanych w schemacie trójpunktowego zginania było jednak zdecydowanie mniej (15 szt. na 69 badanych belek, czyli niecałe 22%).

Badania prowadzono w jednym cyklu, aż do zniszczenia belki. Obciążenie wywołymano siłownikiem o zakresie 196 kN, przymocowanym do stalowej ramy o nośności 1000 kN, zakotwionej w stropie laboratorium (tzw. płyta wielkich sił o grubości 1,15 m). Podczas badań prowadzono pomiar siły siłomierzem o zakresie 200 kN, pomiar przemieszczeń transformatorowymi czujnikami przemieszczeń liniowych (LVDT - ang. *linear variable differential transformer*) w 5 lub w 3 punktach (przy czteropunktowym zginaniu w linii podpór skrajnych oraz co $\frac{1}{4}$ rozpiętości belki, a przy trójpunktowym zginaniu co $\frac{1}{2}$ rozpiętości belki) oraz bezdotykowy pomiar optyczny na powierzchni bocznej badanego elementu przy użyciu systemu Aramis. Na rys. 75 i 76

pokazano schemat badania w przypadku czteropunktowego i trójpunktowego zginania.

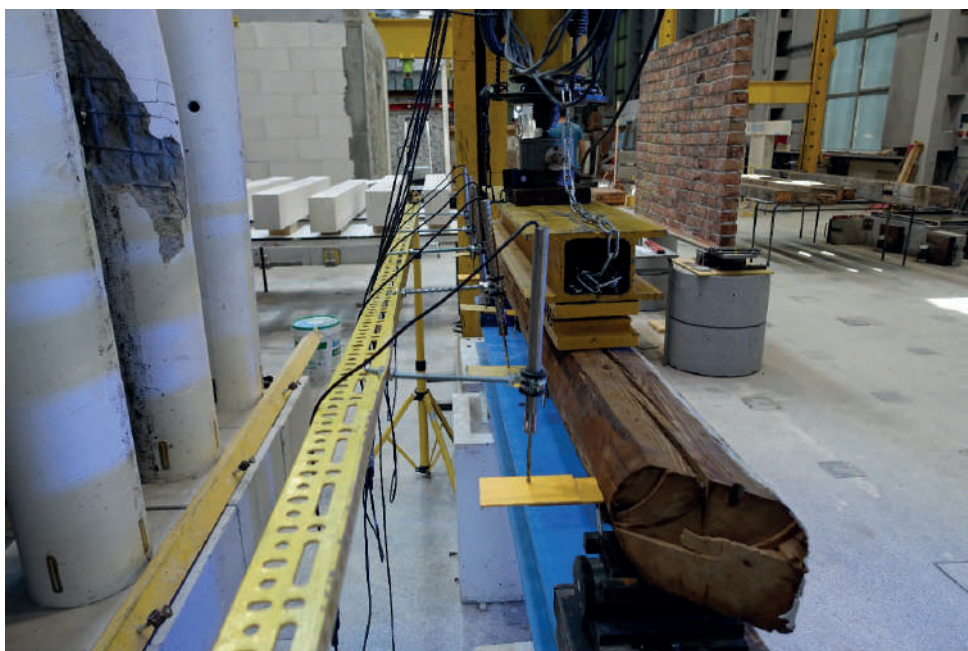


Rys. 75. Schemat badania przy czteropunktowym zginaniu: 1 – belka drewniana, 2 – strop laboratorium (płyta wielkich sił). 3 – stalowa rama, 4 – belka trawersowa, 5 – siłomierz, 6 – siłownik, 7 - transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych (LVDT)

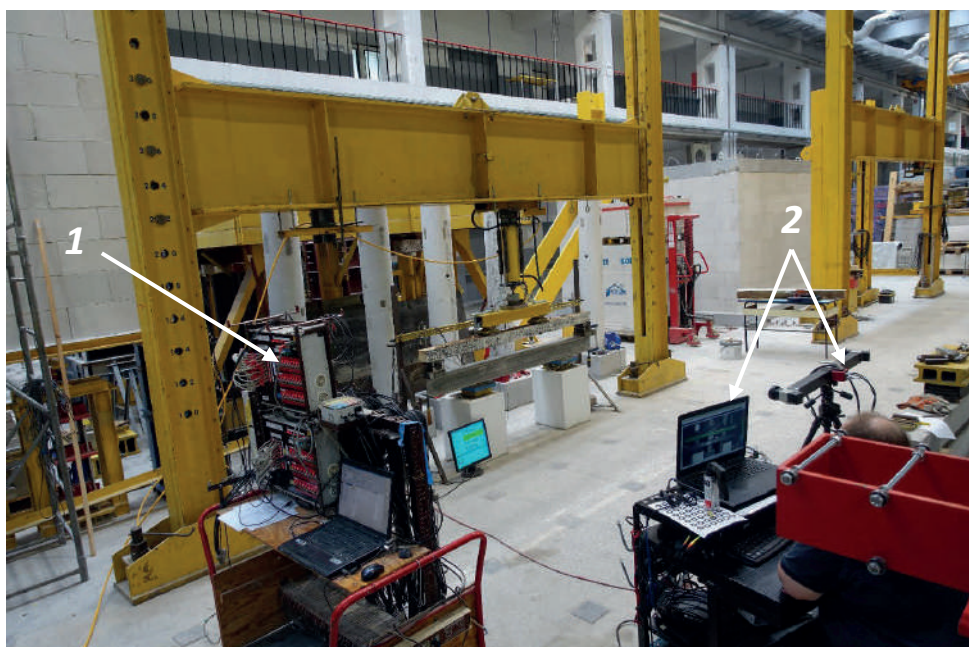


Rys. 76. Schemat badania przy trójpunktowym zginaniu: 1 – belka drewniana, 2 – strop laboratorium (płyta wielkich sił). 3 – stalowa rama, 4 – słupek, 5 – siłomierz, 6 – siłownik, 7 - transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych (LVDT)

Transformatorowe czujniki przemieszczeń liniowych (LVDT) mocowano do niezależnej stalowej ramki opartej na stojakach na stropie Laboratorium. Przeszacowania w analizowanych punktach mierzono przy pomocy wsporniczków mocowanych na wkręty w dolnej części badanej belki (rys. 77). Wielość obciążenia oraz przeszacowania z czujników LVDT rejestrowano na automatycznym stanowisku pomiarowym. Na rys. 78 pokazano system optyczny Aramis i automatyczne stanowisko pomiarowe. Zastosowanie bezdotykowego systemu pomiarowego Aramis wymagało pomalowania bocznej płaszczyzny badanej belki na biało, a następnie naniesienia na niej szczotką nieregularnego czarnego wzoru.



Rys. 77. Czujniki LVDT na niezależnej stalowej ramie



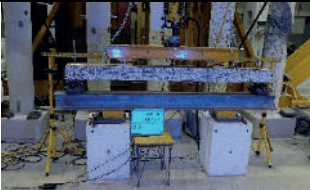
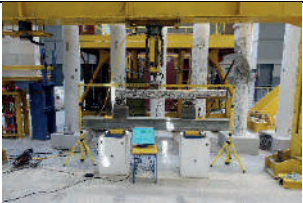
Rys. 78. Stanowisko badawcze: 1 – automatyczne stanowisko pomiarowe,
2 – bezdotykowy system pomiarowy Aramis

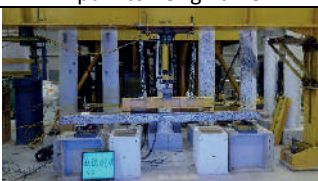
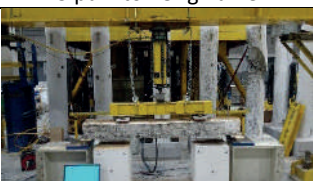
W tablicy 22 zamieszczono fotografie elementów podczas badania oraz ich podstawowe dane geometryczne.

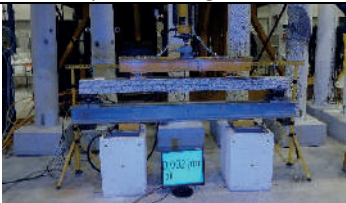
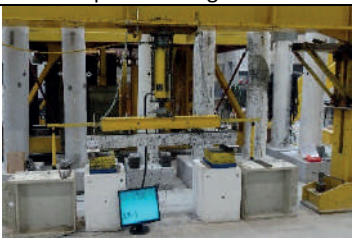
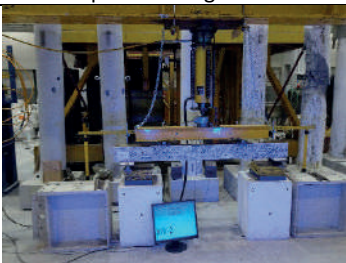
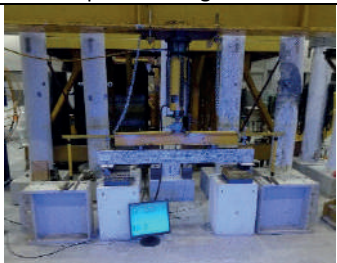
Tablica. 22. Parametry badanych elementów

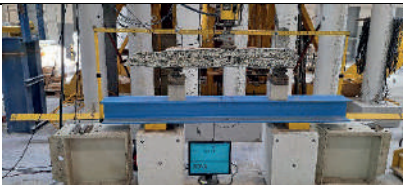
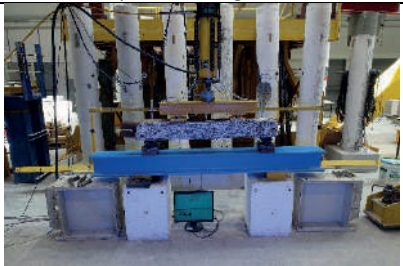
Nr elementu	Schemat statyczny	Wysokość przekroju, m	Szerokość przekroju, m	Rozstaw podpór skrajnych L , m
I-1	 4 punktowe zginanie	0,094	0,105	2,2

I-2		0,115	0,115	1,265
	3 punktowe zginanie			
II-1		0,12	0,12	1,39
	3 punktowe zginanie			
II-2		0,13	0,13	1,48
	4 punktowe zginanie			
III-1		0,15	0,13	1,35
	3 punktowe zginanie			
III-2		0,09	0,16	1,37
	3 punktowe zginanie			
IV-1		0,165	0,15	1,54
	4 punktowe zginanie			

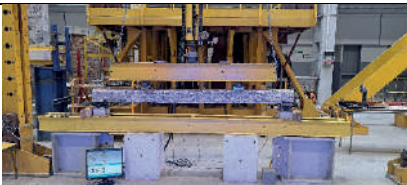
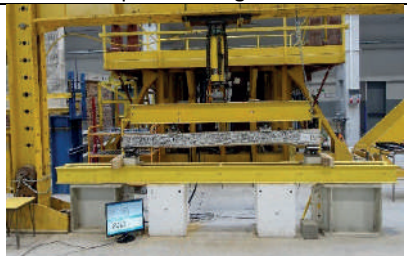
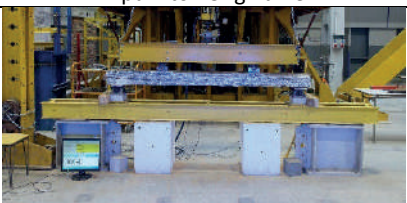
V-1	 4 punktowe zginanie	0,093	0,093	2,05
VI-3	 3 punktowe zginanie	0,115	0,135	1,03
VI-4	 4 punktowe zginanie	0,12	0,13	20,7
VI-5	 4 punktowe zginanie	0,13	0,135	1,84
VII-1	 4 punktowe zginanie	0,138	0,135	1,44
VII-2	 3 punktowe zginanie	0,135	0,11	1,01
VIII-1	 4 punktowe zginanie	0,15	0,12	1,4

VIII-2	 3 punktowe zginanie	0,135	0,063	1,05
IX-1	 4 punktowe zginanie	0,105	0,105	1,7
IX-2	 4 punktowe zginanie	0,13	0,155	1,36
IX-3	 4 punktowe zginanie	0,125	0,145	2,34
IX-4	 3 punktowe zginanie	0,17	0,165	0,81
X-1	 4 punktowe zginanie	0,2	0,25	1,82

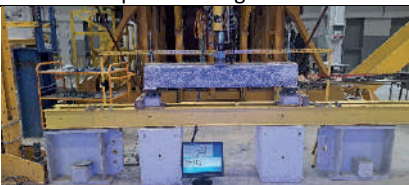
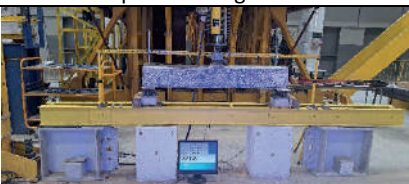
XI-1		0,19	0,22	1,82
	4 punktowe zginanie			
XII-1		0,12	0,14	1,82
	4 punktowe zginanie			
XIII-1		0,13	0,07	1,46
	4 punktowe zginanie			
XIII-2		0,14	0,07	1,46
	4 punktowe zginanie			
XIII-3		0,145	0,075	1,46
	4 punktowe zginanie			
XIV-2		0,12	0,13	1,52
	4 punktowe zginanie			

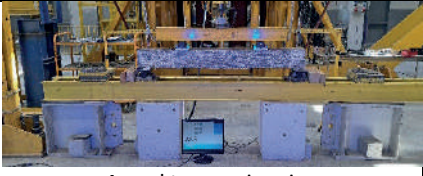
XIV-3	 3 punktowe zginanie	0,17	0,13	0,92
XIV-4	 4 punktowe zginanie	0,17	0,135	1,12
XIV-5	 4 punktowe zginanie	0,11	0,122	1,485
XIV-7	 4 punktowe zginanie	0,097	0,105	1,12
XIV-8	 4 punktowe zginanie	0,107	0,093	1,12

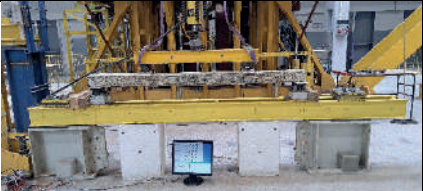
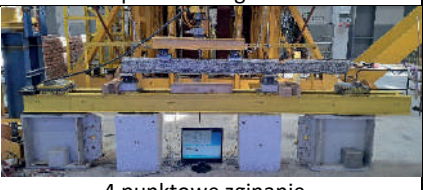
XV-2	 4 punktowe zginanie	0,15	0,11	1,67
XV-4	 4 punktowe zginanie	0,185	0,155	2,01
XV-5	 4 punktowe zginanie	0,155	0,195	1,92
XV-6	 4 punktowe zginanie	0,185	0,155	3,0
XVI-1	 4 punktowe zginanie	0,16	0,17	2,6

XVI-2	 4 punktowe zginanie	0,16	0,16	2,3
XVI-3	 4 punktowe zginanie	0,18	0,175	2,06
XVI-4	 4 punktowe zginanie	0,16	0,17	2,06
XVI-5	 4 punktowe zginanie	0,15	0,15	2,4
XVI-6	 4 punktowe zginanie	0,16	0,15	2,06
XVI-7	 4 punktowe zginanie	0,16	0,155	2,06

XVI-8	 4 punktowe zginanie	0,16	0,165	2,4
XVII-1	 4 punktowe zginanie	0,15	0,14	2,06
XVII-2	 4 punktowe zginanie	0,16	0,15	2,06
XVII-3	 4 punktowe zginanie	0,16	0,16	1,36
XVII-4	 4 punktowe zginanie	0,15	0,15	1,36
XVIII-1	 3 punktowe zginanie	0,215	0,127	1,66

XVIII-2	 3 punktowe zginanie	0,205	0,105	1,66
XVIII-3	 3 punktowe zginanie	0,219	0,12	1,3
XVIII-4	 3 punktowe zginanie	0,211	0,115	1,3
XVIII-5	 3 punktowe zginanie	0,22	0,13	1,4
XVIII-6	 3 punktowe zginanie	0,21	0,116	1,4
XIX-1	 4 punktowe zginanie	0,17	0,15	2,0
XX-1	 4 punktowe zginanie	0,15	0,14	1,85

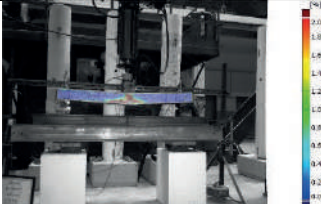
XX-2	 4 punktowe zginanie	0,15	0,18	1,49
XX-3	 4 punktowe zginanie	0,14	0,18	1,49
XX-4	 4 punktowe zginanie	0,14	0,15	1,97
XXI-1	 4 punktowe zginanie	0,19	0,165	2,0
XXI-2	 4 punktowe zginanie	0,16	0,145	2,0
XXI-3	 4 punktowe zginanie	0,13	0,16	2,0
XXI-4	 4 punktowe zginanie	0,175	0,15	1,85

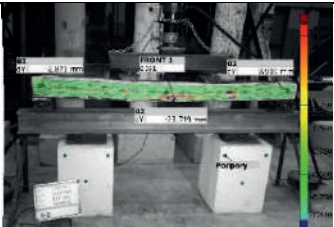
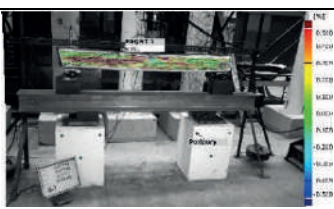
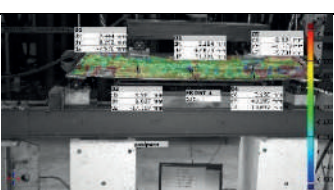
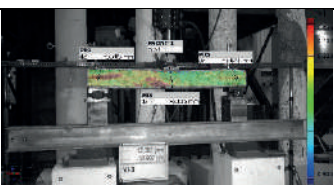
XXII-1	 4 punktowe zginanie	0,12	0,12	1,35
XXIII-1	 4 punktowe zginanie	0,11	0,14	2,05
XXIV-1	 4 punktowe zginanie	0,11	0,14	2,05
XXIV-2	 4 punktowe zginanie	0,115	0,135	2,05
XXV-1	 4 punktowe zginanie	0,12	0,115	1,9
XXV-2	 4 punktowe zginanie	0,145	0,142	1,4
XXVI-1	 4 punktowe zginanie	0,095	0,095	1,5

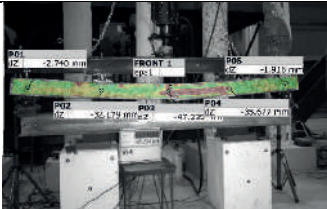
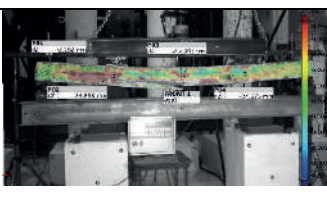
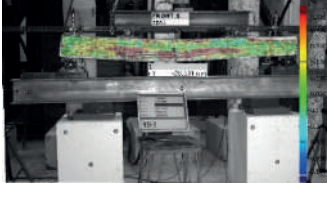
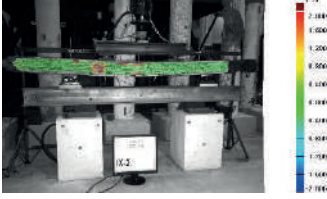
6.2. Wyniki badań

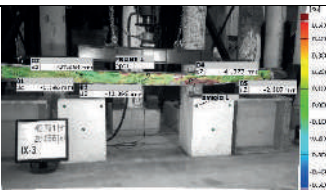
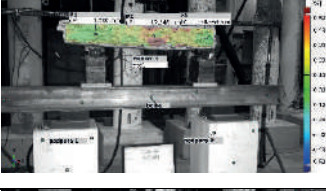
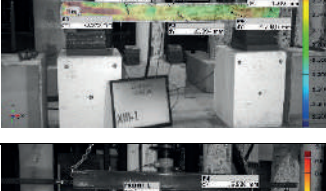
W tabelicy 23 zamieszczono uzyskane najważniejsze wyniki badań, czyli obciążenie niszczące i ugięcie elementu. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono naprężenie przy zniszczeniu odpowiadające wytrzymałości na zginanie drewna badanego elementu. Przy obliczaniu tego naprężenia uwzględniono współczynniki k_h według wzoru (1) i k_l według wzoru (2) zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 384 [N22] (zob. pkt. 2.2.2). W przypadku badań w schemacie czteropunktowego zginania długość efektywną belki obliczano ze wzoru (3). W przypadku badań w schemacie trójpunktowego zginania jako długość efektywną belki przyjmowano rozstaw podpór skrajnych – we wzorze (3) przyjmowano $a_f = 0$. W tabelicy 23 zamieszczono ponadto obraz badanego elementu w chwili zniszczenia uzyskany z pomiaru bezdotykowym systemem optycznym Aramis.

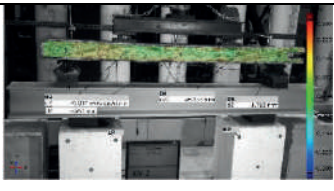
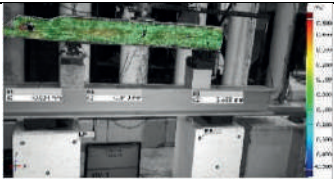
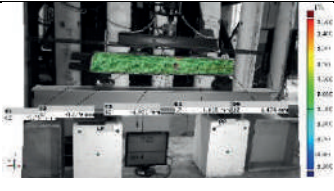
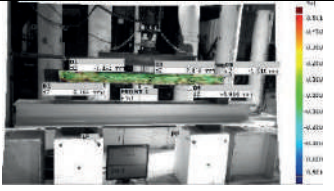
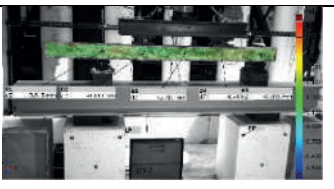
Tablica. 23. Parametry badanych elementów

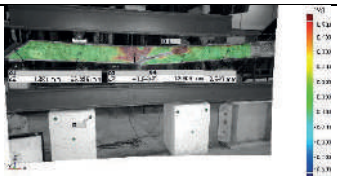
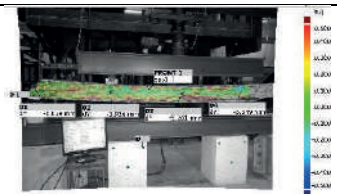
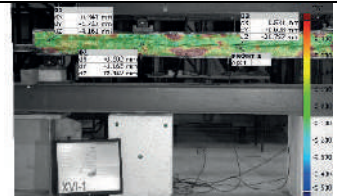
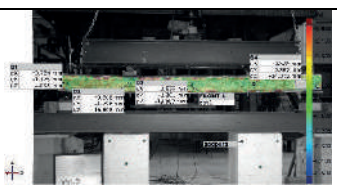
Nr elem.	Obciążenie niszczące, kN	Maksym. ugięcie, mm	Wsp. k_h wg (1)	Wsp. k_l wg (2)	Naprężenie przy zniszczeniu, MPa	Obraz zniszczenia
I-1	22,95	20,98	1,10	1,06	42,1	
I-2	38,54	13,13	1,05	1,34	34	

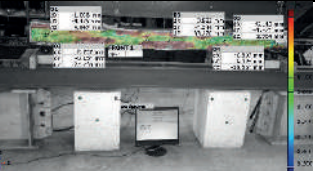
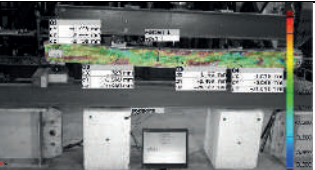
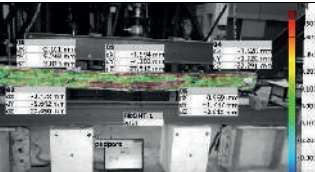
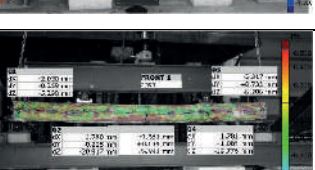
II-1	31,78	9,25	1,05	1,33	27,6	
II-2	36,09	19,13	1,03	1,23	19,2	
III-1	48,28	14,95	1,0	1,40	23,9	
III-2	29,133	7,211	1,11	1,26	33,1	
IV-1	77,139	21,86	0,98	1,28	33,2	
V-1	8,891	90,126	1,10	1,08	14,3	
VI-3	32,91	13,54	1,05	1,40	19,3	

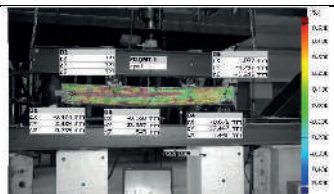
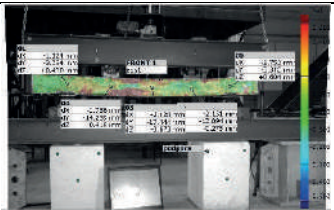
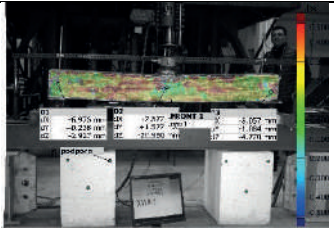
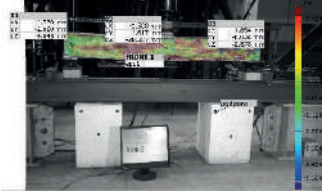
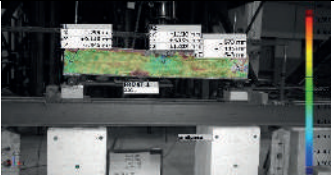
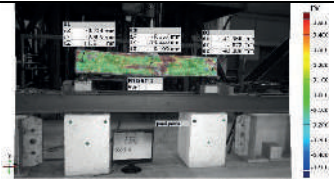
VI-4	46,29	45,31	1,05	1,13	32,4	
VI-5	81,63	45,31	1,03	1,18	40,8	
VII-1	86,44	20,01	1,02	1,25	28,5	
VII-2	16,22	20,06	10,2	1,45	8,3	
VIII-1	59,92	29,53	1,00	1,39	16,8	Brak pomiaru
VIII-2	24,18	26,84	1,02	1,44	20,6	Brak pomiaru
IX-1	29,852	30,651	1,07	1,15	26,7	
IX-2	16,483	13,41	1,03	1,25	5,0	

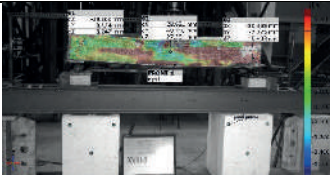
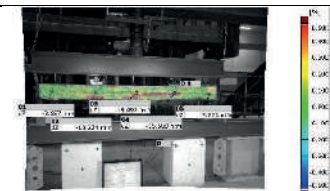
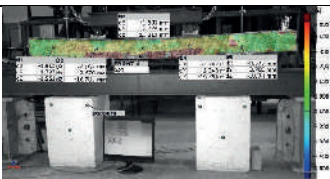
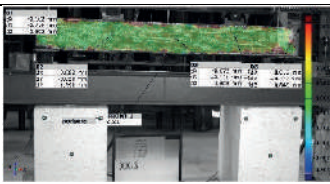
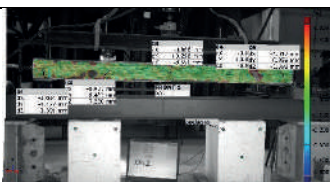
IX-3	26,1	26,73	1,04	1,11	24,8	
IX-4	29,22	20,6	1,0	1,59	4,7	
X-1	70,50	30,24	1,0	1,29	7,5	
XI-1	193,23	44,695	101	1,27	26,1	
XII-1	11,822	43,612	1,05	1,16	6,6	
XIII-1	43,469	37,583	1,03	1,23	31,7	
XIII-2	17,415	34,737	1,01	1,25	11,0	

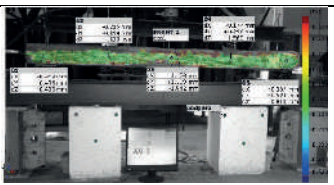
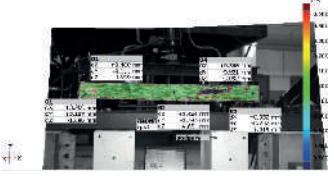
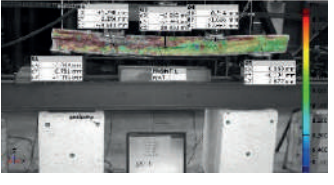
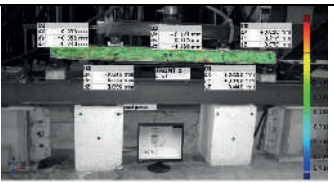
XIII-3	27,324	39,64		1,01	1,26	
XIV-2	98,81	42,365	1,05	1,20	47,8	
XIV-3	74,07	17,326	1,00	1,55	17,6	
XIV-4	127,95	41,75	1,00	1,37	20,1	
XIV-5	42,645	42,607	1,06	1,19	24,7	
XIV-7	56,91	42,26	1,09	1,23	36,2	
XIV-8	44,843	24,151	1,07	1,25	26,4	

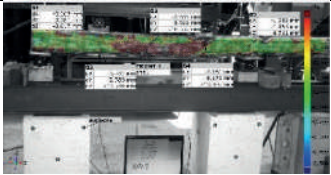
XV-2	60,888	22,296	1,00	1,63	19,0	
XV-4	57,435	46,64	0,96	1,23	13,9	
XV-5	87,0	32,165	0,99	1,21	22,1	
XV-6	65,443	85,394	0,96	1,15	24,2	
XVI-1	33,331	30,861	0,99	1,15	13,0	
XVI-2	25,1	79,692	0,9	1,17	9,0	
XVI-3	53,534	40,768	0,96	1,23	11,9	

XVI-4	42,505	35,889	0,99	1,20	12,6	
XVI-5	30,34	36,721	1,0	1,15	14,1	
XVI-6	70,515	34,846	0,99	1,20	23,6	
XVI-7	56,462	41,325	0,99	1,20	18,3	
XVI-8	38,604	39,38	0,99	1,16	14,1	
XVII-1	47,06	45,107	1,0	1,18	19,5	
XVII-2	58,831	52,073	0,99	1,20	19,7	

XVII-3	158,047	37,374	0,99	1,3	30,2	
XVII-4	78,438	24,972	1,0	1,29	18,4	
XVIII-1	72,53	12,981	0,93	1,44	21,3	
XVIII-2	66,001	18,228	0,94	1,43	26,1	
XVIII-3	67,252	8,574	0,93	1,52	15,0	
XVIII-4	64,05	32,882	0,93	1,51	16,2	
XVIII-5	76,478	9,952	0,93	1,5	17,0	

XVIII-6	90,687	42,648	0,93	1,48	25,1	
XIX-1	65,33	37,259	0,98	1,22	18,5	
XX-1	36,995	25,512	1,0	1,21	16,3	
XX-2	172,625	24,158	1,0	1,26	37,7	
XX-3	149,108	89,808	1,01	1,25	37,4	
XX-4	38,5	32,52	1,01	1,18	16,2	Brak pomiaru
XXI-1	101,832	37,857	0,95	1,25	20,5	
XXI-2	36,474	50,383	0,99	1,21	12,2	

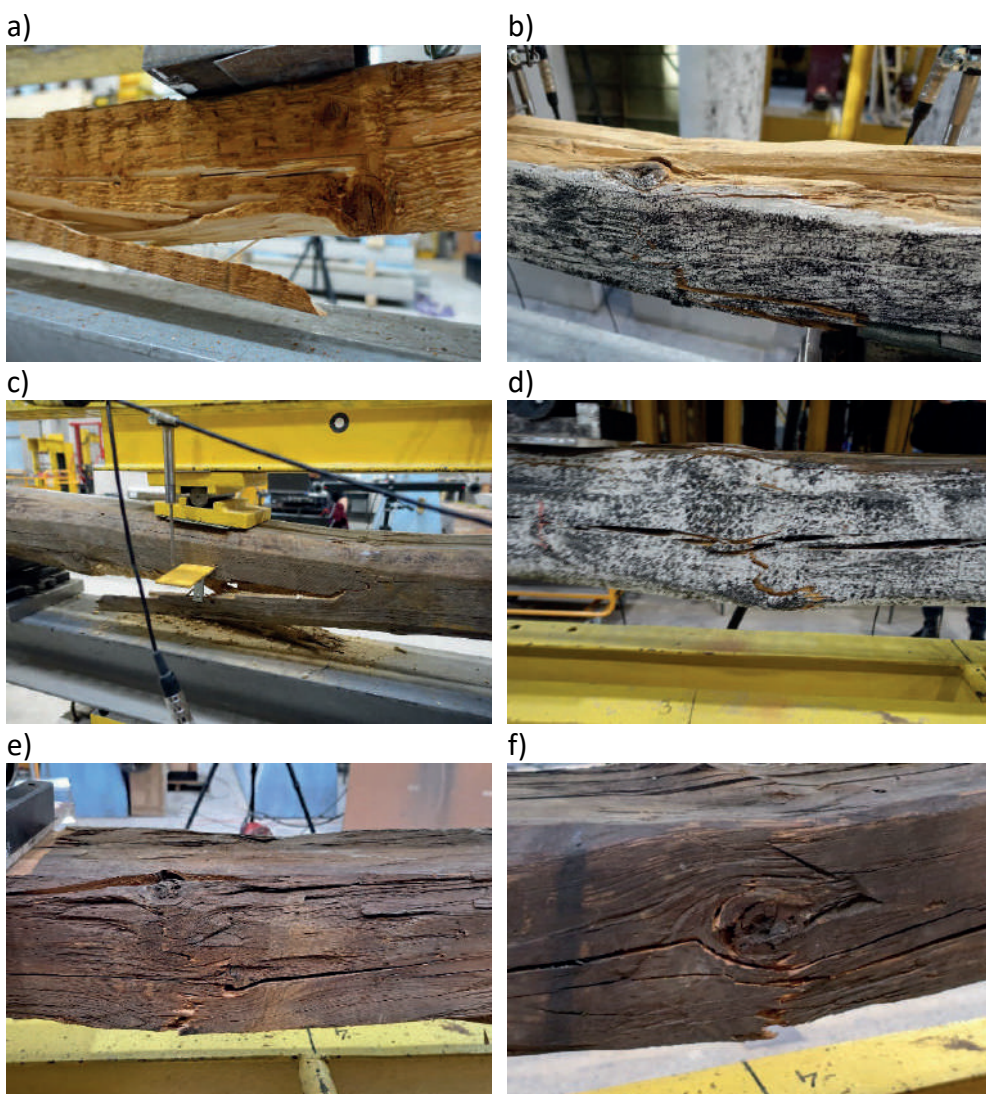
XXI-3	73,453	90,681	1,03	1,16	34,2	
XXI-4	62,502	25,828	0,97	1,25	15,1	
XXII-1	76,49	25,897	1,05	1,23	34,8	
XXIII-1	19,174	25,703	1,06	1,11	14,7	
XXIV-1	35,506	69,256	1,06	1,11	27,2	
XXIV-2	40,936	57,261	1,05	1,12	29,7	
XXV-1	27,952	42,304	1,05	1,15	20,0	

XXV-2	27,952	42,304	1,01	1,27	7,7	
XXVI-1	15,173	38,277	1,10	1,15	15,8	

6.3. Podsumowanie uzyskanych wyników

W badaniach niszczących uzyskano zróżnicowane wartości naprężenia niszczącego, tożsamego z wytrzymałością na zginanie drewna badanej belki. Najmniejsze naprężenie niszczące wynosiło 4,69 MPa, a największe 47,8 MPa. Wpływ na zróżnicowanie wyników miał gatunek drewna oraz stopień jego uszkodzenia. Belki niszczyły się przez zarysowania wzdłuż i w poprzek włókien (rys. 79).

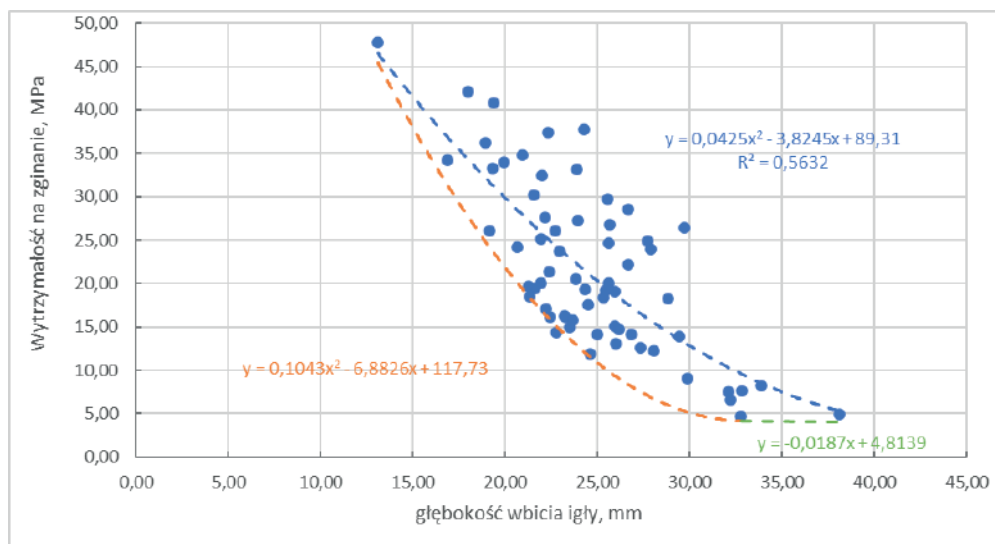
Badania wykazały, że drewno zabytkowe niszczy się gwałtownie. Jest ono mniej sprężyste od drewna nowego z uwagi na utratę wilgoci oraz uszkodzenia. W większości badanych belek zniszczenie miało kruchy charakter. Rysy występowały w okolicy przyłożonego obciążenia. Wpływ na przebieg zarysowań miała lokalizacja wad, a w szczególności sęków i korozji biologicznej. Zarysowania obiegały sęki i przechodziły przez najsłabsze miejsca skorodowanych elementów. Rozwarciu ulegały istniejące spęknięcia. Ugięcia badanych elementów mieściły się w przedziale 8,6÷90,7 mm. Oprócz gatunku drewna i stopnia jego uszkodzeń wpływ na wartość ugięć miała również rozpiętość badanej belki.



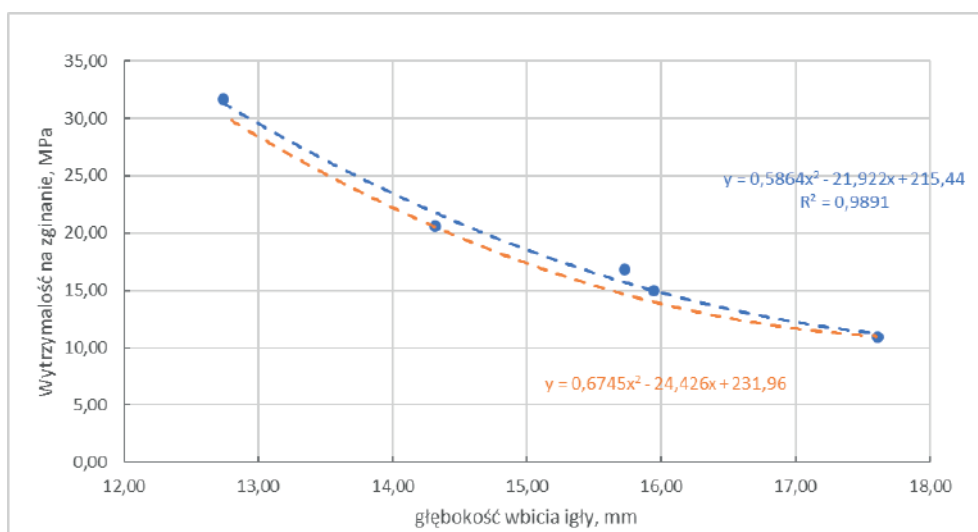
Rys. 79. Przykładowe zniszczenie elementu: a) I-1, b) VII-2, c) IX-4, d) XVI-1, e) XXIV-2, f) XXV-1

7. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW ORAZ KORELACJA BADAŃ NISZCZĄCYCH I NIENISZCZĄCYCH

Analizy uzyskanych wyników badań niszczących i nieniszczących przeprowadzono osobno dla elementów dębowych oraz gatunków iglastych. Na rys. 80 pokazano korelacje wyników badań niszczących oraz nieniszczących badań młotkiem do drewna dla drewna iglastego, a na rys. 81 dla drewna dębowego. Na obu wykresach zaznaczono medianę (kolor niebieski) oraz dolną obwiednię wyników badań (kolor pomarańczowy i zielony). Zastosowano wielomiany drugiego stopnia oraz funkcję liniową. Współczynnik determinacji R^2 dla wartości średnich wynosił $R^2 = 0,5632$ dla drewna iglastego i $R^2 = 0,9891$ dla dębowego. W ostatnim przypadku analizowano jednak tylko 5 par wyników.



Rys. 80. Korelacja wyników badań niszczących i badań młotkiem do drewna dla drewna iglastego



Rys. 81. Korelacja wyników badań niszczących i badań młotkiem do drewna dla drewna dębowego

W przypadku drewna iglastego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od głębokości wbicia igły h ma postać:

$$f_m = 0,0425h^2 - 3,8245h + 89,31. \quad (18)$$

Dolna obwiednia wyników badań drewna iglastego została utworzona z krzywej i prostej:

$$f_m = 0,1043h^2 - 6,8826h + 117,73, \text{ dla } 13,0 \leq h < 33,0 \text{ mm}, \quad (19)$$

$$f_m = -0,0187h + 4,8139, \text{ dla } 33 \leq h < 33,0 \text{ mm}. \quad (20)$$

W przypadku drewna dębowego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od głębokości wbicia igły h ma postać:

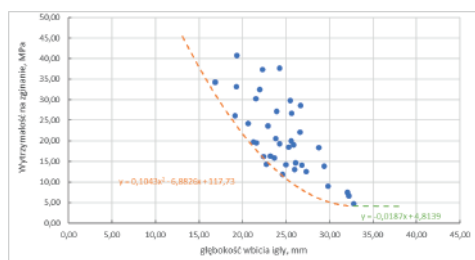
$$f_m = 0,5864h^2 - 21,922h + 215,44. \quad (21)$$

Dolna obwiednia wyników badań drewna dębowego:

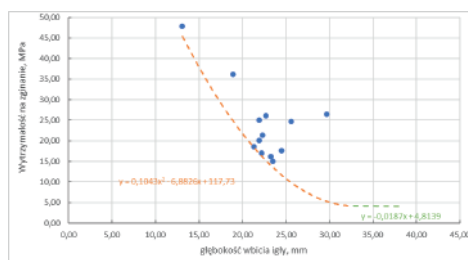
$$f_m = 0,6745h^2 - 24,426h + 231,96. \quad (22)$$

Na rys. 82 pokazano porównanie dolnej obwiedni gatunków iglastych z wynikami badań dla sosny, jodły i świerku.

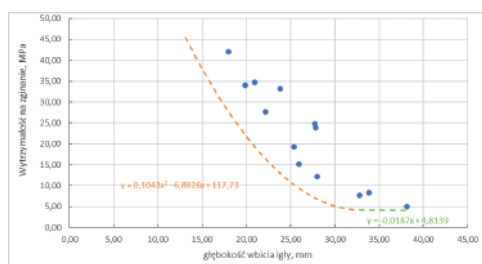
a)



b)



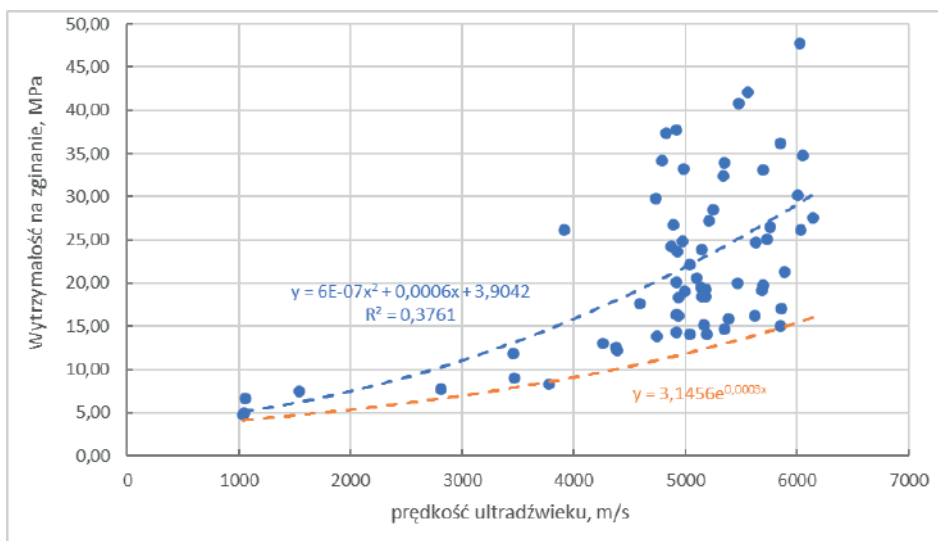
c)



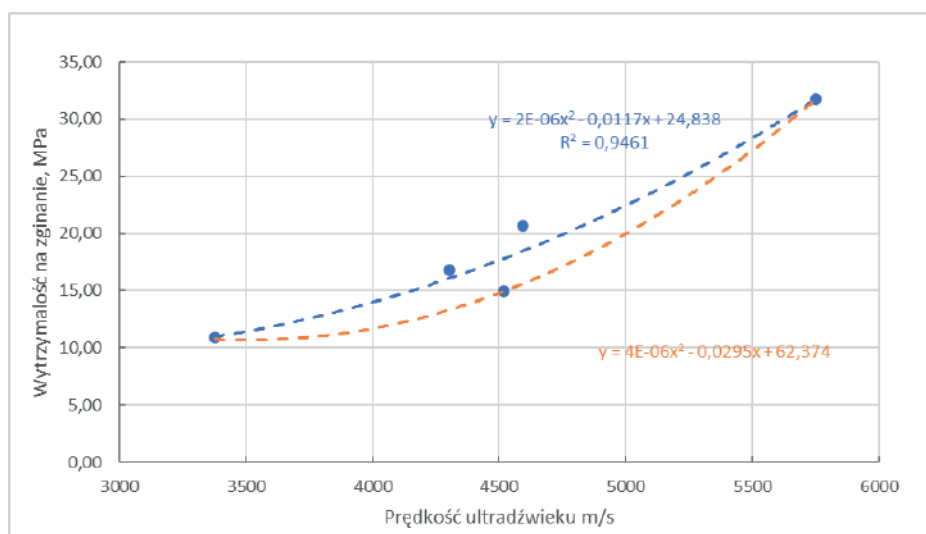
Rys. 82. Porównanie dolnej obwiedni wyników badań gatunków iglastych z wynikami dla: a) sosny, b) jodły, c) świerku

Z rys. 82 wynika, że dolna obwiednia wyników badań gatunków iglastych dobrze opisuje badania sosny i jodły. W przypadku świerku można by obwiednię przesunąć nieco do góry. Z uwagi jednak na małą liczbę par wyników wytrzymałość na zginanie – głębokość wbicia igły zastosowanie dolnej obwiedni wyników badań gatunków iglastych będzie w przypadku świerku bezpiecznym oszacowaniem.

Na rys. 83 pokazano korelacje wyników badań niszczących oraz nieniszczących badań urządzeniem ultradźwiękowym Surfer, analizującym ultradźwiękową falę poprzeczną dla drewna iglastego, a na rys. 84 dla drewna dębowego. Podobnie jak powyżej na obu wykresach zaznaczono medianę (kolor niebieski) oraz dolną obwiednię wyników badań (kolor pomarańczowy). Do wartości średniej oraz dolnej obwiedni dla dębu zastosowano wielomiany drugiego stopnia, natomiast do opisu dolnej obwiedni wyników badań przyjęto funkcję wykładniczą. Współczynnik determinacji R^2 dla wartości średnich wynosił $R^2 = 0,3761$ dla drewna iglastego i $R^2 = 0,9461$ dla 5 par wyników.



Rys. 83. Korelacja wyników badań niszczących i badań ultradźwiękowych (fala poprzeczna) dla drewna iglastego



Rys. 84. Korelacja wyników badań niszczących i badań ultradźwiękowych (fala poprzeczna) dla drewna dębowego

W przypadku drewna iglastego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od prędkości ultradźwiękowej fali poprzecznej C_T ma postać:

$$f_m = 6 \cdot 10^{-7} C_T^2 + 0,0006 C_T + 3,9042. \quad (23)$$

Dolną obwiednię wyników badań drewna iglastego opisano równaniem:

$$f_m = 3,1456 \cdot e^{0,0003 C_T}. \quad (24)$$

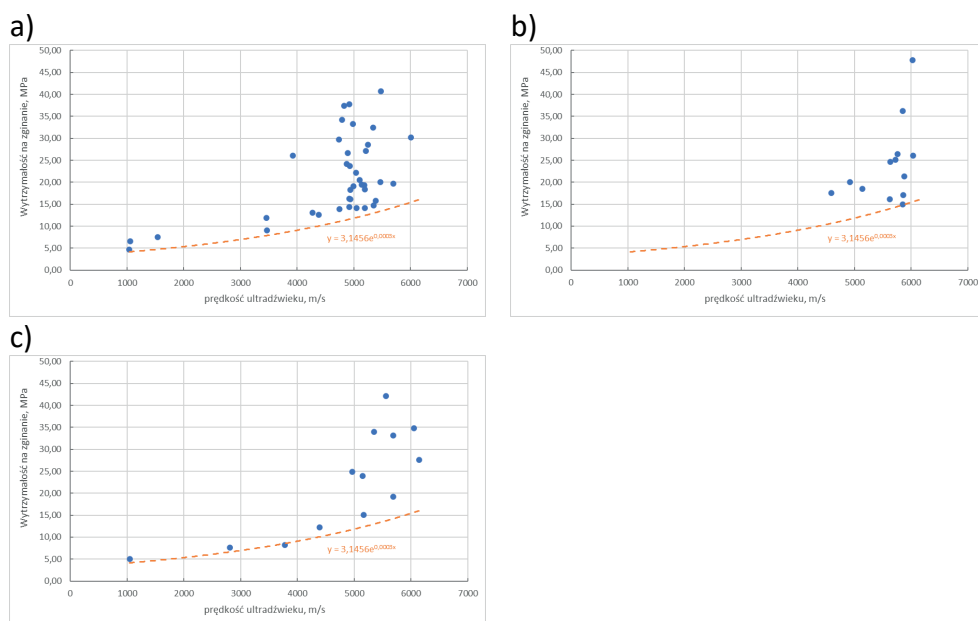
W przypadku drewna dębowego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od prędkości ultradźwiękowej fali poprzecznej C_T ma postać:

$$f_m = 2 \cdot 10^{-6} C_T^2 - 0,0117 C_T + 24,838. \quad (25)$$

Dolna obwiednia wyników badań drewna dębowego:

$$f_m = 4 \cdot 10^{-6} C_T^2 - 0,0295 C_T + 62,347. \quad (26)$$

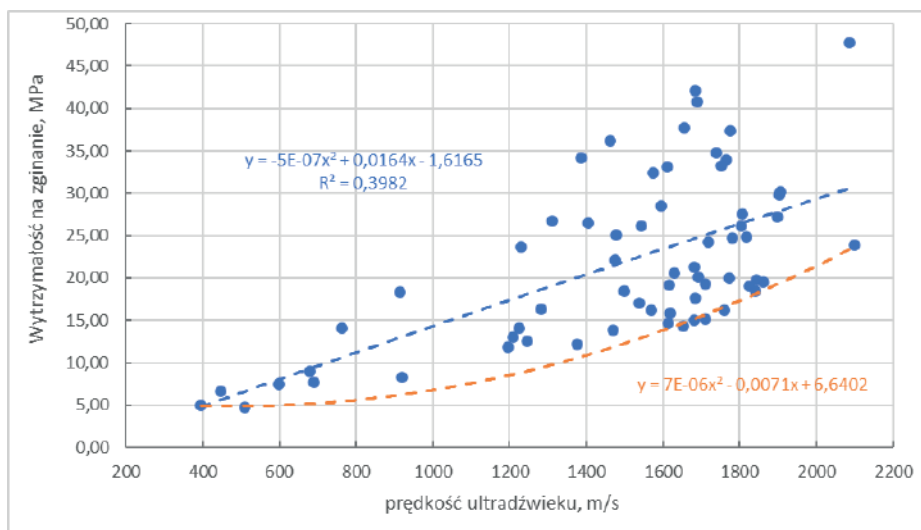
Na rys. 85 pokazano porównanie dolnej obwiedni gatunków iglastych z wynikami badań dla sosny, jodły i świerku. Dolna obwiednia wyników badań gatunków iglastych dobrze opisuje badania sosny, jodły i świerku.



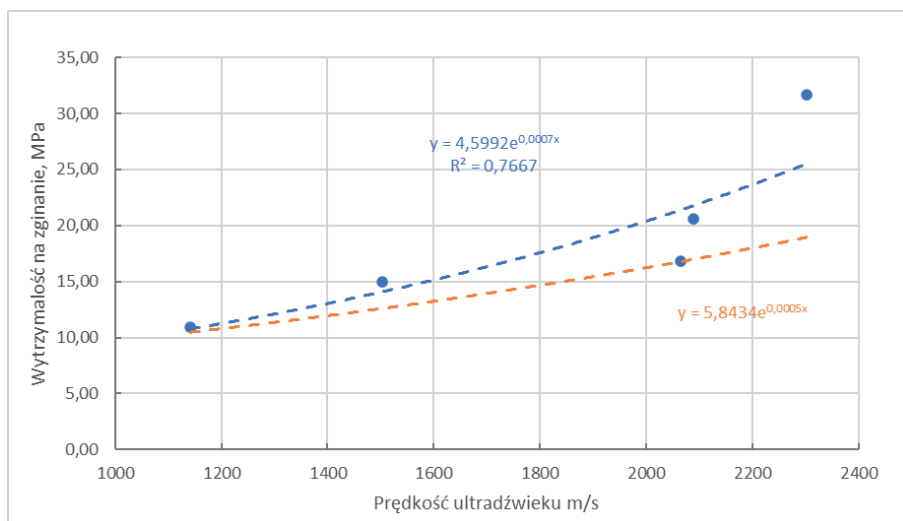
Rys. 85. Porównanie dolnej obwiedni wyników badań gatunków iglastych z wynikami dla: a) sosny, b) jodły, c) świerku

Na rys. 86 pokazano korelacje wyników badań niszczących oraz nieniszczących badań urządzeniem ultradźwiękowym Pulsar, analizującym ultradźwiękową falę podłużną dla drewna iglastego, a na rys. 87 dla drewna dębowego. Podobnie jak powyżej na obu wykresach zaznaczono linię trendu (kolor niebieski) oraz dolną obwiednią wyników badań (kolor pomarańczowy). Do opisu wartości średniej oraz dolnej obwiedni dla gatunków iglastych

zastosowano wielomiany drugiego stopnia, natomiast do opisu wartości średniej oraz dolnej obwiedni wyników badań dębu przyjęto funkcję wykładniczą. Współczynnik determinacji R^2 dla wartości średnich wynosił $R^2 = 0,3982$ dla drewna iglastego i $R^2 = 0,7667$ dla 5 par wyników.



Rys. 86. Korelacja wyników badań niszczących i badań ultradźwiękowych (fala poprzeczna) dla drewna iglastego



Rys. 87. Korelacja wyników badań niszczących i badań ultradźwiękowych (fala poprzeczna) dla drewna dębowego

W przypadku drewna iglastego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej C_L ma postać:

$$f_m = 5 \cdot 10^{-7} C_L^2 + 0,0164 C_L - 1,6165. \quad (27)$$

Dolną obwiednię wyników badań drewna iglastego opisano równaniem:

$$f_m = 7 \cdot 10^{-6} C_L^2 - 0,0071 C_L + 6,6402. \quad (28)$$

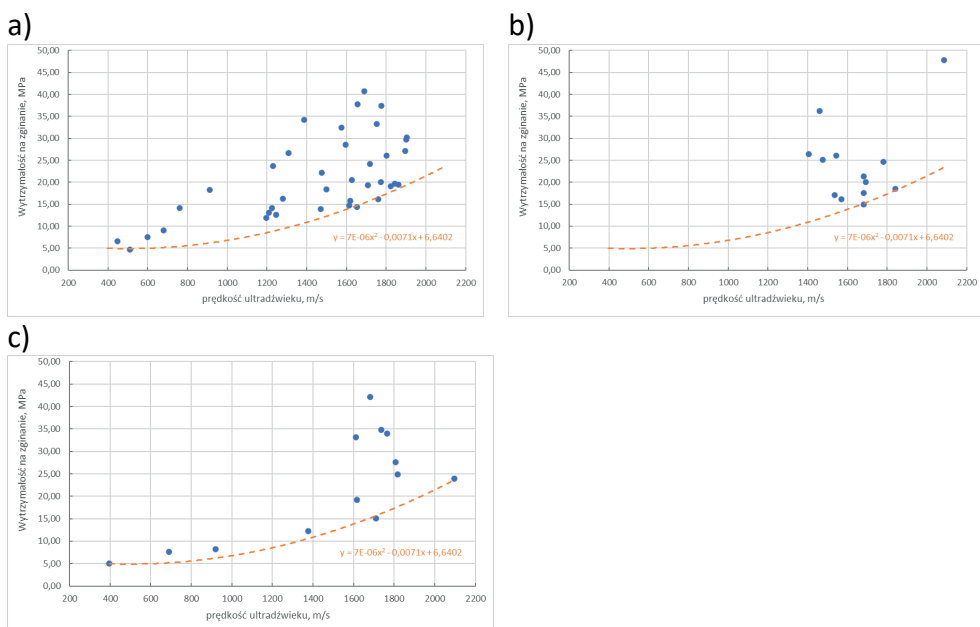
W przypadku drewna dębowego średnia funkcja opisująca wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od prędkości ultradźwiękowej fali poprzecznej C_T ma postać:

$$f_m = 4,5992 \cdot e^{0,0007 C_L}. \quad (29)$$

Dolna obwiednia wyników badań drewna dębowego:

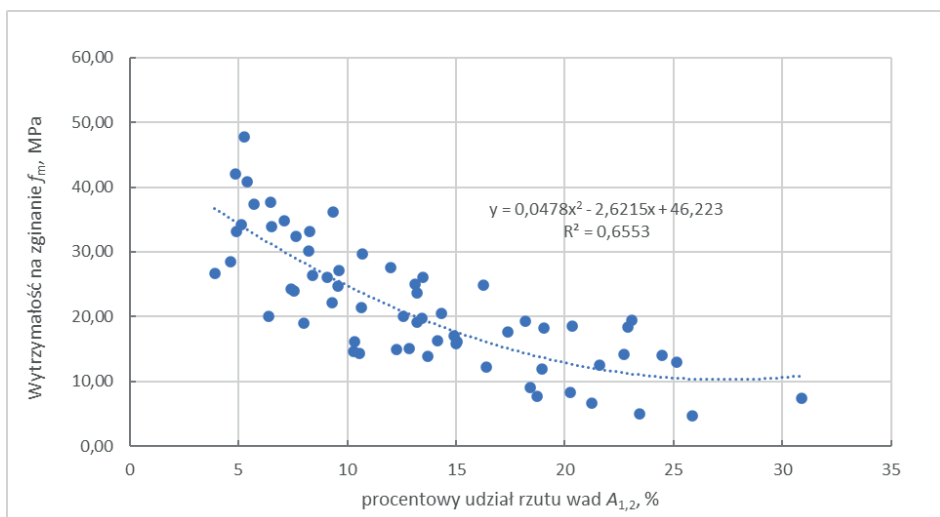
$$f_m = 5,8434 \cdot e^{0,0005 C_L}. \quad (30)$$

Na rys. 88 pokazano porównanie dolnej obwiedni gatunków iglastych z wynikami badań dla sosny, jodły i świerku. Dolna obwiednia wyników badań gatunków iglastych dobrze opisuje badania sosny, jodły i świerku.



Rys. 88. Porównanie dolnej obwiedni wyników badań gatunków iglastych z wynikami dla: a) sosny, b) jodły, c) świerku

Przeprowadzono ponadto analizę wpływu zakresu uszkodzeń na wytrzymałość drewna na zginanie. Na wykresie pokazano wyniki badań tej analizy (rys. 89). Na osi rzędnych wykresu zamieszczono wytrzymałość na zginanie a na osi odciętych procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ według wzoru (17), podany w tablicy 12. Wykres pokazuje wyraźną zależność wytrzymałości na zginanie od ilości wad. Przy wzroście powierzchni rzutu wad wytrzymałość maleje.



Rys. 89. Wykres wytrzymałości na zginanie drewna f_m w funkcji procentowego udziału rzutu wad $A_{1,2}$

8. PROPOZYCJA METODYKI OKREŚLANIA WYTRZYMAŁOŚCI DREWNA PRZY UŻYCIU METOD NIENISZCZĄCYCH I SEMI-NIENISZCZĄCYCH

Przeprowadzone badania niszczące i nieniszczące wykazały, że nośność na zginanie drewnianych belek zależy w dużym stopniu od ilości uszkodzeń i wad drewna. Dolne obwiednie wyników badań podane w rozdziale 7 zapewniają bezpieczne oszacowanie wytrzymałości drewna na zginanie dla badań nieniszczących i semi-nieniszczących prowadzonych przy pomocy młotka do drewna oraz zastosowanych urządzeń ultradźwiękowych. Należy jednak pamiętać, że elementy zabytkowe pozyskane do badań cechowały się zróżnicowanym stanem. Część z nich pozyskano podczas renowacji obiektów i były one przeznaczone do wymiany i późniejszej utylizacji z uwagi na znaczne uszkodzenia korozyjne. Część elementów do badań pozyskiwano natomiast z rozbiórek obiektów niewykazujących istotnych uszkodzeń. Stan techniczny elementów drewnianych w obiektach zabytkowych również może być zróżnicowany. Jak podano w literaturze (zob. pkt. 2.2.3) metodą wizualną można zidentyfikować tylko do 30% wad i uszkodzeń. Skoro wytrzymałość drewna na zginanie zależy od ilości uszkodzeń i wad to metodyka określania tej wytrzymałości, a co za tym idzie klasy drewna, powinna uwzględniać występowanie wad. Wydaje się, że w nieuszkodzonych zabytkowych elementach drewnianych i takich z małą ilością wad wytrzymałość drewna mogłaby być określana przy pomocy średniej korelacji z badań, a nie dolnej obwiedni wyników badań. W celu określenia granicy pomiędzy stosowaniem średniej korelacji lub dolnej obwiedni wyników badań przeprowadzono obliczenia na podstawie funkcji mediany opisującej wytrzymałość na zginanie drewna f_m w zależności od średniej głębokości wbicia igły h (wzór (18)), średniej prędkości fali poprzecznej C_T (wzór (23)) i średniej prędkości fali podłużnej C_L (wzór (27)) dla każdego elementu z drewna iglastego. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 24 wraz z naprężeniem niszczącym uzyskanym z badań i procentowym udziałem rzutu wad na obie badane powierzchnie $A_{1,2}$,

obliczonym ze wzoru (17). Wartości w tabelicy posortowano według $A_{1,2}$ licząc od najmniejszego procentowego udziału rzutu wad do udziału największego. W ostatnich trzech kolumnach tabelicy, zawierających wartości wytrzymałości drewna na zginanie obliczone dla średniej korelacji na podstawie wyników badań nieniszczących i semi-nieniszczących, wiersze pokolorowano na kolor zielony, gdy wytrzymałości z obliczeń były większe od wyników badania niszczącego (bezpieczne oszacowanie) i na kolor czerwony w przeciwnym przypadku, oznaczającym, że obliczenia według średniej korelacji dają wynik zawyżony względem wyniku badań.

Tablica. 24. Porównanie wyników badań niszczących z wytrzymałością drewna obliczoną według średnich korelacji w kontekście ilości wad i uszkodzeń

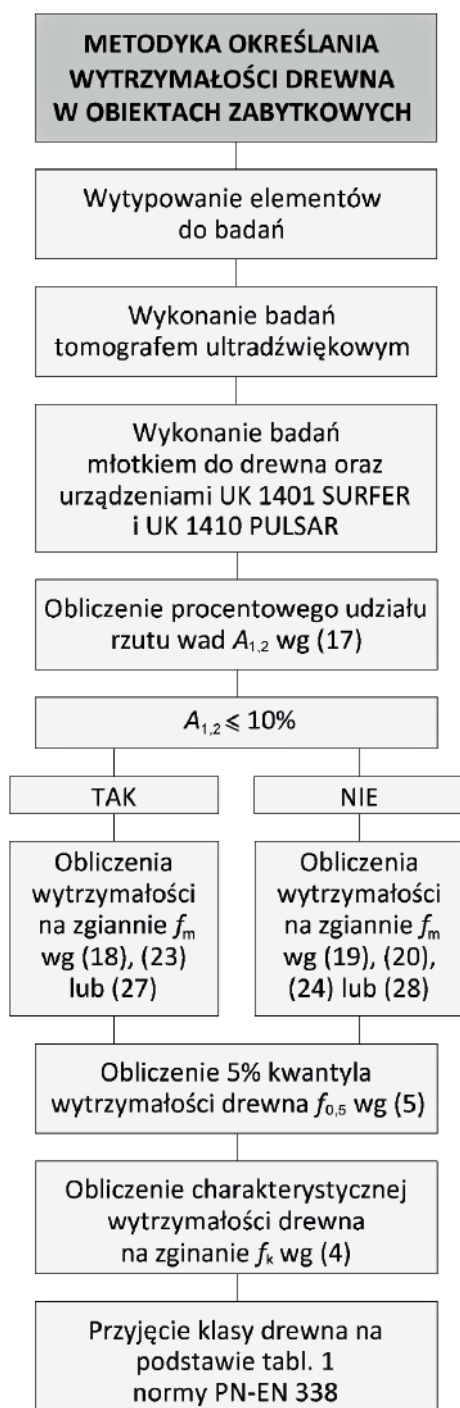
Seria	Udział rzutu wad na obie badane powierzchnie $A_{1,2}$, %	Naprężenie przy zniszczeniu, MPa	Wytrzymałość na zginanie dla badania młotkiem do drewna wg (18), MPa	Wytrzymałość na zginanie dla badania ultradźwięk. (fala poprzeczna) wg (23), MPa	Wytrzymałość na zginanie dla badania ultradźwięk. (fala podłużna) wg (27), MPa
IX-1	3,9	26,72	24,32	21,35	26,68
VII-1	4,64	28,54	15,94	21,71	29,04
I-1	4,84	42,09	34,23	25,77	27,13
IV-1	4,92	33,22	31,28	21,79	28,11
XXI-3	5,11	34,20	36,88	20,57	22,83
XIV-2	5,25	47,81	46,51	29,31	32,83
VI-5	5,4	40,76	5,28	5,19	7,87
XX-3	5,7	37,38	25,11	20,81	28,44
XXV-1	6,37	19,98	19,25	25,12	28,41
XX-2	6,48	37,71	21,56	21,36	26,74
I-2	6,53	33,96	30,04	24,30	28,30
XXII-1	7,09	34,78	27,87	29,50	27,91
XV-6	7,42	24,23	18,62	17,39	20,24
III-1	7,55	23,91	15,77	22,90	32,98
VI-4	7,66	32,45	19,14	21,20	21,72
XV-2	8,01	18,42	13,61	20,25	24,07

XVII-3	8,23	30,19	19,74	23,17	24,48
III-2	8,27	33,15	22,27	26,77	26,09
XIV-8	8,4	26,44	13,23	27,27	23,11
XI-1	9,07	26,09	31,65	15,48	28,84
XV-5	9,28	22,12	28,42	21,06	27,64
XIV-7	9,34	36,17	32,22	27,97	23,93
XIV-5	9,59	24,67	19,27	26,32	28,51
XXIV-1	9,62	27,18	22,14	23,33	30,17
XXIII-1	10,29	14,68	18,40	24,31	26,12
XVIII-4	10,32	16,18	25,37	28,01	25,03
V-1	10,57	14,34	17,54	23,57	25,86
XVIII-1	10,67	21,35	24,41	29,39	25,11
XXIV-2	10,71	29,74	19,41	20,20	30,24
II-1	11,98	27,60	25,49	30,23	28,88
XVIII-3	12,26	15,00	23,32	26,28	25,50
XIV-4	12,6	20,08	25,88	21,38	27,26
XXI-4	12,83	15,13	18,70	23,04	27,51
XVIII-6	13,13	25,08	27,07	22,87	29,38
II-2	13,21	19,21	19,60	26,71	26,17
XVI-6	13,22	23,65	14,42	21,48	15,81
XVII-2	13,44	19,73	26,70	29,15	30,28
XVIII-2	13,48	26,09	22,94	27,94	27,11
XV-4	13,72	13,86	17,61	22,17	24,14
XX-1	14,14	16,28	23,46	21,36	21,29
XXI-1	14,32	20,53	22,35	22,56	26,34
XVIII-5	14,92	17,04	25,86	27,04	24,16
XXVI-1	15,01	15,81	22,64	24,56	26,20
XX-4	15,05	16,19	24,90	21,48	28,24
IX-3	16,25	24,85	25,79	24,22	25,58

XXI-2	16,4	12,21	15,53	18,12	22,70
XIV-3	17,4	17,58	21,13	19,31	27,13
VI-3	18,17	19,30	8,55	14,76	15,90
XVI-2	18,41	9,01	20,98	13,17	20,05
XXV-2	18,71	7,68	9,58	10,32	12,43
XVI-3	18,96	11,88	16,54	18,04	20,76
XVI-7	19,04	18,32	20,30	22,19	20,48
VII-2	20,27	8,28	9,62	5,18	9,63
XIX-1	20,36	18,51	18,77	21,88	29,14
XII-1	21,26	6,59	10,21	5,20	8,68
XVI-4	21,59	12,58	17,33	23,19	13,52
XVI-8	22,71	14,14	26,59	22,83	29,66
XVII-4	22,92	18,42	25,07	28,22	27,11
XVII-1	23,09	19,49	27,26	26,80	29,41
IX-2	23,42	4,99	21,49	23,15	27,50
XVI-5	24,46	14,09	23,94	21,41	20,54
XVI-1	25,14	13,04	13,01	13,20	12,25
IX-4	25,85	4,69	31,17	25,21	27,23
X-1	30,89	7,48	10,37	6,25	11,02

Można stwierdzić, że w górnej części tabeli przeważają pola zielone, a w dolnej dominują pola czerwone. Pierwszy wiersz, w którym wszystkie pola są czerwone występuje dla serii XXIII-1, przy $A_{1,2} = 10,29\%$. Wyżej również sporadycznie występują pola czerwone, ale przekroczenia wartości z badań są niewielkie. Przyjęto zatem, że wartością graniczną między stosowaniem średniej funkcji wynikającej z linii trendu a funkcji opisującej dolną obwiednię wyników badań będzie wartość procentowego udziału rzutu wad na dwie prostopadłe powierzchnie $A_{1,2} = 10\%$.

Poniżej, na rys. 90 zamieszczono propozycję metodyki określania wytrzymałości drewna w obiekcie historycznym na podstawie badań nieniszczących i semi-nieniszczących z uwzględnieniem występowania wad i uszkodzeń.



Rys. 90. Schemat metodyki określania wytrzymałości drewna w obiektach zabytkowych

9. PRZYKŁADY WYKORZYSTANIA PROPONOWANEJ METODYKI

9.1. Informacje podstawowe

Przeprowadzono badania na trzech obiektach wpisanych do rejestru zabytków: więźbie dachowej pouzdrowskiego budynku w Jastrzębiu-Zdroju, więźbie dachowej kościoła P.W. Św. Stanisława Biskupa i Męczennika w Czeladzi oraz więźbie dachowej zamku Kapituły Warmińskiej w Olsztynie. W dwóch pierwszych obiektach wyniki badań nieniszczących i seminieniszczących zweryfikowano na elemencie pobranym do badań niszczących. W badaniach zastosowano metodykę zaproponowaną w rozdziale 8.

9.2. Więźba budynku pouzdrowskiego

9.2.1. Krótka historia obiektu

Budynek łazinek II, zlokalizowany przy ul. Witczaka 4 w Jastrzębiu-Zdroju, wzniesiony został w 1912 r. Architektonicznym walorem obiektu jest charakterystyczna dwukondygnacyjna wieża usytuowana pośrodku budynku. W wieży pierwotnie znajdował się zbiornik ciśnień solanki i wody.

Budynek wykonano w konstrukcji tradycyjnej ze ścianami murowanymi z cegły, drewnianą więźbą dachową. Ściany budynku wykonano z cegły ceramicznej na zaprawie wapiennej. Ściany mają grubość 42÷25 cm. Stropy kondygnacji nadziemnych wykonano jako gęstożebrowe z ceramicznymi pustakami w kształcie cegieł dziurawek. Konstrukcja wieży jest żelbetowa. Wieżę posadowiono na żelbetowej płycie fundamentowej, co w czasach wznoszenia budynku było rozwiązaniem nowatorskim. Dach budynku i wieży wykonano jako mansardowy, kryty pierwotnie dachówką karpiówką, obecnie blachą na pełnym deskowaniu. W górnej części krokwie dachu oparto na

płatwi kalenicowej i płatwiach części niższej. Budynek jest wpisany do Rejestru Zabytków na podstawie wpisu nr 1524/93 z dnia 30.04.1993 r. Widok budynku pokazano na rys. 91, a na rys. 23÷25 pokazano widoki więźby dachowej.



Rys. 91. Widok budynku w trakcie modernizacji



Rys. 92. Górna część więźby dachowej



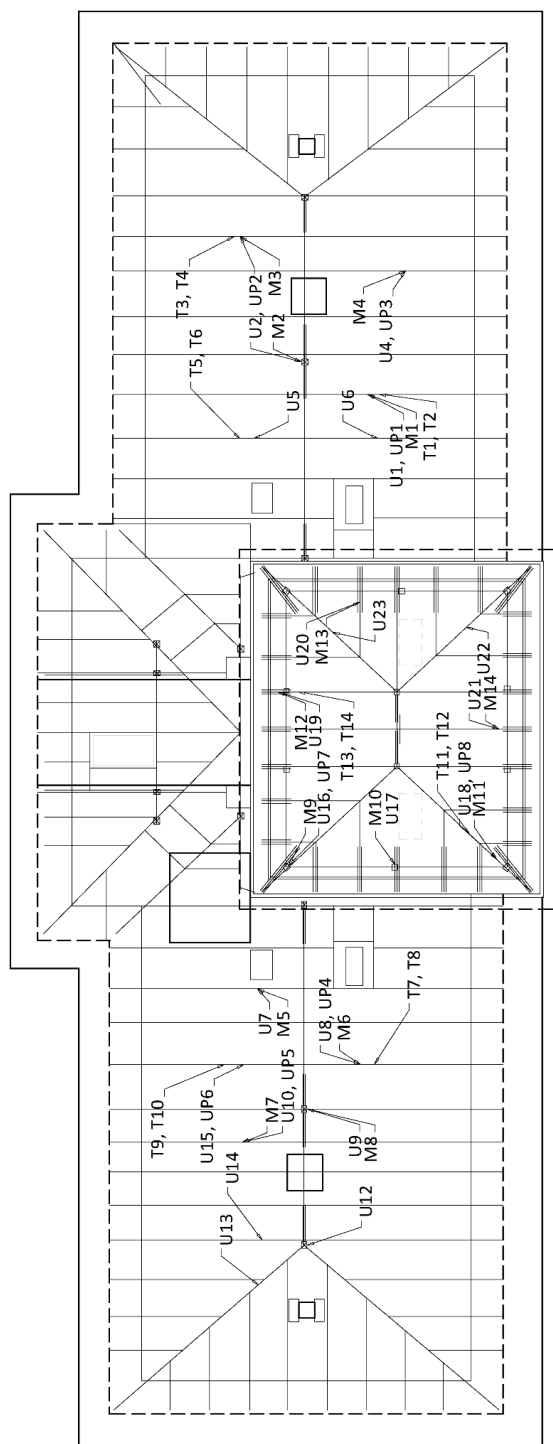
Rys. 93. Dolna część mansardowej więźby budynku

9.2.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką

Wytypowanie elementów do badań

Do badań wytypowano wybrane elementy więźby dachowej, pokazane na rys. 94. Miejsca badań tomografem (14 skanów) oznaczono literą T i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań młotkiem do drewna (14 punktów) oznaczono literą M i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1401 SURFER (23 miejsca) oznaczono literą U i kolejną cyfrą arabską, natomiast miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1410 PULSAR (11 miejsc) oznaczono literą UP i kolejną cyfrą arabską.

Elementy więźby dachowej wykonano z drewna świerkowego. W miejscach pokazanych na rys. 94 wykonano badania wilgotności urządzeniem T510. Uzyskano wilgotności z przedziału $9,2 \div 12,6\%$, średnio $12,2\%$.



Rys. 94. Miejsca badań nieniszczących i semi-nieniszczących

Badanie tomografem ultradźwiękowym

Przeprowadzono badania tomografem ultradźwiękowym wybranych elementów. Badania prowadzono na dwóch sąsiednich płaszczyznach elementów, dzięki czemu uzyskano rzut wszystkich wad na dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny. Obliczono procentowy udział rzutu wad na obie badane powierzchnie według wzoru (17). Wyniki badań zestawiono w tablicy 25. Można stwierdzić, że ilość uszkodzeń w badanych belkach jest bardzo mała. Maksymalna wartość $A_{1,2} = 4,2\%$.

Tablica. 25. Wyniki badań tomografem ultradźwiękowym

Nr belki	Obraz uzyskany z tomografu ultradźwiękowego	Długość skanu, L_i m	powierzchnia wad na jednej płaszczyźnie A_i , cm^2	procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ wg (17), %
T1, T2		1,25	24,38	1,87
		1,02	15,07	
T3, T4		0,84	0	1,18
		1,25	21,06	
T5, T6		1,25	50,05	2,81
		0,84	0	
T7, T8		1,05	0	0
		0,84	0	
T9, T10		1,05	0	0,58
		1,05	10,47	
T11, T12		1,05	26,66	4,2
		1,05	47,92	
T13, T14		1,05	9,56	0,55
		1,05	0	

Wykonanie badań nieniszczących i semi-nieniszczących

W miejscach pokazanych na rys. 94 wykonano badania młotkiem do drewna oraz urządzeniami UK 1401 SURFER i UK 1410 PULSAR. Fotografie z badań pokazano na rys. 95. Wyniki badań zamieszczono w tablicach 26÷28. W przypadku młotka do drewna wyniki skorygowano o współczynnik poprawkowy zgodnie z tablicą 18.

a)



b)



c)



Rys. 95. Badania więźby urządzeniami: a) młotek do drewna Wood Paker DRC, b) UK 1401 SURFER , c) UK 1410 PULSAR

Tablica 26. Wyniki badań młotkiem do drewna

Miejsce badania	Głębokość wbicia igły, mm	Skorygowana głębokość wbicia igły wg tabl. 18, mm
M1 (krokiew)	17,54	18,19
M2 (słup)	18,18	18,18

M3 (krokiew)	19,95	20,6
M4 (krokiew)	19,79	20,44
M5 (krokiew)	19,8	20,45
M6 (krokiew)	20,06	20,71
M7 (krokiew)	18,6	19,25
M8 (słup)	19,29	19,29
M9 (słup wieży)	19,13	19,13
M10 (słup wieży)	18,83	18,83
M11 (krokiew wieży)	18,25	18,9
M12 (krokiew wieży)	17,51	18,16
M13 (krokiew wieży)	19,45	20,1
M14 (krokiew wieży)	19,71	20,36

Tablica 27. Wyniki badań urządzeniem UK1401 Surfer

Miejsce badania	Prędkość ultradźwięku, m/s
U1 (krokiew)	5780
U2 (słup)	5770
U3 (krokiew)	5780
U4 (krokiew)	5770
U5 (krokiew)	5940
U6 (krokiew)	5940
U7 (krokiew)	5810
U8 (słup)	5900
U7 (krokiew)	5890
U8 (krokiew)	5820
U9 (słup)	5920
U10 (krokiew)	5890
U11 (krokiew)	5800
U12 (słup)	5770
U13 (krokiew narożna)	5790
U14 (krokiew)	5680
U15 (krokiew)	5500
U16 (słup wieży)	5580
U17 (słup wieży)	5840
U18 (krokiew wieży)	5800
U19 (krokiew wieży)	5770
U20 (krokiew wieży)	6050
U21 (krokiew wieży)	5990
U22 (krokiew narożna wieży)	5730
U23 (krokiew narożna wieży)	5780

Tablica 28. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Pulsar

Miejsce badania	Prędkość ultradźwięku, m/s
UP1 (krokiew)	1950
UP2 (słup)	1960
UP3 (krokiew)	1970
UP4 (krokiew)	1960
UP5 (krokiew)	1990
UP6 (krokiew)	1970
UP7 (słup wieży)	1970
UP8 (krokiew wieży)	1970
UP9 (krokiew wieży)	1990
UP10 (krokiew wieży)	1970
UP11 (krokiew narożna wieży)	1940

Obliczenia wytrzymałości na zginanie

Obliczono wytrzymałości na zginanie według wzorów (18), (23) i (27) w zależności od zastosowanego urządzenia. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 29. Na końcu tablicy podano wartość średnią wytrzymałości oraz odchylenie standardowe.

Tablica 28. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Pulsar

Miejsce badania	Wytrzymałość drewna na zginane f_m wg (18), (23) lub (27)
M1 (krokiew)	33,80
M2 (słup)	33,83
M3 (krokiew)	28,56
M4 (krokiew)	28,89
M5 (krokiew)	28,87
M6 (krokiew)	28,33
M7 (krokiew)	31,44
M8 (słup)	31,35
M9 (słup wieży)	31,70
M10 (słup wieży)	32,36
M11 (krokiew wieży)	32,21
M12 (krokiew wieży)	33,87
M13 (krokiew wieży)	29,61
M14 (krokiew wieży)	29,06

U1 (krokiew)	27,42
U2 (słup)	27,34
U3 (krokiew)	27,42
U4 (krokiew)	27,34
U5 (krokiew)	28,64
U6 (krokiew)	28,64
U7 (krokiew)	27,64
U8 (słup)	28,33
U7 (krokiew)	28,25
U8 (krokiew)	27,72
U9 (słup)	28,48
U10 (krokiew)	28,25
U11 (krokiew)	27,57
U12 (słup)	27,34
U13 (krokiew narożna)	27,49
U14 (krokiew)	26,67
U15 (krokiew)	25,35
U16 (słup wieży)	25,93
U17 (słup wieży)	27,87
U18 (krokiew wieży)	27,57
U19 (krokiew wieży)	27,34
U20 (krokiew wieży)	29,50
U21 (krokiew wieży)	29,03
U22 (krokiew narożna wieży)	27,04
UP1 (krokiew)	28,46
UP2 (słup)	28,61
UP3 (krokiew)	28,75
UP4 (krokiew)	28,61
UP5 (krokiew)	29,04
UP6 (krokiew)	28,75
UP7 (słup wieży)	28,75
UP8 (krokiew wieży)	28,75
UP9 (krokiew wieży)	29,04
UP10 (krokiew wieży)	28,75
UP11 (krokiew narożna wieży)	28,32
Średnia f_{mean}, MPa	28,86
Odchylenie standardowe s, MPa	1,90

Określenie 5% kwantyla wytrzymałości drewna

Obliczono 5% kwantyl wytrzymałości drewna według wzoru (5):

$$f_{05} = f_{mean} - t_{\gamma} s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} = 28,86 - 1,66 \cdot 1,9 \sqrt{1 + \frac{1}{49}} = 25,67 \text{ MPa}$$

Charakterystyczna wytrzymałość drewna

Obliczono charakterystyczną wytrzymałość drewna według wzoru (4):

$$f_k = f_{05} k_v = 25,67 \cdot 1,12 = 28,75 \text{ MPa}$$

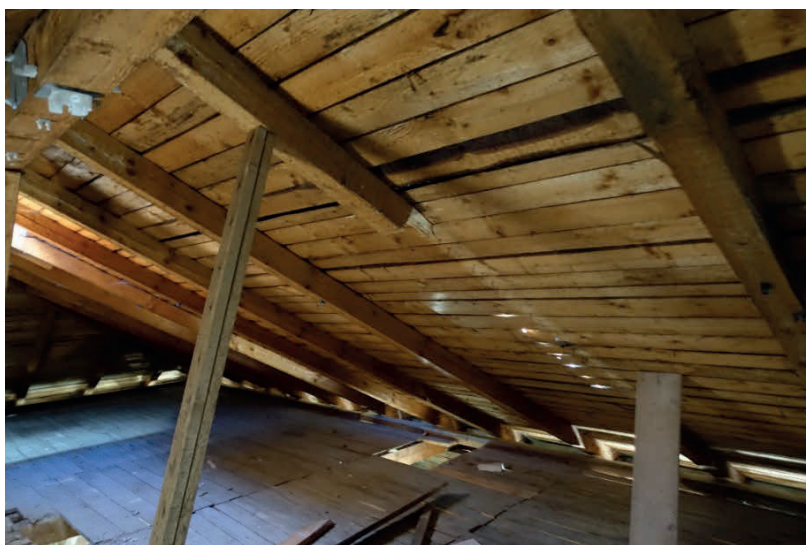
Określenie klasy drewna

Na podstawie tabl. 1 PN-EN 338 przyjęto klasę drewna jako C27.

9.2.3. Porównanie z wynikami badań niszczących

Z więźby, za zgodą konserwatora zabytków, pobrano jedną belkę do badań.

Widok miejsca pobrania pokazano na rys. 96.



Rys. 96. Miejsce pobrania krokwi do badań

Badana belka oznaczona została symbolem I-1. Uzyskała ona naprężenie niszczące (bez współczynników k_h i k_l) równe 49,2 MPa, a po uwzględnieniu współczynników zmniejszających z uwagi na wysokość i rozpiętość naprężenie niszczące wyniosło 42,1 MPa.

Średnia wytrzymałość uzyskana z badań nieniszczących i semi-nieniszczących wynosi 28,86, a wytrzymałość maksymalna to 33,87 MPa. Można zatem stwierdzić, że proponowana metodyka daje w tym przypadku bezpieczne oszacowanie wytrzymałości na zginanie.

9.3. Wieźba dachowa kościoła

9.3.1. Krótka historia obiektu

Budowa kościoła P.W. Św. Stanisława Biskupa i Męczennika w Czeladzi rozpoczęła się w 1904 r., a z kończyła 1913 r. Budynek kościoła jest obiektem wolnostojącym na planie krzyża łacińskiego i reprezentuje cechy stylu neoromańskiego. Kościół wpisany został do rejestru zabytków nieruchomych pod numerami A-1269/81 i A/747/2021.

Budynek przekryty jest złożonym, wielospadowym dachem. Na niższym poziomie zabudowano dach nad nawami bocznymi (rys. 14), a wyżej zabudowano konstrukcję dachu nad nawą środkową, prezbiterium i transeptem. Jeszcze wyżej znajdują się konstrukcje dachów nad rotundą i dwiema wieżami.

Konstrukcja wieźby dachowej została wykonana z dachu pulpitowego w nawach bocznych, wieźby wieszarowej dwuwieszakowej w części kościoła prostopadłej do prezbiterium, wieźby wieszarowej, jednowieszakowej ze stolcami ukośnymi i poziomym ściągami stalowym w dolnej części wiązara (nawa główna, prezbiterium i transept kościoła), czterospadowych dachów

krokwiowych na dwóch wieżach i sześciospadowego dachu nad rotundą. Widok budynku kościoła pokazano na rys. 97, a widoki więźb więźby wieszarowej dwuwieszakowej oraz jednowieszakowej ze stolcami ukośnymi i poziomym ściąganiem stalowym nad nawą na rys. 98 i 99.



Rys. 97. Widok budynku kościoła



Rys. 98. Więżba wieszarowa dachu niższego



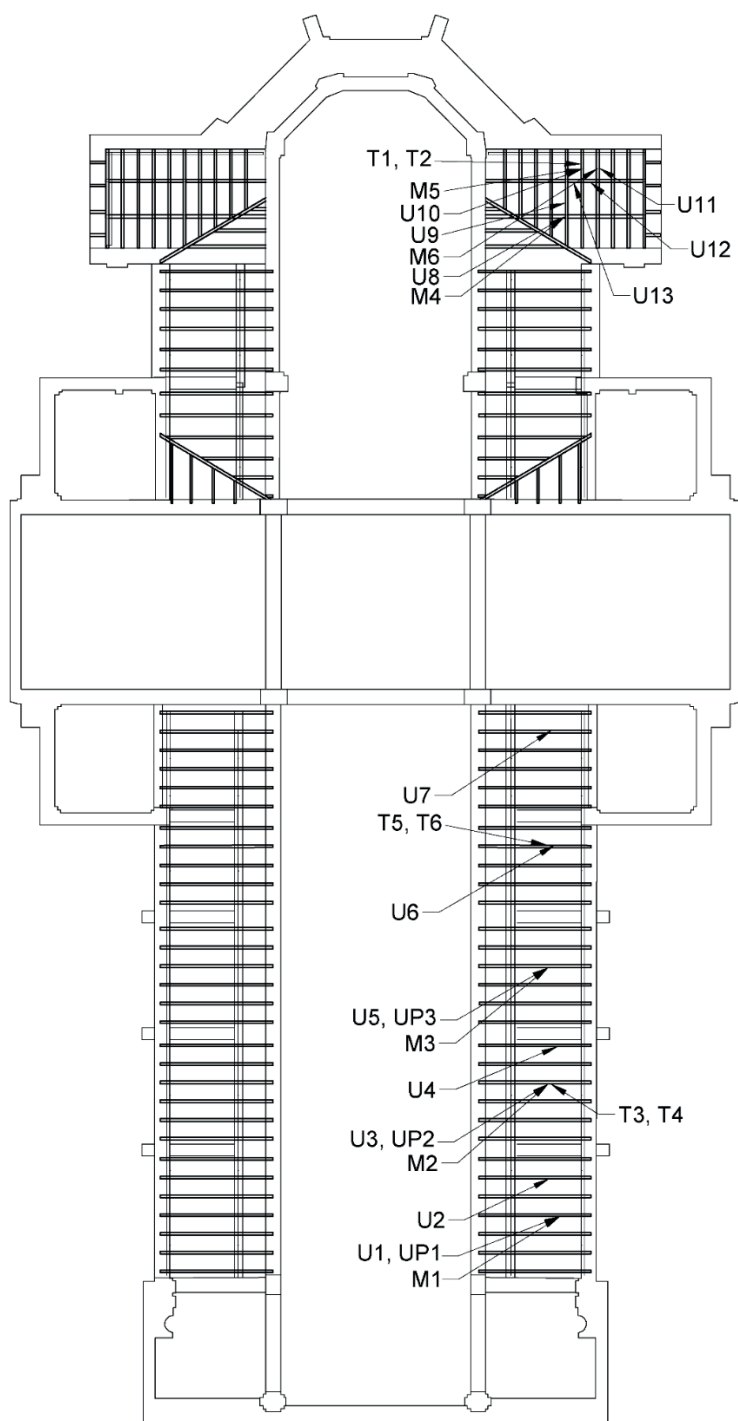
Rys. 99. Więżba wieszarowa nad nawą. Wiażar pełny ze ściągami stalowymi i widoczną podwieszoną do niego kładką drewnianą

9.3.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką

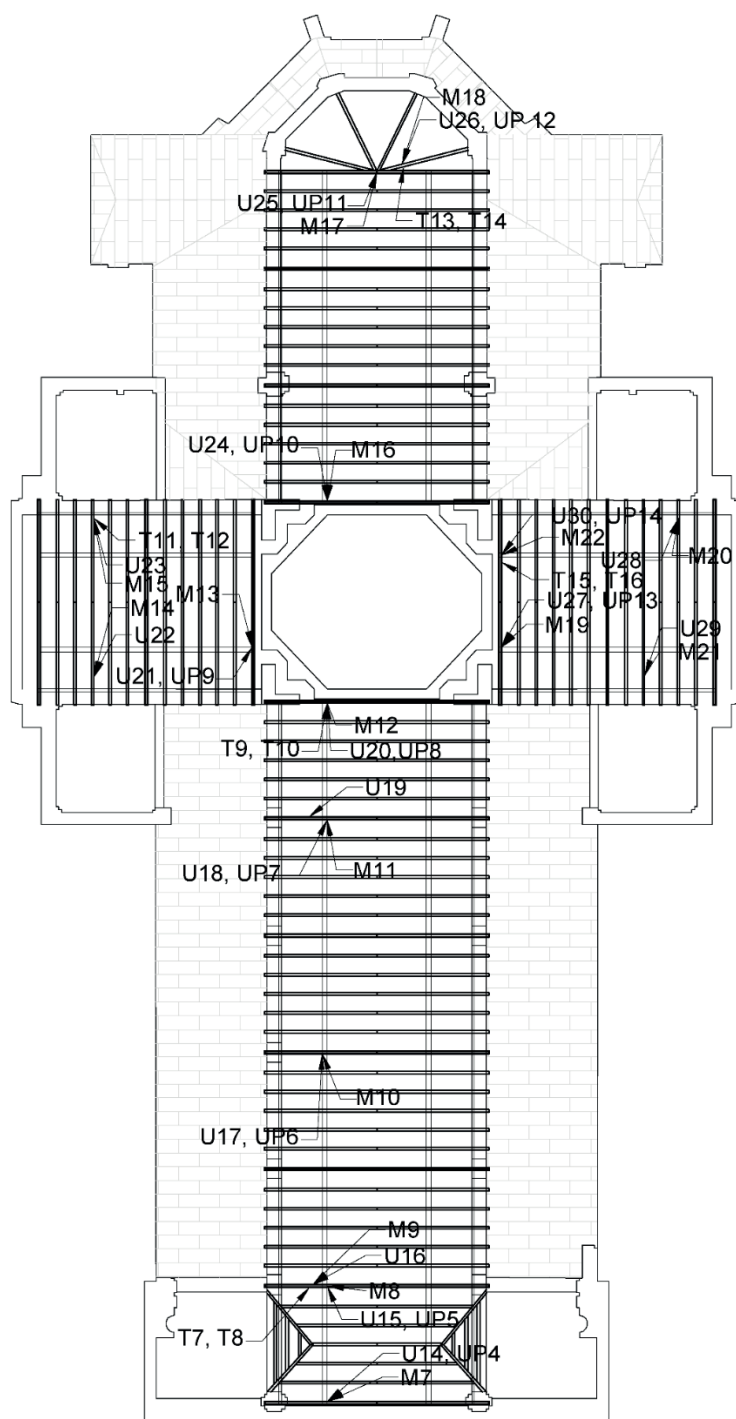
Wytypowanie elementów do badań

Do badań wytypowano wybrane elementy więźby dachowej, pokazane na rys. 100 i 101. Miejsca badań tomografem (14 skanów) oznaczono literą T i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań młotkiem do drewna (22 punkty) oznaczono literą M i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1401 SURFER (30 miejsc) oznaczono literą U i kolejną cyfrą arabską, natomiast miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1410 PULSAR (14 miejsc) oznaczono literą UP i kolejną cyfrą arabską.

Elementy więźby dachowej wykonano z drewna sosnowego. W miejscach pokazanych na rys. 100 i 101 wykonano badania wilgotności urządzeniem T510. Uzyskano wilgotności z przedziału $12,6 \div 14,0\%$, średnio $12,8\%$.



Rys. 100. Miejsca badań nieniszczących i semi-nieniszczących na więźbie dachu niższego

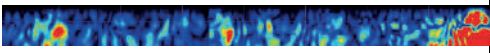
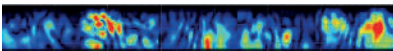
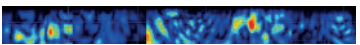
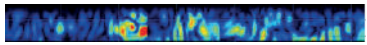
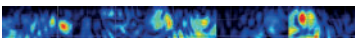
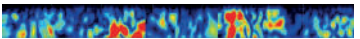
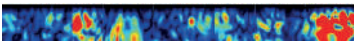
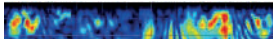
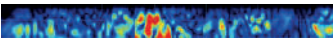


Rys. 101. Miejsca badań nieniszczących i semi-nieniszczących na więźbie dachu wyższego

Badanie tomografem ultradźwiękowym

Przeprowadzono badania tomografem ultradźwiękowym wybranych elementów. Badania prowadzono na dwóch sąsiednich płaszczyznach elementów, dzięki czemu uzyskano rzut wszystkich wad na dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny. Obliczono procentowy udział rzutu wad na obie badane powierzchnie według wzoru (17). Wyniki badań zestawiono w tablicy 29. Jedynie w jednym z badanych elementów procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ był mniejszy od 10%.

Tablica. 29. Wyniki badań tomografem ultradźwiękowym

Nr belki	Obraz uzyskany z tomografu ultradźwiękowego	Długość skanu, L_i m	powierzchnia wad na jednej płaszczyźnie A_i , cm ²	procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ wg (17), %
T1, T2		1,50	254,69	12,4
		1,45	118,52	
T3, T4		1,05	213,98	18,21
		1,05	175,55	
T5, T6		1,03	130,61	9,57
		1,03	98,32	
T7, T8		1,05	135,04	13,17
		1,05	116,17	
T9, T10		1,05	216,38	23,12
		1,05	231,61	
T11, T12		0,84	150,52	20,48
		1,05	246,88	
		1,05	155,47	14,88

T13, T14		1,05	131,61	
T15, T16		1,05	26,74	11,02
		1,05	195,79	

Wykonanie badań nieniszczących i semi-nieniszczących

W miejscach pokazanych na rys. 100 i 101 wykonano badania młotkiem do drewna oraz urządzeniami UK 1401 SURFER i UK 1410 PULSAR. Wyniki badań zamieszczono w tablicach 30÷32. W przypadku młotka do drewna wyniki skorygowano o współczynnik poprawkowy zgodnie z tablicą 18.

Tablica 30. Wyniki badań młotkiem do drewna

Miejsce badania		Głębokość wbicia igły, mm	Skorygowana głębokość wbicia igły wg tabl. 18, mm
Wieżba dolna	M1 (krokiew)	24,86	25,55
	M2 (krokiew)	24,89	25,58
	M3 (krokiew)	25,55	26,24
	M4 (wieszak)	25,75	25,75
	M5 (krokiew)	25,34	26,03
	M6 (krokiew)	25,21	25,9
Wieżba górna	M7 (wieszak)	24,86	24,86
	M8 (wieszak)	23,95	23,95
	M9 (zastrzał)	25,49	26,18
	M10 (wieszak)	25,83	25,83
	M11 (wieszak)	24,15	24,15
	M12 (wieszak)	20,62	20,62
	M13 (wieszak)	24,42	24,42
	M14 (krokiew)	23,71	24,4
	M15 (krokiew)	22,79	23,48
	M16 (zastrzał)	23,27	23,27
	M17 (wieszak)	23,79	23,79
	M18 (zastrzał)	23,29	23,29
	M19 (wieszak)	24,55	24,55
	M20 (krokiew)	24,68	25,37
	M21 (krokiew)	24,52	25,21
	M22 (wieszak)	24,74	24,74

Tablica 31. Wyniki badań urządzeniem UK1401 Pulsar

Miejsce badania		Prędkość ultradźwięku, m/s
Wieżba dolna	UP1 (krokiew)	1840
	UP2 (krokiew)	1920
	UP3 (krokiew)	1720
Wieżba górna	UP4 (wieszak)	2010
	UP5 (wieszak)	1650
	UP6 (wieszak)	1990
	UP7 (wieszak)	1950
	UP8 (wieszak)	1990
	UP9 (wieszak)	1690
	UP10 (wieszak)	1920
	UP11 (wieszak)	1820
	UP12 (wieszak)	2010
	UP13 (wieszak)	1850
	UP14 (wieszak)	1890

Tablica 32. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Surfer

Miejsce badania		Prędkość ultradźwięku, m/s
Wieżba dolna	U1 (krokiew)	6020
	U2 (krokiew)	5800
	U3 (krokiew)	5260
	U4 (krokiew)	5730
	U5 (krokiew)	5510
	U6 (krokiew)	5680
	U7 (krokiew)	5600
	U8 (wieszak)	5110
	U9 (rozpór)	5140
	U10 (krokiew)	5370
	U11 (krokiew)	5450
	U12 (płatew)	4940
	U13 (miecz)	5370
Wieżba górna	U14 (wieszak)	4600
	U15 (wieszak)	4660
	U16 (zastrzał)	5490
	U17 (wieszak)	5430
	U18 (wieszak)	5140
	U19 (zastrzał)	4990
	U20 (wieszak)	5320
	U21 (wieszak)	5520
	U22 (krokiew)	5520

	U23 (krokiew)	5300
	U24 (wieszak)	5820
	U25 (wieszak)	5120
	U26 (zastrzał)	5820
	U27 (wieszak)	4700
	U28 (krokiew)	5430
	U29 (krokiew)	5730
	U30 (wieszak)	5790

Obliczenia wytrzymałości na zginanie

Obliczono wytrzymałości na zginanie według wzorów (19), (24) i (28) w zależności od zastosowanego urządzenia. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 33. Na końcu tablicy podano wartość średnią wytrzymałości oraz odchylenie standardowe.

Tablica 33. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Pulsar

Miejsce badania	Wytrzymałość drewna na zginane f_m wg (19), (24) lub (28)
M1 (krokiew)	9,97
M2 (krokiew)	9,92
M3 (krokiew)	8,95
M4 (wieszak)	9,66
M5 (krokiew)	9,25
M6 (krokiew)	9,44
M7 (wieszak)	11,09
M8 (wieszak)	12,72
M9 (zastrzał)	9,03
M10 (wieszak)	9,54
M11 (wieszak)	12,35
M12 (wieszak)	20,16
M13 (wieszak)	11,85
M14 (krokiew)	11,89
M15 (krokiew)	13,63
M16 (zastrzał)	14,05
M17 (wieszak)	13,02
M18 (zastrzał)	14,01
M19 (wieszak)	11,62
M20 (krokiew)	10,25
M21 (krokiew)	10,51

M22 (wieszak)	11,29
U1 (krokiew)	18,03
U2 (krokiew)	17,92
U3 (krokiew)	15,24
U4 (krokiew)	17,55
U5 (krokiew)	16,43
U6 (krokiew)	17,29
U7 (krokiew)	16,88
U8 (wieszak)	14,57
U9 (rozpór)	14,70
U10 (krokiew)	15,75
U11 (krokiew)	16,14
U12 (płatew)	13,85
U13 (miecz)	15,75
U14 (wieszak)	12,50
U15 (wieszak)	12,73
U16 (zastrzał)	16,33
U17 (wieszak)	16,04
U18 (wieszak)	14,70
U19 (zastrzał)	14,06
U20 (wieszak)	15,52
U21 (wieszak)	16,48
U22 (krokiew)	16,48
U23 (krokiew)	15,43
U24 (wieszak)	18,03
U25 (wieszak)	14,61
U26 (zastrzał)	18,03
U27 (wieszak)	12,88
U28 (krokiew)	16,04
U29 (krokiew)	17,55
U30 (wieszak)	17,87
UP1 (krokiew)	17,28
UP2 (krokiew)	18,81
UP3 (krokiew)	15,14
UP4 (wieszak)	16,72
UP5 (wieszak)	13,98
UP6 (wieszak)	20,23
UP7 (wieszak)	19,41
UP8 (wieszak)	20,23
UP9 (wieszak)	14,63
UP10 (wieszak)	18,81
UP11 (wieszak)	16,91
UP12 (wieszak)	16,72
UP13 (wieszak)	17,46

UP14 (wieszak)	18,23
Średnia f_{mean}, MPa	14,76
Odchylenie standardowe s, MPa	3,10

Określenie 5% kwantyla wytrzymałości drewna

Obliczono 5% kwantyl wytrzymałości drewna według wzoru (5):

$$f_{05} = f_{mean} - t_{\gamma} s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} = 14,76 - 1,64 \cdot 3,10 \sqrt{1 + \frac{1}{66}} = 9,64 \text{ MPa}$$

Charakterystyczna wytrzymałość drewna

Obliczono charakterystyczną wytrzymałość drewna według wzoru (4):

$$f_k = f_{05} k_v = 9,64 \cdot 1,12 = 10,79 \text{ MPa}$$

Określenie klasy drewna

Na podstawie tabl. 1 PN-EN 338 stwierdzono, że drewno nie spełnia klasy C14.

9.3.3. Porównanie z wynikami badań niszczących

Z więźby, za zgodą konserwatora zabytków, pobrano jedną belkę do badań.

Badana belka oznaczona została symbolem XXVI-1. Uzyskała ona naprężenie niszczące (bez współczynników k_h i k_l) równe 19,94 MPa, a po uwzględnieniu współczynników zmniejszających z uwagi na wysokość i rozpiętość naprężenie niszczące wyniosło 15,9 MPa.

Średnia wytrzymałość uzyskana z badań nieniszczących i semi-nieniszczących wynosi 14,76 MPa. Można zatem stwierdzić, że proponowana metodyka daje w tym przypadku bezpieczne oszacowanie wytrzymałości na zginanie.

9.4. Więżba średniowiecznego zamku

9.4.1. Krótka historia obiektu

Zamek Kapituły Warmińskiej jest najstarszą budowlą dzisiejszego Olsztyna i jednym z cenniejszych zabytków gotyku ceglanego. Zamek zaliczano do głównych warowni największego komornictwa kapitularnego, które odpowiadało za procesy lokacyjne na Warmii. Pierwsze wzmianki o obiekcie pochodzą z aktu lokacyjnego miasta Allenstein z 1353 r. Północne skrzydło zamkowe powstawało łącznie z murami kurtynowymi, zamykającymi dziedziniec zamkowy. Jego budowę zakończono w 1373 r. Podpiwniczone skrzydło północne pełniło funkcje mieszkalno-reprezentacyjne oraz gospodarcze. Piwnice piętra i poddasze pełniły rolę magazynów. Na pierwszym piętrze rezydował administrator komory olsztyńskiej. Na uwagę zasługuje fakt, że w latach 1516-1521, rolę administratora pełnił Mikołaj Kopernik. Obecnie refektarz i mieszkanie przekrywają sklepienia kryształowe, ale pierwotnie były nakryte stropami belkowymi (przebudowa wykonana prawdopodobnie przez mistrza Matza z Gdańska w latach 1510-1520). Piętro mieściło kaplicę przekrytą sklepieniem gwiazdzystym. Około roku 1429 ukończono budowę południowego skrzydła. Powstało jako czteropiętrowe założenie z nadwieszoną na pierwotnym murze kurtynowym hurdycją [106], [119]. W epoce baroku przebudowano mur wschodni na reprezentacyjne skrzydło mieszkalne. Wartość historyczna zabytku jest bardzo cenna z uwagi na autentyzm oryginalnej tkanki historycznej. Więżba dachowa nad skrzydłem północnym powstała w 1353 r. Ma układ storczykowy zredukowany podłużnie i poprzecznie. Jest to więźba jednostorczykowa, trójjętkowa ze storczykiem w co drugim wiązarze. Wykonana została, jak większość ówczesnych konstrukcji na terenach Warmii i Prus krzyżackich z drewna sosnowego wbudowanego bezpośrednio po ostatniej ścinie. Świadczą o tym podłużne spękania powstałe w wyniku wysychania drewna przebiegające przez znaki

ciesielskie. Drewno wysychało po obrobieniu belek i wbudowaniu ich w konstrukcję dachu. Południowe skrzydło zamku zwieńczone jest również wieżą storczykową zredukowaną podwójnie z 1429 roku. Jest to wieża jednostorczykowa, trójjętkowa, ze storczykiem w co drugim wiązarze zawieszonym w kalenicy i na jętkach całkowitych. Zarówno wieża jak i hurdycja wykonane są z drewna sosnowego. Sposób wykonania wieży wskazuje na bogate praktyczne doświadczenie warsztatu ciesielskiego [106], [119]. Na rys. 102 pokazano widok obiektu, a na rys. 103 i 104 widok wieży północnej i południowej.



Rys. 102. Widok Zamku Kapituły Warmińskiej w Olsztynie: a) skrzydło północne, b) skrzydło południowe z hurdycją



Rys. 103. Więżba storczykowa skrzydła północnego



Rys. 104. Więżba storczykowa skrzydła południowego

9.4.2. Określenie wytrzymałości drewna zgodnie z zaproponowaną metodyką

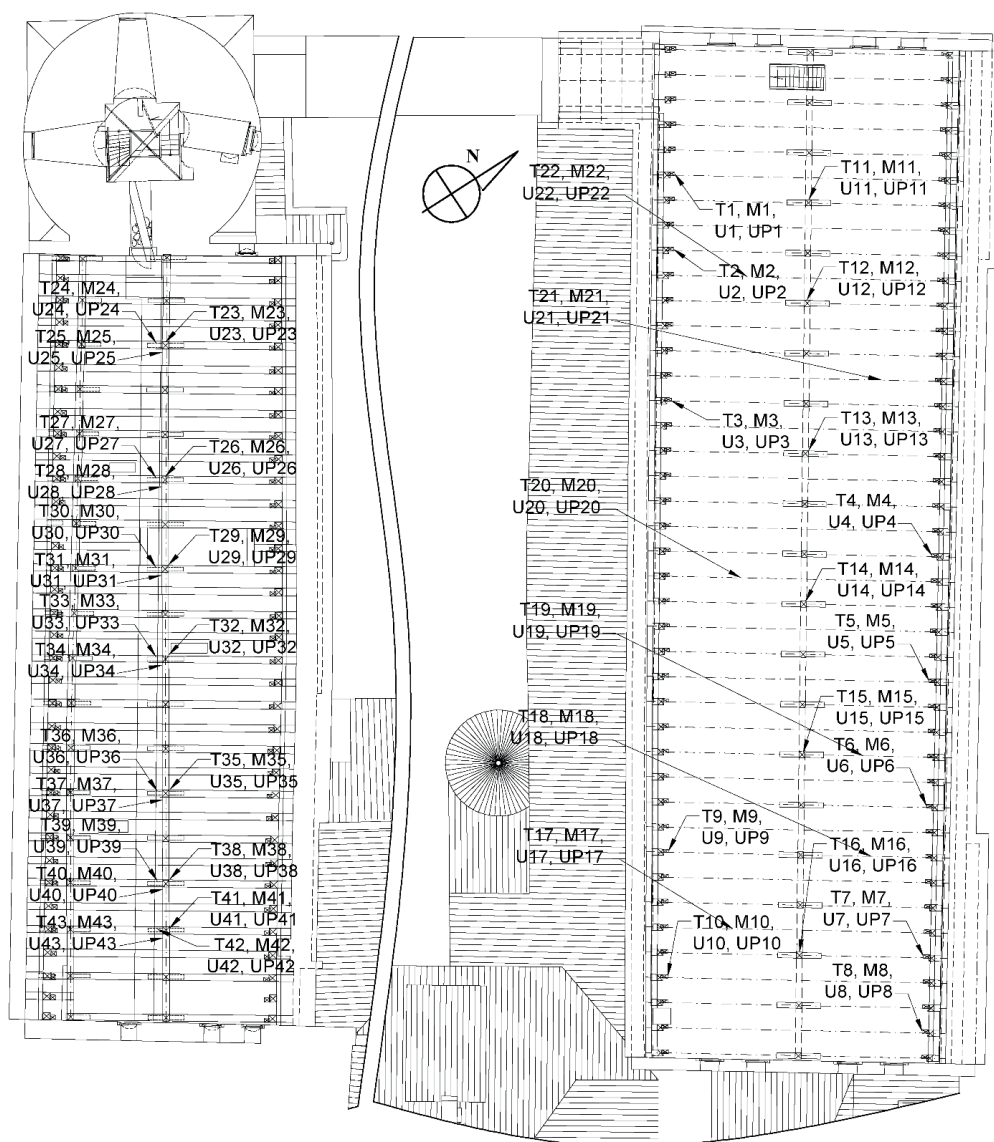
Wytypowanie elementów do badań

Do badań wytypowano wybrane elementy więźby dachowej, pokazane na rys. 105. Miejsca badań tomografem (86 skanów) oznaczono literą T i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań młotkiem do drewna (43 punkty) oznaczono literą M i kolejną cyfrą arabską, miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1401 SURFER (43 miejsca) oznaczono literą U i kolejną cyfrą arabską, natomiast miejsca badań urządzeniem ultradźwiękowym UK 1410 PULSAR (43 miejsca) oznaczono literą UP i kolejną cyfrą arabską.

Elementy więźby dachowej wykonano z drewna sosnowego. W miejscach pokazanych na rys. 94 wykonano badania wilgotności urządzeniem T510. W więźbie północnej uzyskano wilgotności z przedziału $14,4 \div 15,7\%$, średnio $14,7\%$, a w więźbie południowej z przedziału $14,7 \div 18,2\%$, średnio $16,6\%$.

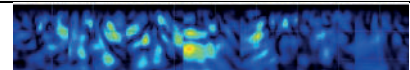
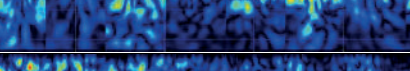
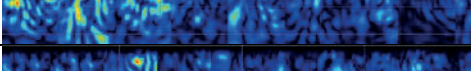
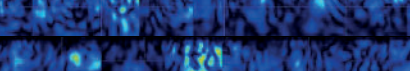
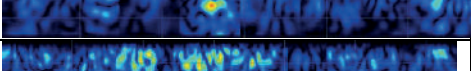
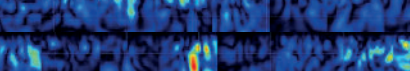
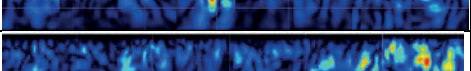
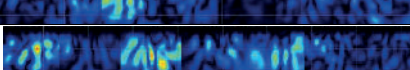
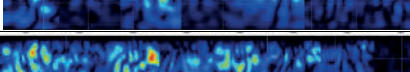
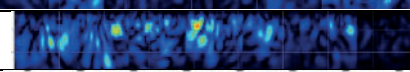
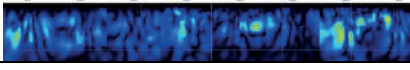
Badanie tomografem ultradźwiękowym

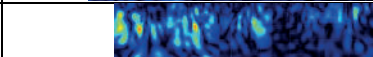
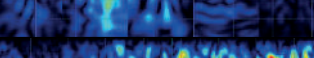
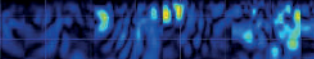
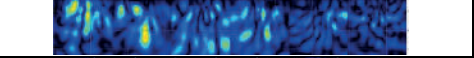
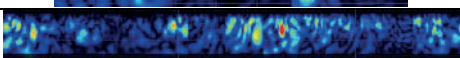
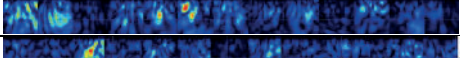
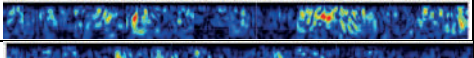
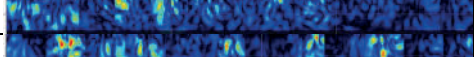
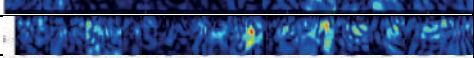
Przeprowadzono badania tomografem ultradźwiękowym wybranych elementów. Badania prowadzono na dwóch sąsiednich płaszczyznach elementów, dzięki czemu uzyskano rzut wszystkich wad na dwie prostopadłe do siebie płaszczyzny. Obliczono procentowy udział rzutu wad na obie badane powierzchnie według wzoru (17). Wyniki badań zestawiono w tablicy 34. Stwierdzono zaskakująco mało uszkodzeń. We wszystkich 86 skanach procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ był mniejszy od 10%. Widok tomografu podczas badań pokazano na rys. 106.

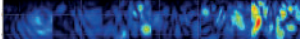
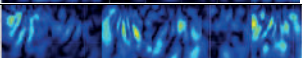
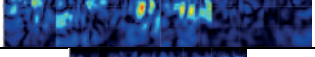
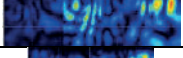
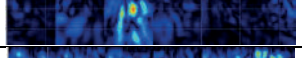
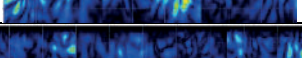
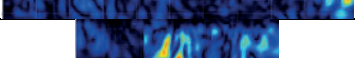
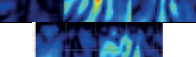
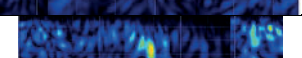
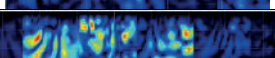
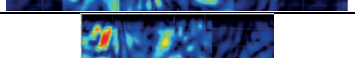
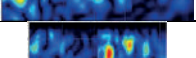
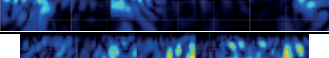


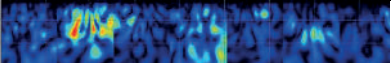
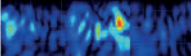
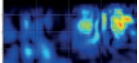
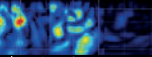
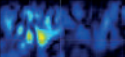
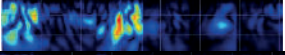
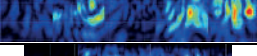
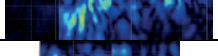
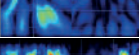
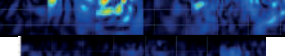
Rys. 105. Miejsca badań nieniszczących i semi-niszczących na wieżbie zamku w Olsztynie

Tablica. 34. Wyniki badań tomografem ultradźwiękowym

Nr belki	Obraz uzyskany z tomografu ultradźwiękowego	Długość skanu, L_i m	powierzchnia wad na jednej płaszczyźnie A_i , cm ²	procentowy udział rzutu wad $A_{1,2}$ wg (17), %
T1		1,40	200,33	6,48
		1,67	230,37	
T2		1,46	134,18	3,70
		1,65	74,67	
T3		1,61	228,13	6,09
		1,83	197,32	
T4		2,05	103,20	2,59
		1,68	106,36	
T5		1,65	200,28	5,21
		1,70	178,02	
T6		1,68	234,02	4,72
		1,63	97,10	
T7		1,68	173,56	5,09
		1,45	176,76	
T8		1,65	301,52	2,11
		1,65	106,33	
T9		1,47	144,55	4,89
		1,68	175,60	

T10		1,65	191,89	5,34
		1,25	122,17	
T11		0,97	162,95	5,84
		1,05	69,04	
T12		1,05	129,16	5,28
		1,04	104,80	
T13		1,05	203,23	6,49
		1,25	113,34	
T14		1,05	357,97	8,69
		1,27	63,65	
T15		1,05	87,78	6,92
		1,25	249,09	
T16		1,25	155,30	5,50
		1,27	120,97	
T17		3,05	396,42	7,87
		3,05	637,66	
T18		2,75	203,15	2,80
		2,73	136,52	
T19		2,65	208,74	2,70
		2,65	105,71	
T20		2,65	487,60	6,39
		3,05	257,99	
T21		2,65	374,93	5,25
		2,65	216,48	
T22		2,85	278,93	3,56
		3,05	166,46	

T23		1,27	114,69	4,97
		1,22	138,74	
T24		0,42	102,55	9,71
		0,63	124,42	
T25		1,25	100,95	4,56
		1,25	222,47	
T26		1,43	0	2,58
		1,26	144,85	
T27		0,63	73,83	8,79
		0,42	110,68	
T28		1,25	58,48	4,27
		1,25	175,23	
T29		1,25	95,15	2,49
		1,45	35,38	
T30		0,63	144,22	9,63
		0,42	53,57	
T31		1,25	116,99	2,84
		1,25	31,41	
T32		1,05	75,92	2,08
		1,25	251,26	
T33		0,63	108,76	8,71
		0,42	78,93	
T34		1,25	155,65	6,41
		1,05	149,99	
T35		1,25	135,49	6,16

		1,48	233,37	
T36		0,63	77,94	7,48
		0,42	70,07	
T37		1,27	106,75	5,57
		1,25	210,76	
T38		1,25	295,68	9,72
		1,05	186,88	
T39		0,63	134,88	7,95
		0,42	35,18	
T40		1,25	214,07	5,29
		1,25	70,66	
T41		1,45	231,54	8,80
		1,05	216,81	
T42		0,83	78,66	4,63
		0,42	32,71	
T43		1,25	155,47	3,07
		1,05	0	



Rys. 106. Badanie tomografem ultradźwiękowym na więźbie północnej zamku w Olsztynie

Wykonanie badań nieniszczących i semi-nieniszczących

W miejscach pokazanych na rys. 105 wykonano badania młotkiem do drewna oraz urządzeniami UK 1401 SURFER i UK 1410 PULSAR (rys. 107). Wyniki badań zamieszczono w tablicach 35÷37. W przypadku młotka do drewna wyniki skorygowano o współczynnik poprawkowy zgodnie z tablicą 18.



Rys. 107. Badania więźby urządzeniami: a) młotek do drewna Wood Peko DRC, b) UK 1401 SURFER, c) UK 1410 PULSAR

Tablica 35. Wyniki badań młotkiem do drewna

Miejsce badania		Głębokość wbicia igły, mm	Skorygowana głębokość wbicia igły wg tabl. 18, mm
Więźba północna	M1 krokiew	19,78	20,68
	M2 krokiew	17,26	18,16
	M3 krokiew	17,86	18,76
	M4 krokiew	19,16	20,06
	M5 krokiew	17,29	18,19
	M6 krokiew	19,2	20,1

	M7 krokiew	14,87	15,77
	M8 krokiew	16,07	16,97
	M9 krokiew	21,99	22,89
	M10 krokiew	20,42	21,32
	M11 storczyk	23,8	23,8
	M12 storczyk	19,47	19,47
	M13 storczyk	19,19	19,19
	M14 storczyk	17,68	17,68
	M15 storczyk	18,77	18,77
	M16 storczyk	19,5	19,5
	M17 jętka	17,36	18,66
	M18 jętka	19,31	20,61
	M19 jętka	17,05	18,35
	M20 jętka	19	20,3
	M21 jętka	19,02	20,32
	M22 jętka	19,46	20,76
Więźba południowa	M23 storczyk	20,65	20,65
	M24 miecz	22,49	23,18
	M25 płatew	19,69	20,99
	M26 storczyk	16,74	16,74
	M27 miecz	18,25	18,94
	M28 płatew	19,51	20,81
	M29 storczyk	18,33	18,33
	M30 miecz	22,43	23,12
	M31 płatew	21,66	23,90
	M32 storczyk	24,93	24,93
	M33 miecz	18,42	19,11
	M34 płatew	15,98	17,28
	M35 storczyk	18	18
	M36 miecz	19,97	20,66
	M37 płatew	22,23	23,53
	M38 storczyk	20,31	20,31
	M39 miecz	19,96	20,65
	M40 płatew	17,85	19,15
	M41 storczyk	20,45	20,45
	M42 miecz	21,96	22,65
	M43 płatew	20,79	22,09

Tablica 36. Wyniki badań urządzeniem UK1401 Pulsar

Miejsce badania		Prędkość ultradźwięku, m/s
Więźba północna	UP1 krokiew	1865
	UP2 krokiew	1493
	UP3 krokiew	1730
	UP4 krokiew	1770
	UP5 krokiew	1680
	UP6 krokiew	1710
	UP7 krokiew	1490
	UP8 krokiew	1570
	UP9 krokiew	1960
	UP10 krokiew	1830
	UP11 storczyk	1590
	UP12 storczyk	1700
	UP13 storczyk	1650
	UP14 storczyk	1860
	UP15 storczyk	1790
	UP16 storczyk	1610
	UP17 jętka	1510
	UP18 jętka	1650
	UP19 jętka	1670
	UP20 jętka	1860
	UP21 jętka	1720
	UP22 jętka	1530
Więźba południowa	UP23 storczyk	1700
	UP24 miecz	1647
	UP25 płatew	1730
	UP26 storczyk	1800
	UP27 miecz	1659
	UP28 płatew	1690
	UP29 storczyk	1540
	UP30 miecz	1580
	UP31 płatew	1800
	UP32 storczyk	1730
	UP33 miecz	1960
	UP34 płatew	1680
	UP35 storczyk	1370
	UP36 miecz	1640

	UP37 płatew	1460
	UP38 storczyk	1610
	UP39 miecz	1510
	UP40 płatew	1480
	UP41 storczyk	1700
	UP42 miecz	1800
	UP43 płatew	1420

Tablica 37. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Surfer

Miejsce badania		Prędkość ultradźwięku, m/s
Wieżba północna	U1 krokiew	5360
	U2 krokiew	5135
	U3 krokiew	4910
	U4 krokiew	4580
	U5 krokiew	5720
	U6 krokiew	5720
	U7 krokiew	6045
	U8 krokiew	5965
	U9 krokiew	5740
	U10 krokiew	5385
	U11 storczyk	5650
	U12 storczyk	5645
	U13 storczyk	5555
	U14 storczyk	5285
	U15 storczyk	5820
	U16 storczyk	5820
	U17 jętka	5780
	U18 jętka	5820
	U19 jętka	4780
	U20 jętka	5380
	U21 jętka	5710
	U22 jętka	6100
Wieżba południowa	U23 storczyk	5560
	U24 miecz	5520
	U25 płatew	5620
	U26 storczyk	5650
	U27 miecz	5760

	U28 płatew	5430
	U29 storczyk	5600
	U30 miecz	5550
	U31 płatew	5510
	U32 storczyk	5750
	U33 miecz	5740
	U34 płatew	5710
	U35 storczyk	6430
	U36 miecz	5770
	U37 płatew	5820
	U38 storczyk	5810
	U39 miecz	5781
	U40 płatew	5710
	U41 storczyk	5520
	U42 miecz	5650
	U43 płatew	5170

Obliczenia wytrzymałości na zginanie

Obliczono wytrzymałości na zginanie według wzorów (18), (23) i (27) w zależności od zastosowanego urządzenia. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 38. Na końcu tablicy podano wartość średnią wytrzymałości oraz odchylenie standardowe.

Tablica 38. Wyniki badań urządzeniem UK1410 Surfer

Miejsce badania		Wytrzymałość drewna na zginane f_m wg (18), (23) lub (27)
Wieżba północna	M1 krokiew	28,39
	M2 krokiew	33,87
	M3 krokiew	32,52
	M4 krokiew	29,69
	M5 krokiew	33,80
	M66 krokiew	29,61
	M7 krokiew	39,57
	M8 krokiew	36,65

	M9 krokiew	24,04
	M10 krokiew	27,09
	M11 storczyk	22,36
	M12 storczyk	30,96
	M13 storczyk	31,57
	M14 storczyk	34,98
	M15 storczyk	32,50
	M16 storczyk	30,89
	M17 jętka	32,74
	M18 jętka	28,54
	M19 jętka	33,44
	M20 jętka	29,19
	M21 jętka	29,14
	M22 jętka	28,23
Więźba południowa	M23 storczyk	28,46
	M24 miecz	23,49
	M25 płatew	27,76
	M26 storczyk	37,20
	M27 miecz	32,12
	M28 płatew	28,13
	M29 storczyk	33,49
	M30 miecz	23,61
	M31 płatew	23,90
	M32 storczyk	20,38
	M33 miecz	31,74
	M34 płatew	35,91
	M35 storczyk	34,24
	M36 miecz	28,44
	M37 płatew	22,85
	M38 storczyk	29,17
	M39 miecz	28,46
	M40 płatew	31,66
	M41 storczyk	28,87
	M43 miecz	24,49
	M43 płatew	25,57
Więźba północna	UP1 krokiew	27,23
	UP2 krokiew	21,75
	UP3 krokiew	25,26

	UP4 krokiew	25,85
	UP5 krokiew	24,52
	UP6 krokiew	24,97
	UP7 krokiew	21,71
	UP8 krokiew	22,90
	UP9 krokiew	28,61
	UP10 krokiew	26,72
	UP11 storczyk	23,20
	UP12 storczyk	24,82
	UP13 storczyk	24,08
	UP14 storczyk	27,16
	UP15 storczyk	26,14
	UP16 storczyk	23,49
	UP17 jętka	22,01
	UP18 jętka	24,08
	UP19 jętka	24,38
	UP20 jętka	27,16
	UP21 jętka	25,11
	UP22 jętka	22,31
Wieżba południowa	UP23 storczyk	24,82
	UP24 miecz	24,04
	UP25 płatew	25,26
	UP26 storczyk	26,28
	UP27 miecz	24,21
	UP28 płatew	24,67
	UP29 storczyk	22,45
	UP30 miecz	23,05
	UP31 płatew	26,28
	UP32 storczyk	25,26
	UP33 miecz	28,61
	UP34 płatew	24,52
	UP35 storczyk	19,91
	UP36 miecz	23,93
	UP37 płatew	21,26
	UP38 storczyk	23,49
	UP39 miecz	22,01
	UP40 płatew	21,56
	UP41 storczyk	24,82

	UP42 miecz	26,28
	UP43 płatew	20,66
Wieżba północna	U1 krokiew	24,36
	U2 krokiew	22,81
	U3 krokiew	21,32
	U4 krokiew	19,24
	U5 krokiew	26,97
	U6 krokiew	26,97
	U7 krokiew	29,46
	U8 krokiew	28,83
	U9 krokiew	27,12
	U10 krokiew	24,53
	U11 storczyk	26,45
	U12 storczyk	26,41
	U13 storczyk	25,75
	U14 storczyk	23,83
	U15 storczyk	27,72
	U16 storczyk	27,72
	U17 jętka	27,42
	U18 jętka	27,72
	U19 jętka	20,48
	U20 jętka	24,50
	U21 jętka	26,89
	U22 jętka	29,89
Wieżba południowa	U23 storczyk	25,79
	U24 miecz	25,50
	U25 płatew	26,23
	U26 storczyk	26,45
	U27 miecz	27,27
	U28 płatew	24,85
	U29 storczyk	26,08
	U30 miecz	25,72
	U31 płatew	25,43
	U32 storczyk	27,19
	U33 miecz	27,12
	U34 płatew	26,89
	U35 storczyk	32,57
	U36 miecz	27,34

	U37 płatew	27,72
	U38 storczyk	27,64
	U39 miecz	27,42
	U40 płatew	26,89
	U41 storczyk	25,50
	U42 miecz	26,45
	U43 płatew	23,04
Średnia f_{mean}, MPa		26,76
Odchylenie standardowe s, MPa		3,82

Określenie 5% kwantyla wytrzymałości drewna

Obliczono 5% kwantyl wytrzymałości drewna według wzoru (5):

$$f_{05} = f_{mean} - t_{\gamma} s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} = 26,76 - 1,64 \cdot 3,82 \sqrt{1 + \frac{1}{129}} = 20,478 \text{ MPa}$$

Charakterystyczna wytrzymałość drewna

Obliczono charakterystyczną wytrzymałość drewna według wzoru (4):

$$f_k = f_{05} k_v = 20,478 \cdot 1,12 = 22,94 \text{ MPa}$$

Określenie klasy drewna

Na podstawie tabl. 1 PN-EN 338 stwierdzono, że drewno można zakwalifikować do klasy C22.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W ramach dysertacji przeanalizowano możliwości wykorzystania metod nieniszczących i semi-nieniszczących do wyznaczenia wytrzymałości drewna starego. Wykonano badania wstępne na wieźbie zabytkowego kościoła w Sierotach z XV i XVIII w. Badania te wykazały, że wizualne oględziny pozwoliły na wykrycie 30÷50% uszkodzeń badanych elementów, a dokładne ich zobrazowanie było możliwe przy pomocy tomografu ultradźwiękowego. Stwierdzono, że do diagnostyki wad można również zastosować metody semi-nieniszczące i nieniszczące pozwalające na wykonaniu badania w konkretnym punkcie elementu. Uzyskanie odpowiedniej dokładności badań wymaga wtedy jednak ich prowadzenia w dość gęstej siatce pomiarowej. W ramach badań wstępnych wykonano 1257 badań nieniszczących i semi-nieniszczących.

W dalszej części pracy opisano wyniki własnych badań niszczących i nieniszczących elementów drewnianych. Do badań pozyskano 75 elementów drewnianych z terenu całej Polski, z czego badaniom niszczącym i nieniszczącym poddano 69 belek. Elementy pochodziły z ostatnich 500 lat – najstarszy z 1412 r., a najmłodszy z 1932 r. Wykonano badania nieniszczące i semi-nieniszczące trzema różnymi urządzeniami: młotkiem do drewna i urządzeniami ultradźwiękowymi analizującymi falę poprzeczną i podłużną. Belki przeskanowano ponadto tomografem ultradźwiękowym na dwóch płaszczyznach. Łącznie na belkach wykonano 2898 badań nieniszczących i semi-nieniszczących oraz 69 badań niszczących. Stworzono wykresy i wzory obrazujące korelację między badaniami niszczącymi i nieniszczącymi, co pozwala na określenie wytrzymałości na zginanie drewna już tylko na podstawie wyników badań nieniszczących.

Zaproponowano metodykę prowadzenia badań na obiektach zabytkowych, która uwzględnia ilości wad badanego elementu. Metodyka polega na wykonaniu punktowych badań nieniszczących trzema urządzeniami oraz obrazowaniu wnętrza elementu przy pomocy tomografu ultradźwiękowego.

W ostatniej części pracy opisano przykłady wykorzystania proponowanej metodyki. Sprawdzano ją na więźbach dachowych w budynku z 1912 r. w Jastrzębiu-Zdroju, w budynku kościoła św. Stanisława Biskupa i Męczennika w Czeladzi z 1913 r. oraz na zamku Kapituły Warmińskiej w Olsztynie z XIV w. i XV w. Łącznie na obiektach tych wykonano 433 badania nieniszczące i semi-nieniszczące.

Przyjęto następujące tezy pracy:

- ❑ Możliwe jest określenie wad wewnętrznych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących – teza ta została potwierdzona zarówno przez wykonywanie badań różnymi urządzeniami na gęstej siatce pomiarowej (badania wstępne), a przede wszystkim w badaniach tomografem ultradźwiękowym w laboratorium oraz in situ.
- ❑ Możliwe jest określenie paramentów wytrzymałościowych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących – teza została potwierdzona badaniami zamieszczonymi w rozdziale 9 pracy.
- ❑ Możliwe jest opracowanie metodyki określenia klasy wytrzymałościowej drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących z uwzględnieniem wad wewnętrznych istniejących w badanych elementach – proponowaną metodykę, uwzględniającą wyniki badań własnych, zamieszczono w rozdziale 8 pracy. Teza została potwierdzona badaniami zamieszczonymi w rozdziale 9 pracy.

Podsumowując można zatem stwierdzić, że tezy zostały potwierdzone, a naukowe cele pracy zostały osiągnięte.

Oczywiście praca nie wyczerpuje problemu określania wytrzymałości drewna starego w zabytkowych obiektach. Kierunki dalszych działań powinny koncentrować się na:

- ❑ dalszym pozyskiwaniu elementów zabytkowych do badań i uszczegóławianiu przyjętych korelacji. Przy większej ilości przebadanych belek będzie można opracować zależności między

wynikiem badania nieniszczącego, a wytrzymałością drewna dla poszczególnych gatunków, a być może i w zależności od wieku elementu.

- ❑ Rozwijaniu nieniszczących metod wykrywania wad wewnętrznych. Można pokusić się o próby mapowania 3D wnętrza elementów drewnianych. Można próbować stosowania innych urządzeń do wykrywania wad, np. urządzeń radarowych lub radiologicznych. Dalsze badania nad wykorzystaniem tomografu ultradźwiękowego powinny koncentrować się na analizie rozróżniania typu wady (sęk, porażenie grzybami, wpływ owadów) na wykonanym skanie.
- ❑ Rozwijaniu zaproponowanej metodyki, np. o wpływ lokalizacji wady względem przyłożonego obciążenia. W przypadku obiektów istniejących jest to zadanie trudne, gdyż wymaga przeanalizowania in situ ścieżek przekazywania obciążeń w konstrukcji i wytypowaniu miejsc najbardziej wyciężonych. Wówczas badania nieniszczące powinny koncentrować się w tych rejonach konstrukcji.

Autorka planuje ponadto w przyszłości wykorzystać przebadane 69 belek do dalszych badań. Planowane jest wycięcie małych próbek i porównanie wyników uzyskiwanych na tych próbkach z wynikami badań wielkogabarytowych.

LITERATURA

Publikacje

- [1] Alves R. C., Mantilla J. N. R., Bremer C. F., Carrasco E. V. M.: Application of acoustic tomography and ultrasonic waves to estimate stiffness constants of muiracatiara Brazilian Wood Bioresources 10, 2010. 1845.
- [2] Arriaga F., García L., Gebremedhin K. G., Peraza F.: Grading and load carrying capacity of old timber beams. International Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers ASAE. Charlotte, North Carolina, USA. 21-24th June 1992.
- [3] Arriaga F., Llana D. F., Esteban M., Íñiguez-González G.: Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. Holzforschung, vol. 71, nr 9, 2017, s. 713-723.
- [4] Bucur V.: Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2003.
- [5] Borysiuk P., Kozakiewicz P., Krzosek S.: Drzewne materiały konstrukcyjne. Wydawnictwo SGGW. Warszawa, 2023.
- [6] Branco J. M., Piazza M., Cruz P. J. S.: Structural analysis of two King-post timber trusses. Non-destructive evaluation and load-carrying tests. Construction and Building Materials vol. 24, 3, 2010, s. 371-383.
- [7] Brunarski L.: Kryteria zgodności wytrzymałości charakterystycznej materiałów budowlanych w normach PN-EN-ISO. Prace Instytutu Techniki Budowlanej, nr 4, 2002, s. 15÷41.
- [8] Bucur V.: Acoustics of wood. CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
- [9] Bucur V.; Navarrete A.; Troya M.T., Sánchez E.; Garros S.; Díez M.R.: Fungi decay in wood by combined nondestructive testings. Proceedings of the Ultrasonics International 93 Conference. Vienna, Austria, 1993. s. 287-290.
- [10] Calderoni C., De Matteis G., Giubileo C., Mazzolani F. M.: Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. Engineering Structures vol. 32, 2, 2010, s. 442-448.
- [11] Candido A., Henriques D.: Inspection and diagnosis of timber structures by nondestructive methods, 9th MonuBasin - International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin - Improvements in Conservation and Rehabilitation – integrated methodologies. Ankara, Turkey, 2014, s. 469-480.
- [12] Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E.: Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. Materials and Structures, vol. 34, 1, 2001, s. 59-64.
- [13] Chenwei W., Xue J., Song D., Zhang Y.: Seismic performance evaluation of a roof structure of a historic Chinese timber frame building. International Journal of Architectural Heritage, vol. 16 (10), s. 1474–1495.

- [14] Colla C.: Verification of sonic tomography outcome through local testing of mechanical properties in Historic timber beam. *Wiadomości Konserwatorskie (International Journal of Architectural Heritage)* 47, 2016, s. 71–79.
- [15] Dackermann U., Crews K., Kasal B., Li J., Riggio M., Rinn F., Tannert T.: In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, vol. 47, 2014, s. 787-803.
- [16] Davis H. E., Troxell G. E., Hauck G. F. W.: *The testing of engineering materials*, 4th edn. McGraw-Hill, New York, 1982.
- [17] Dietz A. G. H., Schaffer E. L., Gromala D. S.: *Wood as a Structural Material*, vol II. Pennsylvania State University Press, 1982.
- [18] Drobiec J., Nowogońska B.: Badania diagnostyczne drewnianych elementów więźby dachowej w XIX-wiecznym kościele. *Izolacje*, nr 2, 2025, s. 103-107.
- [19] Drobiec J., Nowogońska B.: Diagnostyka drewnianych elementów konstrukcji dachu w XIX wiecznym kościele w Osiecznicy. *Awarie Budowlane 2024: Zapobieganie, Diagnostyka, Naprawy, Rekonstrukcje*, 2024. Wydawnictwo Uczelniane ZUT, s. 105-114.
- [20] Drobiec J., Nowogońska B.: Możliwości diagnostyki drewna zabytkowego na przykładzie badań więźby kościoła w Jastrzębiu-Zdroju. *Przegląd Budowlany*, nr 9-10, 2023, s. 20-23.
- [21] Drobiec J., Nowogońska B.: Non-destructive Testing of Wooden Elements in Historic Buildings - An Example of Testing a 19th Century Roof Truss Structure. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 34(3), 2024, s. 154-164.
- [22] Drobiec J., Nowogońska B.: Restrictions and New Possibilities of Technical and Conservation Diagnostics of Wood in Heritage Buildings. *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 33, iss. 2, 2023, s. 106-116.
- [23] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2010.
- [24] Drobiec Ł.: *Renowacje konstrukcji obiektów zabytkowych cz.1, Monografia*, Archmedia. Warszawa, 2018.
- [25] Drobiec Ł.: *Renowacje konstrukcji obiektów zabytkowych cz.2, Monografia*, Archmedia. Warszawa, 2019.
- [26] Drobiec Ł.: *Renowacje konstrukcji obiektów zabytkowych cz.3, Monografia*, Archmedia. Warszawa, 2022.
- [27] Drobiec Ł.: *Techniki diagnostyczne i sprzęt umożliwiające badania obiektów budowlanych i situ. Materiały XVII Konferencji Naukowo-Technicznej. Warsztat Pracy Rzecznawcy Budowlanego*. Kielce-Cedzyna, 19-21 października 2022, s. 241-259.
- [28] Dulce F.H.: *Understanding Structural Timber in Old Buildings in Lisbon, Portugal. From Knowledge of Construction Processes to Physical–Mechanical Properties, Buildings*, 2025
- [29] Espinosa L., Prieto F., Brancheriau L., Lasaygues P.: Effect of wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: A ray-tracing approach. *Ultrasonics*, vol. 91, 2019, s. 242-251.

- [30] Falk R. H., Patton-Mallory M., McDonald K. A.: Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs. *Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction*, 1989.
- [31] Feio A. O., Machado J. S., Lourenço P. B.: Compressive behavior and NDT correlations for chestnut wood (*Castanea sativa* Mill.). *Proceedings of the 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, Padova, Italy, 10-13 November 2004, s. 369-375.
- [32] Gieffing D. F., Lewark S.: Badanie drewna za pomocą urządzenia Pilodyn. *Sylwan*, nr 7, 1985, s. 69-68.
- [33] Gieffing D. F.: Budowa i zastosowanie urządzenia Pilodyn. *Sylwan*, nr 7, 1985, s. 63-78.
- [34] Grzyb K., Drobiec Ł., Zając J., Drobiec K.: Preliminary assessment of structural masonry damage in Malbork Castle. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, 2025, e04166.
- [35] Hearmon R. F. S.: *The elasticity of wood and plywood*, H.M.S.O, London, 1948.
- [36] Hulimka J., Tunkel M.: History of the changes in the roof structure of a historical wooden church. *Civil and Environmental Engineering Reports*. Vol. 34, (2), 2024.
- [37] Hulimka J.: O zagrożeniu awarią szesnastowiecznej drewnianej wieży dzwonnicy. *Inżynieria i Budownictwo*. Nr 12, 2017, s. 627-630.
- [38] Hulimka J.: Structural Faults of the Historic St. George Church in Gliwice Ostropa–Analysis and Strengthening Methods. *Journal of Architecture, Civil Engineering and Environment*. Nr 1, 2009, s. 81-8.
- [39] Hulimka J.: Zabytkowe budynki w stanie awaryjnym. *Przegląd Budowlany*. Nr 3/4, 2022, s. 28-33.
- [40] Jasieńko J., Bednarz Ł., Nowak T.: Analiza stanu zachowania drewnianych stropów w Auli Leopoldyńskiej Uniwersytetu Wrocławskiego oraz w budynku głównego dworca kolejowego we Wrocławiu. *Wiadomości Konserwatorskie* nr 26, 2009, s. 300-313.
- [41] Jasieńko J., Nowak T., Hamrol K.: Selected methods of diagnosis of historic timber structures—principles and possibilities of assessment. *Advanced Materials Research*, 2013, 778, 225-232.
- [42] Jasifovski A., Todorović N., Milošević J., Veizović M., Pantelić F., Aškrabić M., Vasov M., Rajčić A.: An approach to in situ evaluation of timber structures based on equalization of non-destructive and mechanical test parameters, *Buildings*, 13, 2023.
- [43] Jaskowska-Lemańska J., Przesmycka E.: Semi-Destructive and Non-Destructive Tests of Timber Structure of Various Moisture Contents. *Materials*, 14(1), 2021, 96.
- [44] Jaskowska-Lemańska J., Wałach D., Górka-Stańczyk M.: Correction Factors for Sclerometric Test Results in the Technical Assessment of Timber Structural Elements under Diverse Conditions. *Materials*. 2023, 16(24), 7582.
- [45] Jaskowska-Lemańska J., Wałach D.: Assessment of the Technical Condition of Timber Structural Elements Using Sclerometric Tests. *Materials*. 2023; 16(18), 6152.

- [46] Jaskowska-Lemańska J.: Badania konstrukcyjnych elementów drewnianych z wykorzystaniem urządzenia Woodtester. *Materiały Budowlane* 11, 2022, s. 141-144.
- [47] Jaskowska-Lemańska J.: Metodyka określania właściwości fizyko-mechanicznych drewna w istniejących konstrukcjach na podstawie badań semi-nieniszczących. *Rozprawa Doktorska*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków 2022 r.
- [48] Jayne B. A.: Vibrational Properties of Wood as Indices of Quality. *Forest Products Journal* 9 (11), 1959, s. 413-416.
- [49] Karolak A. Analiza pracy statycznej wybranych połączeń w drewnianych obiektach zabytkowych Raport serii PRE nr 2/2021. Praca doktorska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, 2021.
- [50] Karolak A.: Analiza pracy statycznej wybranych połączeń w drewnianych obiektach zabytkowych. Praca doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 2021 r.
- [51] Kasal B., Tannert T.: In Situ Assessment of Structural Timber. *Rilem State-of-the-Art Report*. Springer, 2011.
- [52] Kimbar R.: Wady drewna. Osie, 2012.
- [53] Koca G.: Non-destructive evaluation of timber members of old masonry/timber buildings. 5 Reuso – International Conference on Documentation, Conservation and Restoration of the Architectural Heritage and Landscape Protection. Granada, 2017.
- [54] Konieczny A.: Sprawozdanie z badań dendrochronologicznych zabytkowych kościołów w województwie śląskim przeprowadzonych w 2008 r. *Wiadomości Konserwatorskie Województwa Śląskiego* T. 1 (2009).
- [55] Konieczny A.: Zastosowanie dendrochronologii do datowania zabytków drewnianych w praktyce badawczej. *Konserwacja drewna zabytkowego. Między teorią a praktyką*. Biblioteka Studiów Legnickich. Tom XXIII, seria A, tom 4, s. 25-46.
- [56] Kozakiewicz P., Matejak M.: Klimat a drewno zabytkowe. Dawna i współczesna wiedza o drewnie. Wydawnictwo SGGW. Warszawa, 2013.
- [57] Krzysik F., Waltherowa M.: Grzyby atakujące drewno budowli zabytkowych oraz środki zaradcze na przykładzie kościoła w Dębnie. *Ochrona Zabytków* nr 3-4, 1961, s. 5-31.
- [58] Krzysik F.: Nauka o drewnie. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa, 1957 r.
- [59] Krzysik F.: Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna. *Ochrona Zabytków*, nr 1-2, 1961, s. 50-65.
- [60] Krzysik F.: Drewno jako materiał w zabytkach. *Ochrona Zabytków* nr 1, 1968, s. 11-16.
- [61] Ksit B., Szymczak-Graczyk A., Thomas M., Pilch R.: Implementation of the Results of Experimental Studies with the Use of the Sclerometric Method of Plane Elements in Wooden Buildings. *Energies* 15, 2022, 6660.
- [62] Ksit B.: Badania wilgotnościowe i mykologiczne budynków historycznych. Wytyczne i zalecenia a walidacja otrzymanych wyników. *Problemy muzeów*

- związane z zachowaniem i konserwacją zbiorów. Praca zbiorowa / red. Krzysztof Wiśłocki (WILiT) – Poznań. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk. Muzeum Narodowe Rolnictwa i Przemysłu Rolno-Spożywczego, 2024, s. 77-87.
- [63] Ksīt B.: Diagnostyka wilgotnościowa obiektów budowlanych: metodyka i procedury badań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2023.
- [64] Łapka M.: Wpływ efektu skali na mechanikę zniszczenia drewna konstrukcyjnego. Rozprawa Doktorska. Politechnika Opolska. Opole, 2013.
- [65] Lawrence Katz J., Spencer P., Wang Y., Misra A., Marangos O., Friis L.: On the anisotropic elastic properties of woods. *Journal of Materials Science*, vol. 43, 2008, s. 139-145.
- [66] Llana D. F., Iñiguez-González G., Díez M. R., Arriaga F.: Nondestructive testing used on timber in Spain: a literature review, *Maderas. Ciencia y tecnología* 22(2), 2020, s. 133-156.
- [67] Llana D. F., Iñiguez - Gonzalez G., Arriaga F., Wang X.: Time-of-flight adjustment procedure for acoustic measurements in structural timber. *BioResources*, vol. 11, nr 2, 2016, s. 3303-3317.
- [68] Lourenco P.B., Feio A.O., Saporiti-Machado J.: Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21(8), 2007, s. 1617-1627.
- [69] Lubowiecka I., Zybała T., Bukal G., Krajewski M.: On the Current State of Dovetail Wall-corner Joints in Wooden Greek Catholic Churches in Polish Subcarpathia with Structural and Sensitivity Analyses. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(10), 2019, 1439–1456.
- [70] Mackiewicz M., Krentowski J.R., Zimiński K., Skotnicka- Siepsiak A.: Research on 18th-century building structures in terms of static scheme changes. *Materials* 16(24), 2023, 7689.
- [71] Mackiewicz M., Zimiński K., Pawłocz J.A. Knyziak P. Evaluation of the historic wooden structure condition based on the results of non-destructive tests. *Engineering Failure Analysis*, vol. 159, 2024, 108116.
- [72] Mączyński D.: Znaki, inskrypcje i ślady na powierzchni drewna w zabytkowych konstrukcjach dachowych. *Wiadomości Konserwatorskie*, 25/2009, s. 28-36.
- [73] Mazur J.: Drewniane cerkwie Złotego Wieku. *Monument* nr 2/2005, s. 71-113.
- [74] Michalak J.: *Materiałoznawstwo przemysłu drzewnego*. Państwowe Wydawnictwa Przemysłu Drzewnego. Warszawa, 1960.
- [75] Midek U.: Analiza drewna w obiektach zabytkowych na podstawie badań. *Roczniki Inżynierii Budowlanej*, zeszyt 16, 2016, s. 61-70.
- [76] Moreno D. G., Kashyap R., O'Ceallaigh C., McGetrick P.J.: Assessment of Existing Timber Structures Part 2: A Case Study in Ireland. *Civil Engineering Research in Ireland Conference* 2024.
- [77] Neuhaus H.: *Budownictwo drewniane*. Polskie Wydawnictwo Techniczne. Rzeszów, 2008.
- [78] Niemza P., Mannes D.: Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage*, 13/2012, s. 26–34.

- [79] Nowak T., Bednarz Ł., Jasieńko J., Karolak A., Kiedryn J.: Badania i analiza stanu technicznego ścian drewnianej konstrukcji zrębowej kościoła św. Jana Nepomucena we Wrocławiu. *Wiadomości Konserwatorskie (Journal of Heritage Conservation)* nr 55, 2018, s. 105-120.
- [80] Nowak T., Bról J., Jasieńko J.: Estimation of the strength parameters of wood in building structures -preliminary studies, *Forestry and Wood Technology* № 83, 2013: 303-306
- [81] Nowak T., Jasieńko J., Hamrol-Bielecka K.: In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method—evaluation of usefulness. *Construction and Building Materials*, 102, 2016, s. 403-415.
- [82] Nowak T., Karolak A., Sobótka M., Wyjadłowski M.: Assessment of the Condition of Wharf Timber Sheet Wall Material by Means of Selected Non-Destructive Methods. *Materials*. 2019, 12(9), 1532.
- [83] Nowak T.P., Jasieńko J., Hamrol-Bielecka K.: In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. *Construction and Building Materials*, Vol. 102, Part 1, 2016, s. 403-415,
- [84] Nowicki A.: *Użytkowanie lasów (Technologia leśna)*. Podręcznik dla właścicieli lasów i leśników. Skład Główny w Księgarni G. Gebethnera i Spółki, Kraków 1913.
- [85] Nowogońska B., Mielczarek M.: Renovation Management Method in Neglected Buildings. *Sustainability*, Vol. 13, iss. 2, 2021, s. 1-30.
- [86] Nowogońska B., Podskalna W.: Metoda zarządzania renowacją budynków zabytkowych oparta na konsekwencjach wcześniejszych zaniechań renowacji. *Materiały Budowlane*, nr 9, 2023, s. 37-40.
- [87] Nowogońska B.: Consequences of improper renovation decisions in a 17th century half-timbered building. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 29, iss. 4, 2020, s. 557-566.
- [88] Nowogońska B.: Metoda zarządzania renowacją obiektów zabytkowych. *Materiały Budowlane*, nr 11, 2022, s. 19-21.
- [89] Nowogońska B.: Problemy techniczne w renowacji więźby dachowej XVI-wiecznego kościoła. *Przegląd Budowlany*, nr 9-10, 2023, s. 20-23.
- [90] Nowogońska B.: Przyczyny stanu przedawaryjnego XVII-wiecznego kościoła ryglowego. *Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje*. Wydaw. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2017, s. 217-225.
- [91] Palaia L., Tormo S., Lopez V., Monfort J.: NDT assessment of timber structures: a case study – Villa Ivonne, Meliana, Conference: STREMAH 2011, Volume: 118.
- [92] Pasek R., Jaskowska-Lemańska J., Wałach D., Rokita T., Kamiński P.: Evaluation of Technical Condition and Durability of Wooden Shaft Guides with Application of Non-Destructive and Semi-Destructive Testing Methods. *Materials* 2022, 15(14), 4769.
- [93] Perlin L. P., de Andrade Pinto R. C., do Valle Â.: Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, vol. 229, 2019, 116958.

- [94] Perlin L.P., Pinto R.C.A., do Valle A.: Ultrasonic tomography in wood with anisotropy consideration. *Construction and Building Materials*, vol. 229, 2019, 116958,
- [95] Perlin L.P., Pinto R.C.A., do Valle A.: Use of Ultrasonic Tomography in the Evaluation of Timber Structures. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague 2014, Oct 6-11.
- [96] Piazza M, Riggio M.: Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures. *Journal of Building Appraisal*, 3/2008, s. 267-296.
- [97] Qin J., Liu X., Van Den Abeele K., Cui G.: The study of wood knots using acoustic nondestructive testing methods. *Ultrasonics* 88, 2018, s. 43–50.
- [98] Rinn F.: Practical application of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie*, 54 (4), 2013, s. 32-38.
- [99] Rodriguez L.C., Rubio de Hit P., Gomez de Cozar J.C.: Application of ultrasonic techniques, as a non-destructive method, for the evaluation of a sixteenth century wooden ceiling, in the Marqueses de la Algaba Palace, Seville. *Transactions on the Built Environment* vol. 26, 1997, s. 111-120.
- [100] Ronca P., Gubana A.: Mechanical characterisation of wooden structures by means of an in situ penetration test. *Construction and Building Materials*, vol. 12, 4, 1998, s. 233-243.
- [101] Rucka M.: Special issue: Non-destructive testing of structures. *Materials*, 2020.
- [102] Schabowicz K., Menéndez Orellana A.E., Andrianos N.: Analysis of selected non-destructive methods for diagnosis in new and old buildings. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, vol. 6, nr 1-4, 2022, s. 63-70.
- [103] Schabowicz K.: Najnowsze metody nieniszczące wykorzystywane w badaniach w budownictwie. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, nr 3, 2018, s. 48-51.
- [104] Schabowicz K.: Non-destructive testing of materials in civil engineering. *Materials* 12 (19), 3237.
- [105] Schabowicz K.: Ultrasonic tomography–The latest nondestructive technique for testing concrete members–Description, test methodology, application example. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (2), 2014, s. 295-303.
- [106] Skarżyńska-Wawrykiewicz M., Wawrykiewicz L.: Średniowieczne konstrukcje ciesielskie południowego skrzydła zamku kapituły warmińskiej w Olsztynie. *Przyczynek do historii zamku. Ochrona Zabytków*, 2015, nr 2, s. 65-92.
- [107] Stebnicka E.: *Wady drewna*. Państwowe Wydawnictwa Rolnicze i Leśne, Warszawa 1951.
- [108] Szostak B., Trochonowicz M., Kowalczyk M.: Determination of the strength parameters of pinewood based on the non-destructive sclerometric test with a wood hammer. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30 (1), 2020, s. 043-052.
- [109] Szwarc A.: *Praktyczna encyklopedia Gospodarstwa Wiejskiego*. T 17-18: Techniczne własności drewna, Warszawa 1922.
- [110] Tajchman J.: *Stropy drewniane w Polsce. Propozycja systematyki*. Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków. Studia i Materiały, tom IV, Ośrodek Dokumentacji Zabytków, Warszawa, 1989 r.

- [111] Tannert T., Anthony R.W., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., Rinn F., Widmann R., Yamaguchi N.: In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques, *Materials and Structures*, vol. 47, 2014, s. 767-785.
- [112] Tłoczek I.: *Polskie budownictwo drewniane*. Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich. Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk, 1980.
- [113] Tomaszek T.: Zastosowanie badań rezystograficznych do analizy zakresu degradacji tkanki drzewnej w przekrojach polichromowanych elementów zrębu ścian drewnianej budowli zabytkowej w celu optymalizacji obszaru transferu polichromii (na przykładzie cerkwi w Miększu Starym). *Wiadomości Konserwatorskie (Journal of Heritage Conservation)*, 42/2015, s. 80-90.
- [114] Tomikawa Y., Iwase Y., Arita K., Yamada H.: Non destructive inspection of wooden Poles using ultrasonic tomography. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 33 (4), 1986, s. 354-58.
- [115] Tunkel M.: *Cechy modelowe sakralnej architektury drewnianej Górnego Śląska na podstawie analizy zachowanych obiektów*. Rozprawa doktorska. Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, 2022.
- [116] Valluzzi M. R., Drdacky M., Kloiber M., Casarin F.: Comparative evaluation of investigation testing methods in timber elements considering moisture content. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(1), 2022 s. 230-248.
- [117] Van Duong D., Hasegawa M., Matsumura J.: The relations of fiber length, wood density, and compressive strength to ultrasonic wave velocity within stem of *Melia azedarach*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol. 16, 2019, s. 1-8.
- [118] Wanin S.: *Nauka o drewnie*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa, 1953.
- [119] Wawrykiewicz L., Skarżyńska-Wawrykiewicz M.: Najstarsze dachy Olsztyna. Średniowieczne więzby dachowe budowli gotyckich. *Renowacje i Zabytki*, 2013, nr 4 (48), s. 50-61.
- [120] Wdowiak A., Brol J.: Methods of strength grading of structural timber – comparative analysis of visual and machine grading on the example of scots pine timber from four natural forest regions of Poland. *Structure and Environment*, vol. 11, nr 3, 2019, s. 210-224.
- [121] Wdowiak A.: Defects in structural timber. *Structure & Environment*, vol. 9, nr 2, 2017, s. 112-122.
- [122] Xu P., Guan C., Zhang H., Li G., Zhao D., Ross R. J., Shen Y.: Application of Nondestructive Testing Technologies in Preserving Historic Trees and Ancient Timber Structures in China. *Forests* 2021, 12(3), 318.
- [123] Zielińska M., Rucka M.: Non-destructive Testing of Wooden Elements. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 1203 (2021) 032058.
- [124] Zielińska M., Rucka, M.: Assessment of Wooden Beams from Historical Buildings Using Ultrasonic Transmission Tomography. *International Journal of Architectural Heritage*. Vol. 17, No. 1, 2023, s. 249–261.
- [125] Zielińska M., Rucka, M.: Using the ultrasonic tomography method to study the condition of wooden beams from historical buildings. *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. 2021.

- [126] Zimiński K, Mackiewicz M., Pawłowicz J. A.: Wady zbytkowej więźby dachowej przyczyną zmiany jej schematu statycznego. XXXI Konferencja Awarie Budowlane, Międzyzdroje 2024.
- [127] Zimiński K., Krentowski J.R.: Metodyka pomiaru parametrów wytrzymałościowych eksploatowanych konstrukcji drewnianych w efekcie badań semi-niszczących (SDM). Warsztat Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, Kielce-Cedzyna, 28-30 maja 2025 r.
- [128] Zimiński K., Pawłowicz J.A., Comparison of actual deformations of historic wooden structures with values obtained from static calculations, Civil and Environmental Engineering Reports, 34, (4), 2024, s. 138-149
- [129] Zubrzycki J.S.: Cieslićstwo Polskie. Nakładem Autora. Lwów, 1930 r.
- [130] Zybala T., Zielińska M., Rucka M., Przewłocki J., Grębowski K.: Typology, current state and non-destructive testing of timber roof trusses of historic churches in the West Vistula Delta, Poland. Heritage Science, 12, 2024, 156.

Normy

- [N1] PN-D-01000:1954 Wady drewna.
- [N2] PN-D-01000:1966 Wady drewna
- [N3] PN-D-01011:1979 Drewno okrągłe. Wady.
- [N4] PN-D-01012:1979 Tarcica. Wady
- [N5] PN-D-94021:2013-10 Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi.
- [N6] PN-EN 1309-1:2002 Drewno okrągłe i tarcica. Metody oznaczania wymiarów. Część 1: Tarcica.
- [N7] PN-EN 13183-2 Wilgotność sztuki tarcicy. Część 2: Oznaczanie wilgotności za pomocą elektrycznego wilgotnościomierza oporowego.
- [N8] PN-EN 14081-1:2016-03 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne sortowane wytrzymałościowo o przekroju prostokątnym. Część 1: Wymagania ogólne.
- [N9] PN-EN 14081-3:2022-09 Konstrukcje drewniane -- Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 3: Sortowanie maszynowe; wymagania dodatkowe dotyczące zakładowej kontroli produkcji.
- [N10] PN-EN 14298:2018-02 Tarcica. Ocena jakości suszenia.
- [N11] PN-EN 17121: 2020 Konserwacja Dziedzictwa Kulturowego. Historyczne konstrukcje drewniane. Wytyczne dla oceny miejscowej drewnianych konstrukcji nośnych.
- [N12] PN-EN 1912:2024-10 Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości. Przyporządkowanie klas sortowania wizualnego i gatunków.
- [N13] PN-EN 1995-1-1:2010 Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.

- [N14] PN-EN 1995-1-1:2010 Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.
- [N15] PN-EN 336:2013-12 Drewno konstrukcyjne. Wymiary, dopuszczalne odchyłki.
- [N16] PN-EN 338:2016-06 Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości.
- [N17] PN-EN 380:1998 Konstrukcje drewniane. Metody badań. Ogólne zasady badań pod obciążeniem statycznym.
- [N18] PN-EN 408+A1:2012 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo -- Oznaczanie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych.
- [N19] PN-EN 844:2019-12 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia.
- [N20] PN-EN 844-9:2002 Drewno okrągłe i tarcica. Terminologia. Część 9: Terminy dotyczące cech tarcicy (wersja polska).
- [N21] PN-EN 14081-2+A1:2022-11 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne o przekroju prostokątnym sortowane wytrzymałościowo. Część 2: Sortowanie maszynowe. Wymagania dodatkowe dotyczące badań typu.
- [N22] PN-EN 384+A1:2022-11 Drewno konstrukcyjne. Oznaczanie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości.

STRESZCZENIE

Określenie paramentów mechanicznych drewna zabytkowego, bez możliwości pobierania próbek i zbadania ich w laboratorium, jest zadaniem trudnym. Nie ma wytycznych normowych ani literaturowych odnośnie sposobu postępowania w takich przypadkach. W pracy przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania metod nieniszczących i semi-nieniszczących do wyznaczenia wytrzymałości drewna starego. Praca składa się z 10 rozdziałów. W rozdziale 1 opisano genezę podjęcia tematu oraz cel i zakres pracy. Rozdział drugi zawiera przegląd aktualnego stanu wiedzy. Opisano w nim wady drewna, wizualne i laboratoryjne sposoby określania wytrzymałości drewna oraz wyniki wybranych badań nieniszczących i semi-nieniszczących. Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że wady drewna wpływają na jego parametry mechaniczne, a metodą wizualną nie da się określić wszystkich wad drewna, ponieważ znaczna ich część bywa ukryta wewnątrz badanego elementu. Do lokalizacji wewnętrznych wad drewna można wykorzystać metody nieniszczące, w szczególności, ultradźwiękowe i penetracyjne, a metoda tomografii ultradźwiękowej może być szczególnie przydatna do określenia miejsca położenia wad wewnętrznych drewna. Metody nieniszczące są ponadto wykorzystywane do wyznaczania parametrów mechanicznych i fizycznych drewna (np. wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na ściskanie, moduły sprężystości, gęstości). Tworzone są korelacje opisujące zależność pomiędzy badanym parametrem nieniszczącym a parametrem mechanicznym. Najczęściej korelacje te dotyczą jednak drewna nowego. Korelacje dla drewna zabytkowego tworzone są z reguły na małych próbkach, bez uwzględnienia występowania wad drewna. Nie odnaleziono w literaturze wyników badań ani korelacji pomiędzy badaniami nieniszczącymi i niszczącymi dla dużej liczby próbek krajowego drewna zabytkowego z badaniami prowadzonymi na próbkach wielkogabarytowych.

W rozdziale 3 zamieszczono tezy oraz cele naukowe pracy, które przyjęto na podstawie przeglądu stanu wiedzy. Postawiono trzy tezy:

- Możliwe jest określenie wad wewnętrznych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących.

- ❑ Możliwe jest określenie paramentów wytrzymałościowych drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących.
- ❑ Możliwe jest opracowanie metodyki określenia klasy wytrzymałościowej drewna zabytkowego przy pomocy metod nieniszczących z uwzględnieniem wad wewnętrznych istniejących w badanych elementach.

W celu potwierdzenia powyższych tez przyjęto następujące cele naukowe pracy:

- ❑ Wykonanie badań wstępnych na obiekcie historycznym potwierdzających przydatność metod nieniszczących w określaniu wad drewna,
- ❑ Opracowanie zależności badany parametr nieniszczący – wytrzymałość drewna dla zabytkowego drewna krajowego dla kilku metod badawczych.
- ❑ Opracowanie sposobu nieniszczącej szybkiej lokalizacji wad drewna, w tym wad wewnętrznych.
- ❑ Opracowanie metodyki określenia klasy drewna zabytkowego z uwzględnieniem istniejących wad wewnętrznych.

W rozdziale 4 opisano wyniki badań wstępnych. Badania przeprowadzono na więźbie dachowej zabytkowego kościoła w Sierotach, pochodzącej częściowo z 1427 r., a częściowo z 1707 r. Do badań wytypowano 7 elementów więźby dachowej. Przeprowadzono badania tomografem ultradźwiękowym, młotkiem do drewna oraz dwoma urządzeniami ultradźwiękowymi, z których jeden emituje akustyczną falę podłużną, a drugi falę poprzeczną. Badania wstępne wykazały, że wizualne oględziny pozwoliły na wykrycie około 30÷50% uszkodzeń badanych elementów, a dokładne ich zobrazowanie było możliwe przy pomocy tomografu ultradźwiękowego. Stwierdzono, że do diagnostyki wad można również zastosować metody semi-nieniszczące i nieniszczące pozwalające na wykonanie badania w konkretnym punkcie elementu. Uzyskanie odpowiedniej dokładności badań wymaga wtedy jednak ich prowadzenia w dość gęstej siatce pomiarowej. Lepsze efekty w wykrywaniu wad uzyskano łącząc kilka metod nieniszczących. Wykonywanie badań na gęstej siatce jest pracochłonne, a w przypadku obiektów zabytkowych wykonywanie badań semi-nieniszczących (np. młotkiem do drewna) może być niemożliwe z uwagi na gęstą perforację.

W rozdziale 5 opisano wyniki badań nieniszczących. Do badań pozyskano kilkadziesiąt zabytkowych elementów drewnianych z terenu całej Polski. Elementy pochodziły z ostatnich 500 lat – najstarszy z początku XV wieku, a najmłodszy z pierwszej połowy

XX wieku. Wykonano badania nieniszczące i semi-nieniszczące tymi samymi urządzeniami, które wykorzystano w badaniach wstępnych. Dodatkowo wykonano badania wilgotności drewna.

Rozdział 6 zawiera wyniki badań niszczących elementów z drewna zabytkowego, przebadanych wcześniej metodami NDT. Belki badano w schemacie czteropunktowego zginania zgodnie z PN-EN 408 [N18] i PN-EN 384 [N22]. Krótsze belki badano w schemacie trójpunktowego zginania. Podczas badań prowadzono pomiar ugięć przy pomocy transformatorowych czujników przemieszczeń oraz metodą optyczną, z wykorzystaniem systemu Aramis. Określono wytrzymałość badanego drewna.

W rozdziale 7 zamieszczono analizę uzyskanych wyników badań niszczących i nieniszczących oraz wykresy i wzory obrazujące korelację między tymi badaniami.

Propozycję metodyki prowadzenia badań na obiektach zabytkowych opisano w rozdziale 8. Metodyka ta opiera się na określeniu ilości wad badanego elementu przy pomocy tomografu ultradźwiękowego oraz wykonaniu punktowych badań nieniszczących trzema urządzeniami stosowanymi w badaniach wstępnych (rozdział 4) i w badaniach niszczących (rozdział 5). W zależności od ilości wad do określenia wytrzymałości na zginanie drewna proponuje się wykorzystać średnie wartości korelacyjne lub dolną obwiednię wyników badań.

W rozdziale 9 zamieszczono przykłady wykorzystania proponowanej metodyki określania wytrzymałości drewna. Metodykę sprawdzano na więźbach dachowych dwóch obiektów: budynku pouzdrowskiego z 1912 r., zlokalizowanym w Jastrzębiu-Zdroju oraz budynku kościoła św. Stanisława Biskupa i Męczennika w Czeladzi z 1913 r. W obu przypadkach wyniki analiz zweryfikowano badaniem niszczącym. Dodatkowo proponowaną metodykę zastosowano podczas badań więźby dachowej zamku Kapituły Warmińskiej w Olsztynie z XIV w. i XV w. W tym przypadku, z oczywistych względów, wyników badań nie zweryfikowano już metodami niszczącymi.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Zamieszczono w nim również propozycje dalszych badań.

ABSTRACT

Determining the mechanical parameters of historic timber without the ability to extract samples for laboratory testing presents a significant challenge. There are no standardized guidelines or established literature addressing procedures in such cases. This study analyzes the feasibility of using non-destructive and semi-destructive testing methods to assess the strength of aged timber. The work comprises ten chapters.

Chapter 1 outlines the genesis of the research topic along with the aims and scope of the study. Chapter 2 presents a comprehensive review of the current state of knowledge. It discusses timber defects, visual and laboratory methods for assessing timber strength, and the results of selected non-destructive and semi-destructive tests. Based on the literature review, it can be concluded that defects significantly influence the mechanical properties of timber, and visual inspections alone cannot detect all flaws—many are concealed within the internal structure of the element. Non-destructive techniques, particularly ultrasonic and penetration methods, can be employed to identify internal defects. Ultrasonic tomography, in particular, proves useful for locating internal flaws. These non-destructive techniques are also used to estimate mechanical and physical parameters of timber, such as bending and compressive strength, modulus of elasticity, and density. Correlations are often developed to relate non-destructive indicators to mechanical properties; however, such correlations typically pertain to new timber. Those applicable to historic wood are generally derived from small samples and do not account for the presence of natural defects. No literature was found presenting correlations between destructive and non-destructive tests performed on a large number of full-scale historic timber samples from Polish heritage buildings.

Chapter 3 defines the research theses and objectives based on the literature review. Three hypotheses are proposed:

- ❑ It is feasible to detect internal defects in historic timber using non-destructive testing methods.
- ❑ It is feasible to determine the strength parameters of historic timber using non-destructive testing methods.

- ❑ It is possible to develop a methodology for assigning strength grades to historic timber based on non-destructive testing, taking into account internal defects present in the examined elements.

To verify these hypotheses, the following research objectives were established:

- ❑ Conduct preliminary testing on a historical structure to confirm the applicability of non-destructive methods in identifying timber defects.
- ❑ Develop correlations between non-destructive indicators and timber strength for historic Polish wood, utilizing multiple testing methods.
- ❑ Propose a method for rapid, non-destructive localization of defects, including internal anomalies.
- ❑ Develop a methodology for strength grading of historic timber, accounting for existing internal defects.

Chapter 4 details the preliminary investigations conducted on the roof truss of a historic church in Sieroty, partly dating to 1427 and partly to 1707. Seven structural elements were selected for analysis using ultrasonic tomography, a wood testing hammer, and two ultrasonic devices—one emitting longitudinal waves and the other transverse waves. The preliminary studies revealed that visual inspection identified approximately 30–50% of the existing damage, while comprehensive imaging was achieved using ultrasonic tomography. Semi-destructive and non-destructive methods were found suitable for pinpoint diagnostics, though high measurement resolution was necessary to ensure accuracy. Superior results were obtained by combining multiple non-destructive techniques. However, testing on a dense grid is labor-intensive, and semi-destructive testing (e.g., using a hammer) may be impractical in heritage contexts due to excessive perforation.

Chapter 5 presents the outcomes of non-destructive testing. Several dozen historic timber elements, originating from various regions of Poland and spanning the last 500 years (from the early 15th to the early 20th century), were subjected to non-destructive and semi-destructive tests using the same instruments as in the preliminary phase. Additional moisture content measurements were also carried out.

Chapter 6 reports on destructive tests performed on the previously non-destructively tested historic timber elements. Beams were evaluated under a four-point bending scheme in accordance with PN-EN 408 and PN-EN 384 standards. Shorter beams were

tested in a three-point bending setup. Deflections were measured using displacement transducers and the optical Aramis system. The strength of each timber element was determined.

Chapter 7 analyzes the results from destructive and non-destructive testing, including charts and formulas that illustrate correlations between them.

Chapter 8 outlines a proposed methodology for conducting tests on historic structures. The method involves identifying the number of defects in a given timber element using ultrasonic tomography and conducting point-based non-destructive tests using the three instruments employed in Chapters 4 and 5. Depending on the number of identified defects, either average correlation values or the lower bound of test results are recommended for estimating bending strength.

Chapter 9 illustrates the practical application of the proposed methodology on roof trusses from two buildings: a former spa facility from 1912 in Jastrzębie-Zdrój and the Church of St. Stanislaus the Bishop and Martyr in Czeladź from 1913. In both cases, the results were validated through destructive testing. Additionally, the methodology was applied to the roof truss of the Warmian Chapter Castle in Olsztyn, dating from the 14th and 15th centuries. Due to the structure's historical significance, destructive verification was not conducted in this instance.

Chapter 10 offers a summary and final conclusions, along with recommendations for further research.