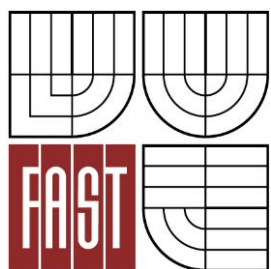




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

METODIKA PRŮZKUMU A DIAGNOSTICKÉ METODY PRO HODNOCENÍ STAVU DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

THE METHODOLOGY OF SURVEY AND DIAGNOSTIC METHODS FOR THE ASSESSMENT OF
THE STATE OF TIMBER STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZUZANA SUCHÁNKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VĚRA HEŘMÁNKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Zuzana Suchánková
Název	Metodika průzkumu a diagnostické metody pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014
V Brně dne 30. 11. 2013	

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- HOBST, L. a kol.: Diagnostika stavebních konstrukcí, knihovnicka.cz, 2005
- SVOBODA, L. a kol.: Stavební hmoty 3. vydání (elektronická kniha - plný text: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/>)
- Kolektiv autorů: Stavební látky – cvičebnice, CERM Brno, 2013
- KUKLÍK P.: Dřevěné konstrukce, ČKAIT 2005
- VINAŘ, J. a kolektiv: Historické krovy. Typologie, průzkum, opravy. Praha, Grada Publishing, a.s., 2010
- ČSN EN 408 Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností
- Další příslušné platné normy
- www.kloiber.cz

Zásady pro vypracování

Úvod - stručný úvod do problematiky bakalářské práce.

Cíl práce – vypracovat metodiku průzkumu dřevěných konstrukcí krovu a přehled diagnostických metod pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce in situ. Provést zjištění míry poškození a ověření materiálových charakteristik u konkrétního prvku dřevěné konstrukce. Teoretická část – rešerše doporučené literatury a vypracování podkladů pro řešení bakalářské práce se zaměřením na:

- materiálové charakteristiky a vlastnosti dřeva,
- diagnostické metody zkoušení dřevěných konstrukcí,
- metodiku průzkumu dřevěných konstrukcí krovu.

Experimentální část – provést zjištění míry poškození a ověření materiálových charakteristik u dřevěného prvku konstrukce. Zpracovat a zhodnotit výsledky experimentu se zaměřením na porovnání výsledků metody měření rychlosti šíření ultrazvukových vln a vybraných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva z konstrukce.

Závěr - provést krátké shrnutí a jasně a přehledně deklarovat výsledky bakalářské práce.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

METODIKA PRŮZKUMU A DIAGNOSTICKÉ METODY PRO HODNOCENÍ STAVU DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na studium diagnostických metod a metodiky průzkumu stavu dřevěných prvků. Teoretická část popisuje složení a vlastnosti dřeva, jeho znehodnocující činitele a ochranu proti nim. V další části se rozebírají jednotlivé diagnostické metody a snaží se přiblížit metodiku průzkumu v in-situ. Praktická část pak aplikuje vybrané diagnostické metody na konkrétní dřevěný prvek, vyjmutý ze stavby.

Cílem je seznámení se s postupem průzkumu dřevěných prvků a porovnání jednotlivých diagnostických metod užívaných pro dřevěné prvky.

Klíčová slova

Dřevo, metodika průzkumu, diagnostické metody, hustota dřeva, pevnost dřeva

Abstract

The bachelor thesis is focused on study of diagnostic methods and methods of research of wooden elements condition. Theoretical part describes composition and quality of wood, its destroying factors and protection against them. In other part individual diagnostic methods are analysed and they try to describe methodology of research in in-sit. Second analytical parts apply selected diagnostical methods on particular wooden elements that are taken out from construction. The goal of the bachelor thesis is explanation of procedure of wooden elements research. Comparison of individual diagnostic methods that are used for wooden elements is another part of goal.

Keywords

Wood, methodology of research, diagnostic methods, thickness of wood, strength of wood

Bibliografická citace VŠKP

Zuzana Suchánková *Metodika průzkumu a diagnostické metody pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce*. Brno, 2014. 57 s., 7 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Věra Heřmánková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.5.2014

.....
podpis autora
Zuzana Suchánková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Věře Heřmánkové Ph.D. za rady, podporu a vedení při zpracování mé bakalářské práci. Poděkování patří také mé kamarádce Soni Dvořáčkové za dobrou spolupráci při zpracovávání praktické části. Děkuji rodině a přátelům za podporu v těžkých okamžicích.

OBSAH

1	Úvod	11
1.1	Cíle práce	11
2	Struktura a vlastnosti dřeva	12
2.1	Struktura dřeva	12
2.1.1	Makroskopická stavba dřeva – základní prvky struktury dřeva	12
2.1.2	Mikroskopická stavba dřeva	15
2.2	Druhy dřevin	15
2.2.1	Jehličnaté dřeviny	16
2.2.2	Listnaté dřeviny	17
2.3	Vlastnosti dřeva	17
2.3.1	Fyzikální vlastnosti dřeva	18
2.3.2	Mechanické vlastnosti dřeva	21
2.4	Vady dřeva	25
2.5	Poruchy dřevěných konstrukcí a ochrana dřeva	25
2.5.1	Dřevokazné houby	26
2.5.2	Dřevokazný hmyz	27
2.5.3	Abiotická degradace	28
2.5.4	Konstrukční ochrana dřeva	29
3	Metodika průzkumu dřevěných konstrukcí	30
3.1	Stavebně technický průzkum	30
3.2	Stavebně historický průzkum	31
3.3	Postup průzkumu	31
4	Diagnostické metody	33
4.1	Vizuální hodnocení	33
4.2	Měření vlhkosti	33
4.3	Měření šíření ultrazvukových vln	34

4.4	Radiační diagnostické metody	36
4.5	Odporové zarážení trnu	37
4.6	Odporové mikrovrtání	38
4.7	Odporové zatlačování trnu a vytlačování vrutu.....	39
4.8	Zkoušení radiálních vývrtů.....	40
4.9	Zkoušení tahových mikrovzorků	41
4.10	Endoskopie	42
4.11	Odběr vzorků pro laboratorní zkoušky	43
5	Diagnostika dřevěného prvku	45
5.1	Vizuální vyhodnocení.....	46
5.2	Měření vlhkosti.....	47
5.3	Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln.....	47
5.3.1	Přímé měření napříč vláken	48
5.3.2	Přímé měření podél vláken	49
5.4	Stanovení pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny.....	50
6	Posouzení nosníku na ohyb a smyk	54
6.1	Vstupní údaje	54
6.2	Namáhání prostým tlakem.....	55
6.3	Namáhání ohybem	55
6.4	Namáhání smykem	55
7	Závěr.....	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení dřev podle hustoty dřeva při $w=12\%$ (podle Matoviče 1993) [4]	19
Tab. 2 Odhad stupně poškození dřeva na základě průměrné rychlosti šíření ultrazvukového vlnění napříč vláken (vlhkost 12-16 %).....	36
Tab. 3 Třídy pevností - charakteristické hodnoty pro jehličnaté dřeviny	44
Tab. 4 Třídy pevnosti - charakteristické hodnoty pro listnaté dřeviny	44
Tab. 5 Výsledky měření přístrojem Hygrotest 6500.....	47
Tab. 6 Výsledky měření rychlosti šíření ultrazvukových vln podél vláken	49
Tab. 7 Přepočítané průměrné pevnosti v tlaku	52

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Porovnání ultrazvukových měření napříč vláken AC	48
Graf 2 Porovnání ultrazvukových měření napříč vláken BD	48
Graf 3 Porovnání ultrazvukových měření podél vláken	49
Graf 4 Porovnání rychlostí získaných ultrazvukovým přístrojem s naměřenými průměrnými pevnostmi	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schematické znázornění základních řezů kmenem (Balabán, 1955) [3].....	12
Obr. 2 Makroskopická struktura dřeva (Wagenführa 1989) [4]	13
Obr. 3 Dřevomorka domácí [8].....	26
Obr. 4 Koniofora sklepní [9].....	26
Obr. 5 Trámovka plotní [10].....	27
Obr. 6 vlevo - Tesařík krovový [11], uprostřed – Červotoč proužkovaný [12], vpravo – Pilořitka velká [13]	28
Obr. 7 Vlhkoměr Hygrotest 6500	34
Obr. 8 Ultrazvukový přístroj TICO umožňuje použití více sond o různých frekvencích. ..	35
Obr. 9 Možnost přikládání sond při měření ultrazvukem [7]	35
Obr. 10 Radiogram masivního jedlového trámu v konstrukci krovů [17].....	37
Obr. 11 Pilodyn 6J	37
Obr. 12 Přístroj Resistograph firmy Rinntech [17].....	38
Obr. 13 Grafický záznam naznačující snížení odporu dřeva vlivem hniloby [17]	39
Obr. 14 Detail prŕniku základnou přístroje [17].....	40
Obr. 15 Vrták a zatěžovací čelisti s vyfrézovanou drážkou pro radiální vývrt [17]	41
Obr. 16 Okružní pila s pojezdem upravená pro odběr tahových mikrovzorků [17]	42
Obr. 17 Endoskopický přístroj Videoprobe XL PRO [7]	43
Obr. 18 Fotodokumentace zabudovaného prvku	45
Obr. 19 Fotodokumentace prvku s vyznačenými místy pro měření	45
Obr. 20 Fotodokumentace celého prvku	46
Obr. 21 Fotodokumentace čel prvků.....	46
Obr. 22 Schéma rozřezání vzorku.....	50
Obr. 23 Fotodokumentace rozřezaného vzorku na zkušební hranoly	50
Obr. 24 Detail poškození vzorku tesaříkem.....	51
Obr. 25 Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tlaku.....	51
Obr. 26 Vnitřní síly na prvku.....	54

1 Úvod

Dřevo spolu s kamenem se vyskytuje volně v přírodě a tvoří nejstarší materiál, který napomáhal lidstvu k jeho přežití a k rozvoji civilizace. Vývoj probíhal celá tisíciletí, během nichž se zdokonalovaly spoje prvků, druhy řeziv nebo stroje na zpracování nebo obrábění dřeva. Stále je snaha o dokonalejší navrhování dřevěných konstrukcí, nové postupy zušlechťování dřeva nebo vyvíjení nových spojovacích prostředků.

I přes jeho nedostatky, které se mohou omezit nebo zcela vyloučit, dřevo díky svým vlastnostem nachází uplatnění v mnoha odvětvích počínaje stavebními konstrukcemi, dále v nábytkářském průmyslu, při výrobě hudebních nástrojů a v mnoha dalších. Ve stavebnictví se využívá například pro zastřešení budov, výrobních hal, kostelů, dřevostaveb, srubových domů, mostů pro pěší a další.

Stavebně technický průzkum se vždy provádí smyslovou metodou kvůli šetrnosti k materiálu, ale díky moderním diagnostickým přístrojům se dosahuje lepšího pohledu na konstrukci z hlediska určení vlastností, detekce znehodnocujících činitelů a další. Mnoho konstrukcí je díky jejich stáří nazýváno historickou konstrukcí, proto se k ní musí tak přistupovat, navíc se u nich musí provádět stavebně historický průzkum. Ve většině případů historických konstrukcí je potřeba co nejmenšího zásahu do konstrukce použitím nedestruktivních či semi-destruktivních přístrojů. Při nutnosti ověření či doplnění hodnot se odeberou vzorky pro laboratorní zkoušky.

1.1 Cíle práce

Praktická část bakalářské práce pojednává o využití vybraných diagnostických metod na dřevěný prvek vyjmutý ze stavby. Budou na něj vyznačeny řezy po 20 mm, na kterých se provede posuvným měřidlem změření rozměrů a použitím ultrazvuku se zjistí doba průchodu šířených vln materiálem. Na každém pátém řezu se změří vlhkost, která se porovná s vlhkostí zjištěnou váhovou metodou pro celý prvek. Po rozřezání prvku na malé hranoly se provede změření a zvážení každého z nich. Poté se vystaví zkoušce pevnosti v tlaku, přičemž získáme maximální síly na jednotlivé vzorky, z nichž zjistíme pevnost v tlaku. Po zatřídění dřeva podle získané pevnosti se provede posouzení prvku na tlak, ohyb a smyk. Cílem je zjištění druhu a rozsahu porušení a vlastností zkoušeného vzorku.

2 Struktura a vlastnosti dřeva

2.1 Struktura dřeva

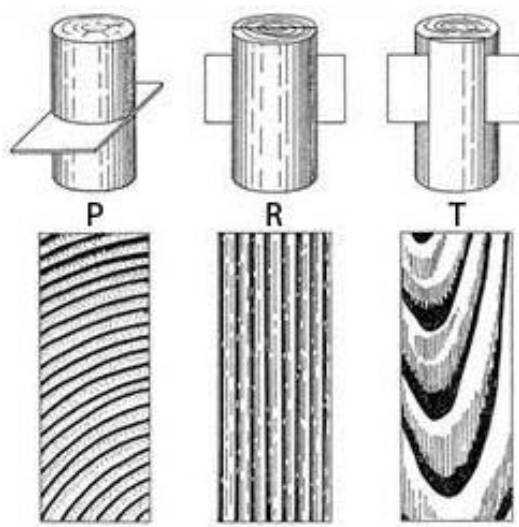
Dřevo je organický, nehomogenní, anizotropní, hygroskopický materiál. [1] Může se také nazvat ekologickým materiálem, patřícím k obnovitelným zdrojům energie. Jako stavební materiál je dřevo oblíbeno pro velmi dobrou pevnost při malé objemové hmotnosti, malou tepelnou vodivost, lehkou opracovatelnost, estetický vzhled a barvu. Mezi negativa se zahrnuje hořlavost, změnu tvaru a mechanických vlastností v závislosti na vlhkosti, podléhání atmosférickým vlivům a také živočišným i biologickým škůdcům.

Stavba dřeva se rozděluje podle měřítká zkoumání na makroskopickou stavbu, mikroskopickou stavbu a submikroskopickou stavbu dřeva.

2.1.1 Makroskopická stavba dřeva – základní prvky struktury dřeva

Makroskopická stavba dřeva neboli struktura dřeva je pozorovatelná pouhým okem, případně pomocí zvětšovacího skla. Projevuje se na řezu dřevem tzv. texturou. Využívá se k určení druhu dřeva, jeho vad a třídění jakosti. Má vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti a na zpracovatelnost. [2]

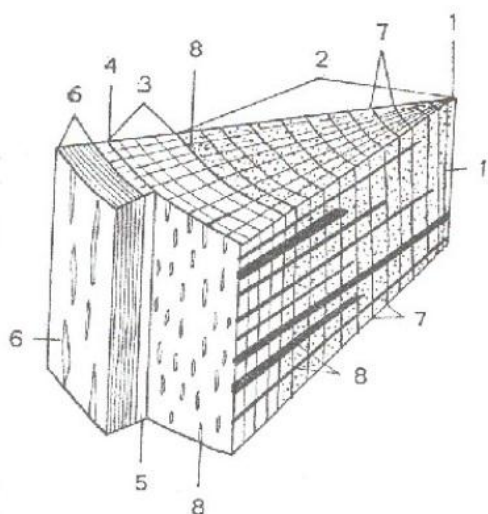
Anizotropie dřeva vyjadřuje různé vlastnosti v různých směrech. [2] Vzhledem k vláknité a kuželovité až válcovité vrstevnaté stavbě se musí dřevo zkoumat ve třech rovinách a směrech:



Obr. 1 Schematické znázornění základních řezů kmenem (Balábán, 1955): P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez [3]

- Příčný (transverzální) řez – čelní, v rovině kolmé k ose kmene, soustředěně probíhající letokruhy
- Podélný (radiální) řez – poloměrový, středový, v rovině rovnoběžné s osou kmene procházející dření (středem), letokruhy mají tvar svislých pásů
- Podélný tečnový (tangenciální) řez – fládrový, v rovině rovnoběžné s osou kmene neprocházející dření, letokruhy mají parabolický tvar

Hlavní části kmene, které se rozlišují v příčném řezu, jsou kůra, kambium, dřevo a dřev.



Obr. 2 Makroskopická struktura dřeva (Wagenführ 1989): 1 – dřev, 2 – jádro, 3 – běl, 4 – kambium, 5 – lýko, 6 – borka, 7 – letokruh, 8 – dřevové paprsky [4]

Kůra se nachází na obvodu kmene, představuje 6 - 25 % objemu stromu. Kůra je soubor povrchových vrstev kmene stromu obklopující jeho středové části. Vzniká činností sekundárních dělivých pletiv felogenu a kambia. [4] Slouží jako ochrana kambia a dřeva proti vysychání, změnám teplot, škůdcům a dalším. Skládá se z několika částí – borka (vnější vrstva), zelená kůra, lýko (vnitřní vrstva).

Kambium je dělivé pletivo, vrstva makroskopicky nerozlišitelná, která se nachází mezi lýkem a dřevem. Skládá se z živých buněk, které zajišťují růst nových buněk lýka a dřeva. Tyto buňky jsou schopné dělení po celý život stromu.

Dřev je hlavní nejvyužívanější částí kmene a nachází se mezi kambiem a dření. Dřev spolu s dření představuje 70 - 93 % objemu stromu. [4] Makroskopické znaky dřeva se rozlišují na letokruhy, běl, jádro, vyzrálé dřev, dřevové paprsky, dřevové skvrny, pryskyřičné kanálky, cévy a suky. Mezi doplňkové makroskopické znaky se řadí barva, lesk, textura, hustota, tvrdost a vůně dřeva.

- **Jádro** je tmavěji zbarvená část kmene obklopující dřeň, zvyšující stabilitu kmene. Jádrové dřeviny jsou charakterizovány pravidelným tvarem, bez zřetelné hraniční čáry. Jádrové dřevo je trvanlivější, odolnější vůči znehodnocujícím činitelům, má vyšší hustotu a nižší náchylnost k sesychání a bobtnání než bělové dřevo. Jádrové látky způsobují ztmavnutí pletiv dřeva, projevující se odlišným, tmavším, zbarvením v porovnání s bělí. Vlivem biotických a abiotických činitelů dochází u některých dřevin k porušení fyziologických pochodů a jádro nevytvoří charakteristický znak. Takové jádro je označováno jako nepravé jádro a je řazeno do vad dřeva.

- **Běl** je vnější část od jádra po kůru přiléhající ke kambiu, světlejší než jádro. Je charakteristická obsahem živých parenchymatických buněk, jež jsou obsaženy v celém průřezu kmene a jsou schopny vodit živiny a ukládat zásobní látky. Díky vodivé funkci má běl vyšší vlhkost a je náchylnější vůči napadení biologickými činiteli. Bělové dřeviny tzv. bezjádrová dřeva jsou charakterizovány různě širokou vrstvou dřeva, která není barevně odlišena a zabírá veškerou plochu řezu.

- **Vyzrálé dřevo** je centrální část kmene, které není barevně odlišeno od běle, má však nižší vlhkost než běl. Má všechny charakteristické znaky jádra vyjma tmavšího zbarvení.

Dřeň je řídké světlé pletivo, složené z tenkostěnných isodiametrických, parenchymatických buněk, které se nachází v centrální části kmene. Dřeň je měkčí konzistence než dřevo a nachází se zde zásobní živiny. Má negativní vliv na vlastnosti dřeva a má velmi malé mechanické vlastnosti. Při vysychání vznikají od dřeně paprskovité trhliny, které ovlivňují vlastnosti dřeva porušením celistvosti.

Letokruhy jsou převážně koncentrické, na sebe nasedající, vrstvy obklopující dřeň. Letokruh je roční přírůstek dřeva vytvořený během jednoho vegetačního období. Dřevo přirůstá v době vegetačního období, načež v období vegetačního klidu, kdy kambium nevytváří nové pletivo, dochází k přerušení tloušťkového růstu a výsledkem jsou letokruhy. Ve výjimečných případech se mohou vytvořit dva letokruhy za jedno vegetační období nebo nedojde k tvorbě žádné vrstvy. Může se také stát, že se vytvoří pouze v části kmene. Šířka a struktura letokruhů nezávisí pouze na stáří a druhu dřevin, ale také na postavení a podmínkách v místě růstu. V důsledku změny vlhkostí během vegetačního období se vytvářejí dvě, barevně i strukturálně, rozdílné vrstvy – jarní a letní dřevo.

- **Jarní dřevo** – vnitřní, světlejší a měkčí část, má nižší hustotu, vede vodu s minerálními látkami z kořenů do celého stromu. Vytváří se na začátku vegetačního období při dostatečném přísunu vody ve dřevě.
- **Letní dřevo** – vnější, tmavší a tvrdší část, má vyšší hustotu, dodává pružnost, pevnost a tvrdost. Vytváří se v druhé části vegetačního (resp. letního) období, kdy je nižší vlhkost v půdě.

2.1.2 Mikroskopická stavba dřeva

Mikroskopická stavba je tvořena souborem anatomických znaků, které lze pozorovat pouze pomocí mikroskopu a díky nimž se může dřevina zatřídit. Submikroskopickou stavbu buněčné stěny je možné pozorovat za pomoci elektronových mikroskopů při několikanásobném zvětšení. Předmětem popisu mikroskopické stavby dřeva jsou rozměry, uspořádání a složení buněk. [2]

Charakteristickým znakem jehličnatých dřevin jsou tracheidy, tvořící 87 - 95 % objemu dřevní hmoty. Dalšími znaky jsou parenchymatické buňky, tvořící dřeňové paprsky, podélný dřevní parenchym a pryskyřičné kanálky.

Charakteristickým prvkem listnatých dřevin jsou tracheje (cévy), tvořící až 75 % objemu. [2] Mezi další znaky listnatých dřevin patří libriformní vlákna, tracheidy a parenchymatické buňky, z kterých se skládají dřeňové paprsky a podélný dřevní parenchym.

2.2 Druhy dřevin

Základní dělení dřevin je do dvou skupin - listnaté a jehličnaté. Poté se mohou dále rozdělit na měkké a tvrdé. Další dělení je z hlediska makroskopické stavby, kde se rozlišují dřeviny na bělové a jádrové. Bělové dřeviny jsou v celém průřezu kmene jednobarevné a přiřazují se k nim dřeviny s vyzrálým dřevem. Oproti tomu dřeviny jádrové se vyznačují tmavší zónou ve střední části se světlejší obvodovou vrstvou bělí.

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem provedl první cyklus národní inventarizace lesů ČR v letech 2001-2004, jedním z jeho výsledků je plošného zastoupení jednotlivých druhů dřevin v procentech z celkové plochy dřevin. Výsledky

inventarizace poukazují na fakt, že jehličnaté dřeviny zaujímají 67,2 % celkové plochy. Největší zastoupení jehličnanů má smrk ztepilý (47,7 %) a druhý v pořadí je borovice (13,9 %). Listnaté dřeviny zaujímají celkem 32,8 % a nejvyšší zastoupení má dub (7,4 %) a buk (7,2 %). [5]

2.2.1 Jehličnaté dřeviny

Jehličnany jako smrk, borovice, jedle a modřín jsou měkké dřeviny. Najdou se však mezi nimi i jehličnany, které se řadí mezi tvrdé dřeviny, jimiž jsou tis a jalovec. Kromě modřínu jsou jehličnany neopadavé. Délka jejich růstu je 80 až 100 let, dosahující výšky 25 - 40 m a dorůstající průměru 1 - 2 m. Smrk, jedle a borovice jsou ve stavebnictví nejpoužívanějšími dřevinami, naopak modřín je využíván k dekoračním účelům. Jehličnaté dřeviny se řadí mezi nahosemenné rostliny, nemají póry, mají zřetelné letokruhy a velmi malý podíl dřeňových paprsků.

Smrk je nejpoužívanějším průmyslovým dřevem. K jeho pozitivním vlastnostem patří měkkost, lehkost, pružnost, dobrá štípatelnost, snadná zpracovatelnost a trvanlivost v suchém prostředí. Naopak v prostředí s vyšší vlhkostí smrkové dřevo hnije. Smrk má bílou až nažloutlou barvu, je bez jádra a oproti ostatním jehličnanům má suky pevně zarostlé. Smrkové dřevo se používá v nábytkářském průmyslu a pro stavební práce nevystavené vlhkému prostředí.

Jedle má šedobílou, někdy až narůžovělou barvu dřeva, s vypadávajícími a zahnívajícími suky. Jedlové dřevo, jehož většina vlastností je podobná smrkovému dřevu, je měkké, velmi dobře štípatelné, pružné, ohebné, nosné, velmi trvanlivé pod vodou a hodně sesychá. Oproti smrkovému dřevu je však méně trvanlivé a náročnější na zpracování. Jedlové dřevo se používá ve stavebním průmyslu.

Borovice má načervenalé, jádrové, velmi sukovité dřevo s vypadávajícími či uvolňujícími se suky. K vlastnostem borového dřeva patří křehkost, lehkost a odolnost ve vodě i ve střídavém prostředí vlhka a sucha. Jelikož je dřevo málo pružné a ohebné, nesmí se používat pro konstrukce namáhané ohybem. Využívá se pro stavební stolařství, například pro výrobu venkovních dveří, okenních rámu, pražců a dalších.

Modřín je jediný z jehličnanů, jehož jehličí každoročně opadává. Modřínové dřevo má světle žlutou barvu, zřetelné letokruhy a velké množství pryskyřice. Je polotvrdé

a velmi pružné dřevo, které je odolné ve střídavém prostředí vlhka a sucha. Z našich jehličnanů je nejtvrdší, nejpevnější, nejtrvanlivější a lehce štípatelný. [6] Používá se pro vodní stavby a také pro stavebně-stolařské práce na výrobu např. dřevěných obkladů.

2.2.2 Listnaté dřeviny

Listnaté dřeviny se zařazují do skupiny krytosemenných rostlin. Dělí se na tvrdé a měkké dřeviny. Měkké se dále dělí na bělové a jádrové, přičemž mezi bělové patří lípa, osika, olše a kaštan (jírovec), mezi jádrové patří topol a vrba. Tvrdé se rozdělují stejně jako měkké na bělové a jádrové. Tvrdé bělové jsou buk, habr, javor a bříza, a mezi zástupce jádrových se řadí dub, jasan, jilm, akát, ořešák a ovocné dřeviny, což jsou švestka, třešeň, hrušeň, jabloň. Další dělení listnatých dřevin je na nezřetelně pórovité a zřetelně pórovité, které se ještě dále rozdělují na kruhovitě pórovité, polokruhovitě pórovité a roztroušeně pórovité dřeviny. Doba růstů listnatých dřevin je 120 až 150 let, dorůstající do výšky 20 - 25 m (dub až 60 m) a do průměru až 1,5 m (dub až 3 m). Nejpoužívanějším dřevem ve stavebnictví je dřevo dubové a bukové, ostatní se většinou nepoužívají. Jasan, javor, bříza a lípa mají využití na truhlářské a řezbářské práce.

Dub je jádrové dřevo, jehož vlastnostmi jsou tvrdost, houževnatost, trvanlivost, velká pevnost a pružnost. Má velkou pevnost v tahu i v tlaku, které se využívá pro výrobu kolíků, klínu a hmoždíků. Je-li dřevo impregnováno, je obzvlášť odolné proti ohni. Je nejtrvanlivější dřevinou pro střídavé prostředí vlhka a sucha. Nejlepší využití dubového dřeva je pro stavební práce např. okna, dveře, náročné konstrukce mostních a vodních staveb, pražce, parkety, nábytek a další.

Buk má měkčí dřevo než dub a není tak houževnaté. Bukové dřevo má červenohnědou barvu, která se získává pařením dřeva. Je těžko opracovatelné, málo pružné a trvanlivé. Je-li špatně naimpregnováno, není dobře odolné proti vlhkosti. Používá se k výrobě překližek a dýh.

2.3 Vlastnosti dřeva

Dřevo má v různých směrech různé vlastnosti. [6] Při použití dřeva jako stavebního materiálu se zjišťují především fyzikální a mechanické vlastnosti. Jelikož jsou tyto vlastnosti závislé na průběhu vláken, provádí se zkoušky ve více směrech (podél vláken,

kolmo na vlákna – tangenciální, radiální směr) za předepsané vlhkosti. Největší pevnost i tuhost a nejmenší deformace má však pouze v podélném směru.

2.3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Fyzikální vlastnosti se mohou zkoumat bez narušení celistvosti materiálu či chemického složení. Mezi fyzikální vlastnosti se řadí vlhkost, hustotu, tepelné, akustické a elektrické vlastnosti dřeva a také povrchové a optické vlastnosti, což je barvu, kresbu a vůni dřeva.

Vlhkost dřeva je poměr hmotnosti vody k hmotnosti sušiny dřeva. Vyjadřují se nejčastěji v procentech suché hmotnosti dřeva – vlhkost absolutní ω_{abs} , někdy v procentech mokré hmotnosti dřeva – vlhkost relativní ω_{rel} . [6] Absolutní vlhkost dřeva se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. [4] Relativní vlhkost se využívá tam, kde je nezbytné znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva. [4] Metody měření se rozlišují na přímé (absolutní) a nepřímé (relativní) metody. Mezi nepřímé metody patří metody elektrofyzikální, radiometrické, akustické a termofyzikální. Přímé metody se rozdělují na destilační, jodometrickou titraci podle Fischera a na nejčastěji používanou metodu váhovou (gravimetrickou), která se vyjádří ze vztahů:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$$

kde m_1 – hmotnost zkušebního tělesa před sušením [g], m_0 – hmotnost vysušeného zkušebního tělesa [g]

Hygroskopicitu je především podmíněna vlastností buněčných stěn přijímat do sebe vodu a ukládat ji v intermicelárních prostorech. [6] Ve dřevě se nachází voda ve třech podobách jako voda chemicky vázaná (součást chemických sloučenin), voda vázaná (hygroskopická - v buněčných stěnách) a voda volná (kapilární – vyplňuje mezibuněčné prostory). Vázaná voda má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, zato volná voda slouží k transportu minerálních látek ve stromě. Voda hygroskopicky vázaná se nachází ve dřevě při vlhkosti do 30 %. Hodnota vlhkosti 30 % je stav, kdy jsou všechny buněčné stěny zcela nasyceny vodou, a nazývá se bodem nasycení vláken. Při změně vlhkosti pod 30% (nazývající se hygroskopické vlhnutí a vysychání) se zvětšuje

a zmenšuje tloušťka buněčných stěn a důsledkem toho dochází k bobtnání a vysychání. Následkem bobtnání a sesycháním dřeva dochází k borcení dřeva, způsobené nerovnoměrným vysoušením a vadami dřeva. Zabránit těmto nepříznivým procesům lze například ochrannými nátěry nebo napouštění dřeva různými látkami.

Hustota dřeva je charakterizována podílem hmotnosti dřeva k jeho objemu při určité vlhkosti. Hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí, ale hmotnost a objem dřeva nerostou stejným způsobem. [4] Zatímco hmotnost dřeva roste se zvyšující se vlhkostí až do maximální vlhkosti dřeva, objem se zvyšuje jen do bodu nasycení buněčných stěn. [4] Následující vlhkostní stavy používáme pro charakteristiku hustoty dřeva:

- Hustota dřeva v suchém stavu ($w = 0 \%$)

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

kde m_0 – hmotnost suchého dřeva [kg], V_0 – objem suchého dřeva [m^3]

- Hustota dřeva vlhkého ($w > 0 \%$)

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

- Hustota dřeva při vlhkosti 12% - dosaženo dlouhodobějším vystavením dřeva běžným podmínkám ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 65 \%$) podle normy

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}}$$

Tab. 1 Rozdělení dřev podle hustoty dřeva při $w=12 \%$ (podle Matoviče 1993) [4]

Dřeva s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg/m}^3$)	borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba, olše, osika, jírovec
Dřeva se střední hustotou ($\rho_{12} = 540 - 750 \text{ kg/m}^3$)	modřín, bříza, buk, dub, ořešák, jilm, jabloň, jasan, jeřáb, třešeň, kaštanovník
Dřeva s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$)	habr, moruše, akát, hrušeň

Tepelné vlastnosti dřeva se využívají při problémech spojených se sušením dřeva. Zjišťuje se množství tepla potřebné pro ohřátí na požadovanou teplotu, a také jakou teplotu lze zjistit v daném bodě tělesa v daném čase. Mezi tepelné vlastnosti, které se u dřeva zjišťují, patří teplotní roztažnost, měrné teplo, přenos a vedení tepla.

Pokud se zvyšuje teplota, dochází ke zvyšování energie molekul tělesa a konečným výsledkem je zvětšení rozměru tělesa. Tento proces se nazývá teplotní roztažnost a je definována koeficientem teplotní roztažnosti α , který vyjadřuje změnu jednotkové délky při ohřátí o 1°C. Teplotní rozměrové změny, které mají nízké hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti, jsou na rozdíl od změn způsobených vlhkostí zanedbatelné.

$$\alpha_i = \frac{l_T - l_0}{l_0 \cdot \Delta T}$$

kde l_T – rozměr po změně teploty ΔT [m], l_0 – počáteční rozměr [m], α_i – koeficient teplotní roztažnosti v i-směru [$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Tak jako většina látek, je i dřevo schopné akumulovat teplo. Definuje ho veličina měrné teplo, udávající množství tepla, potřebné k ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1K. Nezávisí na hustotě ani na druhu dřeva, ale na teplotě a vlhkosti.

U dřeva máme 3 základní formy přenosu tepla – vedení (kondukcí), proudění (konvekcí) a sálání (radiací). Veličinou přenosu tepla je koeficient tepelné vodivosti λ , popisující změnu teploty v prostoru při předpokladu konstantního průběhu v čase. Nejdůležitějšími faktory ovlivňující koeficient tepelné vodivosti je anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost. Přenos tepla se využívá k určení sušících režimů a posuzování tepelně izolačních vlastností.

Hořlavost dřeva je schopnost látky se vznítit, žhnout a hořet. Hořlavost je spojena s přenosem tepla ve dřevě a je ovlivněna chemickým složením dřeva, okolním prostředím (vlhkost, teplota) a přítomností pomocných látek (např. lepidla). Je charakterizována bodem vzplanutí, bodem hoření a bodem zápalnosti.

Elektrické vlastnosti ve dřevě mají anizotropní charakter. Měrný elektrický odpor je nejmenší podél vláken, oproti odporu napříč vláken, kdy je téměř dvakrát větší. Na tyto vlastnosti má vliv teplota, vlhkost, hustota a kontaminace dřeva chemickými látkami. Pokud na dřevo působí elektromagnetické pole, rozděluje se na pole elektrické a magnetické. Vliv magnetického pole je zanedbatelný, zato elektrické pole má výrazný vliv a v interakci se dřevem vzniká ve dřevě elektrický proud. Jedna z nejvýznamnějších vnitřních vlastností dřeva je schopnost polarizace, což je změna prostorového uspořádání elektricky nabitých částic dřeva pod vlivem vnějšího elektrického pole.

Akustické vlastnosti dřeva vyjadřují schopnost materiálu tlumit, vést nebo zesílit zvuk. Při působení vnějších periodických sil určité frekvence, začne dřevo vibrovat.

Vibrace ve dřevě můžeme rozdělit na podélné, příčné a torzní. Rychlost šíření zvuku ve dřevě je vyšší, pokud je větší jeho modul pružnosti a menší jeho hustota, ale klesá s rostoucí vlhkostí. Ve směru vláken je rychlost šíření zvuku přibližně 4500 m/s a napříč vláken 1100 m/s. Rezonanční vlastnost dřeva je schopnost dřeva zesilovat zvuk bez zkreslení. Dřevo má velmi dobré akustické vlastnosti, proto se používá pro výrobu hudebních nástrojů nebo k zlepšení akustiky v divadlech či koncertních sálech.

2.3.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují schopnost dřeva odolávat účinku vnějších sil. [4] Při mechanickém namáhání dochází k dočasným nebo trvalým změnám tvaru. Míru deformace ovlivňuje vnitřní odpor dřeva, který závisí na směru vláken, vlhkosti, teplotě a vadách dřeva. Významně se liší hodnoty pevnosti dřeva ve směru vláken a kolmo na vlákna.

Pružnost dřeva je schopnost dřeva dosahovat původního tvaru a rozměrů po uvolnění vnějších sil. [4] Modul pružnosti udává hodnotu napětí, při níž se mění pevnostní parametry dřeva v mezích pružnosti.

▪ **Modul pružnost v tahu a tlaku** je charakterizován podílem napětí a poměrné deformace. [4] Vyjadřuje se v MPa.

$$E_i = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$$

Při průměrné absolutní vlhkosti 12 % se pro domácí dřeviny udává průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu a tlaku ve směru vláken v rozpětí 10 000 - 15 000 MPa, přičemž napříč vláken je tato hodnota 25x menší. Avšak v radiálním směru je tato hodnota cca o 20 - 50 % vyšší než v tangenciálním směru.

Modul pružnosti kolmo na vlákna se vyjadřuje ve statickém ohybu a zkouší se pouze v tangenciálním směru. Odvozuje se z normálového namáhání tělesa vyvolaného ohybovým momentem, přičemž je jedna strana namáhána tlakem a druhá strana tahem.

Smykový modul pružnosti – při smykových napětích je vztah mezi poměrným posunutím a příslušným napětím zpočátku lineární. Rozlišují se tři smykové moduly pružnosti – ve směru tangenciálně podélném, radiálně podélném a radiálně tangenciálním. Pro domácí dřeviny se hodnoty pohybují v rozmezí 100 - 2 000 MPa.

Pevnost dřeva charakterizuje odpor dřeva proti jeho trvalému porušení. [4] Může se také vyjádřit jako napětí, při kterém dojde k porušení soudržnosti. Pevnost dřeva se určuje pomocí zkoušek, kde se zjišťuje skutečné napětí ve chvíli, kdy se těleso poruší. Výjimkou je zjišťování pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken, jelikož v tomto případě nelze dosáhnout konečného porušení tělesa. Pro vzájemnou porovnatelnost získaných hodnot pevnosti dřeva byla přijata dohoda o zkušebních postupech, která definuje podmínky, při kterých se pevnost zjišťuje.

- **Pevnost v tahu** je odpor dřeva proti prodloužení a z důvodu anizotropie se rozlišuje na pevnost v tahu ve směru vláken, napříč vláken – ve směru radiálním a ve směru tangenciálním. Tahovou pevnost ovlivňuje směr vláken, hustota, vlhkost a anatomická stavba.

Mez pevnosti v tlaku ve všech směrech v MPa se vypočítá podle vztahu:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

kde F_{max} – největší zatížení [N], A – plocha průřezu [mm²]

Pevnost dřeva v tahu podél vláken má díky vláknitému tvaru buněk a struktury buněčných stěn největší pevnost oproti ostatním pevnostem v dalších směrech, jeho průměrná hodnota se udává 120 MPa. Při namáhání dochází k roztrhání buněk v pracovní části. Tahová pevnost podél vláken se dostatečně nevyužívá, jelikož nejčastějším poškozením dřeva je porušení smykem a otláčením.

Zatížení dřevěného prvku napříč vláken by se mělo vyvarovat, jelikož má nejmenší pevnost pohybující se v rozpětí 1,5 až 5 MPa. Nízká pevnost je způsobena slabšími vazbami vodíkovými a Van der Walsovými. Největší význam má tato pevnost při řezání a stanovení režimu sušení.

- **Pevnost v tlaku** je odpor dřeva proti vnějším silám, snažící se dřevo stlačit. Vzhledem k orientaci vláken a letokruhů se dělí na pevnosti ve směru vláken a napříč vláken (ve směru radiálním a tangenciálním). Mez pevnosti v tlaku $f_{c,0}$ se vypočítá podle stejného vzorce jako pevnost v tahu.

Velice důležitou vlastností je pevnost dřeva podél vláken, kdy při působení tlakového zatížení dochází ke zkrácení délky tělesa, které závisí na jakosti, stavbě dřeva, vlhkosti a hustotě. Při působení tlaku na suché dřevo vysoké hustoty se vzorek porušuje

smykem pod úhlem 60° k podélné ose tělesa. Pokud je vzorek vlhký s nízkou hustotou, otlačují se vlákna na čelních plochách a dochází k vybočení stěn tělesa.

S ohledem na makroskopickou stavbu letokruhu se dřevo postupně deformuje dvoufázově nebo třífázově. Působení tlaku napříč vláken většinou nezpůsobuje celkové porušení tělesa, proto se pevnost v tlaku určuje z meze úměrnosti na základě stanovených kritérií – konvenční mez pevnosti. Tlak napříč vláken lze rozdělit do tří skupin - tlak na celou plochu, tlak na část délky nebo tlak na část délky a šířky. Při zatížení napříč vláken je konvenční mez pevnosti průměrně 10krát menší než pevnost v tlaku podél vláken.

- **Pevnost ve smyku** je odpor dřeva proti vnějším silám, způsobující posunutí jedné části po druhé a ve všech základních směrech má díky anizotropii různou smykovou pevnost. Při zatížení smykem působí i jiná napětí (např. tlak, tah) a je významnou, někdy rozhodující úlohou. Na pevnost má vliv vlhkost, hustota a anatomická stavba. Smyková pevnost se rozlišuje ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině, napříč vláken v radiální a tangenciální rovině a smyková (stříhová) pevnost napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru.

Pevnost ve smyku rovnoběžně s vlákny se uvádí v MPa podle vztahu:

$$f_v = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{b \cdot l}$$

kde F_{max} – maximální smykové zatížení [N], b – šířka tělesa [mm], l – délka tělesa [mm]

Smyková pevnost ve směru vláken je poměrně malá oproti ostatním smykovým pevnostem. Prvky namáhané smykem mohou být způsobeny vlivem kroucení, působením posouvajících sil nebo přímým smykem v oblasti kontaktních spojů. Smyková pevnost napříč vláken se nachází například u dřevěných klínů, zato stříhová pevnost je u kolíkových spojů nebo pod kovovými spoji dřevěných prvků.

- **Pevnost v ohybu** je významná mechanická vlastnost. Charakterizuje odpor materiálu podepřeného na dvou místech proti dvěma působícím zatížením umístěné mimo opěry symetricky na vzdálenosti $6h$ (lze změnit max. o $1,5h$). Při tomto zatížení dochází v horní části k tlaku a ve spodní části k tahu. Nejdříve dojde k odštěpení krajních vláken a nakonec ke zlomu tělesa, který u málo pevného, křehkého dřeva je skoro hladký, za to u pevného, houževnatého dřeva třískovitý. Díky vysoké ohybové tuhosti se využívá pro prvky namáhané ohybem.

Vztah pro určení pevnosti dřeva v ohybu v MPa z Navierova vzorce:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

kde F – zatížení [N], a – vzdálenost mezi podpěrami [m], h – výška průřezu [m], b – šířka nosníku [m]

Rozlišují se dva způsoby pevnosti v ohybu. Prvním způsobem je pevnost při vláknech probíhajících rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působící napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru. Při druhém způsobu probíhají vlákna kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly nebo kolmo k působící síle. Mez pevnosti v ohybu napříč vláken je průměrně 100 MPa. [4]

- **Pevnost v kroucení** má anizotropní charakter, kde nejdůležitější je kroucení kolem podélné osy tělesa ve směru vláken. Smykové napětí působí ve dvou na sebe kolmých rovinách – paralelní rovina s osou a rovina kolmá k ose krouceného tělesa.

- **Pevnost ve vzpěru** je odpor proti kombinaci tlakové pevnosti a pevnosti v ohybu, vyskytující se u podpěrných sloupů a stojek, které mají snahu vybočit a zlomit se.

- **Dynamická pevnost** je odolnost materiálu proti namáhání, měnící se nárazem nebo rychlými změnami zatížení.

- **Houževnatost** je mechanickou práci, která je spotřebována na vytvoření plastické deformace. [4] Rozděluje se na statickou a dynamickou (rázovou) houževnatost. Statická houževnatost je mechanická energie nutná pro vznik plastické deformace. Rázová houževnatost je vlastnost dřeva schopná absorbovat práci vyvolanou rázovým ohybem.

Tvrдость dřeva závisí na směru vláken, vlhkosti dřeva, objemové hmotnosti a anatomické stavbě. Vyjadřuje odpor proti vnikání cizího tělesa do jeho struktury. Podle druhu zatížení můžeme tvrdost rozdělit na statickou a dynamickou.

Pokud se zatlačí ocelová kulička do ploch dřeva, může se zjistit statická tvrdost dřeva, jež může být zjišťována metodami podle Brinella nebo Janky. Statická tvrdost je obecně vyšší na příčné než na podélných rovinách. [4] Smrk a lípa jsou řazeny mezi měkké dřeviny, za to tvrdé dřeviny jsou habr a akát. Super tvrdou dřevinou jsou eben a guajak, které se však nevyskytují v ČR.

Dynamická tvrdost je dána podílem potenciální energie volně padající kuličky ze stanovené výšky k vytvořené otláčené ploše. Dynamická tvrdost se změní o 2 % při změně vlhkosti o 1 %.

Štípatelnost dřeva je odpor proti vnikání klínu rozdělujícímu dřevo na dvě části, za působení tlaku a ohybu. Obecně je odolnost proti štípání u dřeva listnáčů vyšší než u dřeva jehličnanů. [4] Štípatelnost závisí na vlhkosti dřeva, kdy při zvýšení vlhkosti o 1 % se sníží štípatelnost o 2 %.

Ohýbatelnost dřeva je schopnost se deformovat při působení ohybového momentu a zůstat v daném tvaru i po uvolnění sil. Požadovaného tvaru lze dosáhnout teplem a vlhkem (vařením nebo pařením) a následným vysušením pro udržení tvaru.

2.4 Vady dřeva

Definice vady konstrukce je nedokonalost konstrukce způsobená chybným návrhem nebo provedením, rozšířená o vady vzniklé před návrhem nebo provedením. Vady se rozdělují na materiálové (vady dřeva) a vady výrobní (vady dřevěných prvků).

Materiálové neboli růstové vady se projevují odchylkami ve tvaru, textuře a struktuře dřeva. Množství vad ve dřevě je základním ukazatelem kvality dřeva. Nejčastější jsou suky a trhliny. Materiálovou vadou dřeva je také biotické napadení dřeva, které se dostalo do dřeva před jeho zpracováním.

Výrobní vady vznikají nevhodným zpracováním prvků například deformace vzniklé rychlým a nerovnoměrným vysoušením.

Třetí skupinou jsou vady konstrukční vzniklé v projektu nebo při realizaci. Těmito vadami jsou nedostatečné rozměry prvků, uložení nebo spojení prvků, nedostatečná celková tuhost konstrukce, trvalé provlhávání konstrukce, omezení přístupu vzduchu, nevhodně prováděné nátěry nebo nevhodné složení sousedících konstrukcí.

2.5 Poruchy dřevěných konstrukcí a ochrana dřeva

Znehodnocení dřeva se může předcházet vhodným konstrukčním řešením, zvyšováním trvanlivosti dřeva nebo přiměřenou údržbou. Dřevo je znehodnocováno a ztrácí původní vlastnosti nejen biotickými, ale i abiotickými faktory. Nejčastějšími aspekty, které přispívají k možnosti napadání biotickými činiteli, je zatékání střechou, porušení izolace, kondenzace par, technologická voda, vzlínání, nevětraný prostor nebo nedostatečně provedená asanace. Biotické činitele lze rozdělit na mikroorganismy

(bakterie), dřevokazné houby (způsobující hnilobu) a dřevokazný hmyz (larvy vytvářející výletové otvory).

2.5.1 Dřevokazné houby

Dřevokazné houby jsou nejčastějším škůdcem způsobujícím rozklad dřeva, jenž se označuje jako hniloba a snižuje pevnost dřeva. Zvýšená vlhkost, kyslík, teplo a zdroj potravy jsou hlavními faktory k napadení biologickými škůdci. Základní rozdělení dřevokazných hub – celulózovorní (rozkládají celulózu, lignin netknutý – tzv. hnědá hniloba) a ligninovorní (rozkládají jak celulózu, tak lignin – tzv. bílá hniloba). Mezi celulózovorní houby se řadí dřevomorka domácí, koniofora sklepní, pornatka oparová, trámovka plotní, čechratka a outkovka řadová. Ligninovorní houby jsou václavka, pevník a trudnatec.

Dřevomorka domácí je nejznámější, nenáročná a nejnebezpečnější dřevokazná



Obr. 3 Dřevomorka domácí [8]

houba vyskytující se v interiéru. Je nebezpečná svojí rychlostí šíření a schopností prorůstat zdivem. Rouško je zbarveno rezavě, okraj plodnice je bílý. [1] Pokud je menší cirkulace vzduchu, teplota v rozmezí 3 - 30 °C a vlhkost kolem 30 %, jsou tyto podmínky optimální pro růst dřevomorky. Při působení dřevomorky se vyskytne hniloba, poté dřevo ztmavne, začne se rozpadat na části a nakonec se rozpadne na prach.

Koniofora sklepní – způsobem porušení se vyrovná dřevomorce a často ji také



Obr. 4 Koniofora sklepní [9]

doprovází. Je to nebezpečná houba vyskytující se v interiéru, vyžadující vyšší vlhkost, ideálně kolem 40 %. Plodnice jsou koláčovité, žluté až hnědozelené barvy. [1] Vzniká na místě zatékání a v místě přímého styku s vlhkým zdivem nebo mokrým zdivem. Způsobuje rozpad dřeva na drobné hranolky a nakonec na prach.



Trámovka plotní je houba nahnědlé nebo rezavé barvy, která napadá ve venkovních prostorách především jehličnaté dřevo, mostní konstrukce, zábradlí či ploty. Potřebuje vyšší vlhkost, ale při snížení nebo zneprístupnění vlhkosti se její růst zastaví nebo zcela odumře.

Obr. 5 Trámovka plotní [10]

2.5.2 Dřevokazný hmyz

Dřevokazný hmyz poškozuje podpovrchové vrstvy dřeva vytvářením výletových otvorů a tím oslabuje jeho profil. Larvy hmyzu zanechávají za sebou uvnitř dřeva chodbičky, kvůli nimž dřevo při větším počtu těchto chodbiček ztrácí celistvost a pevnost. Samička klade vajíčka uvnitř dřeva, z nichž během několika dní se vylíhnou larvy, které poškozuji dřevo nejvíce. V závislosti na druhu hmyzu a klimatických podmínkách je stádium larev většinou 1 až 3 roky a po zakuklení se vyvine dospělý brouk, jehož život trvá několik týdnů. Pro určitý druh hmyzu jsou charakteristické různé velikosti a tvary chodeb. Dřevo napadené dřevokazným hmyzem je často vhodným substrátem pro hnilobu – dřevokazné houby. Dřevokazný hmyz se může rozdělit do skupin na brouky, blanokřídlí, motýli a termity.

Podle hloubky se rozděluje poškození dřevokazným hmyzem na [4]:

- **Povrchové poškození** prostupuje do hloubky max. 3 mm, narušuje celistvost kůry, ale neovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva
- **Mělké poškození** prostupuje do hloubky 3 až 15 mm, snižuje jakost a mechanické vlastnosti dřeva
- **Hluboké poškození** prostupuje do hloubky přes 15 mm, způsobuje vážnější ovlivnění vlastností dřeva

Tesařík krovový je nejčastějším a nejnebezpečnějším dřevokazným hmyzem, který však může napadnout i plasty. Vývojový cyklus je 3 - 5 let, přičemž dorůstá velikosti 7 až 25 mm. Vylíhnutí dospělí brouci jsou hnědí až černí, dobře létají a napadají větší průřezy řeziv. Výletové otvory jsou oválného tvaru velikosti 4 až 7 mm. Optimální pro

jejich vývoj je teplota okolo 29 °C a vlhkost v rozpětí 30 - 35 %. Samička zasouvá vajíčka 20 - 30 mm hluboko do trhlin ve dřevě. Kromě tesaříka krovového a tesaříka fialového máme dalších cca 15 druhů tesaříků, kteří však nejsou závažnými škůdci.

Červotoč proužkovaný má vývojový cyklus dlouhý 1 - 2 roky. V dospělosti je šedohnědý až šedočerný, dlouhý 2,5 až 5 mm a široký 1 až 2 mm. Výletové otvory mají kulatý tvar a průměr 1,5 až 2 mm. K životu potřebuje vlhkost okolo 30 % a teplotu v rozmezí 21 - 24 °C. Vajíčka jsou kladena samičkou buď jednotlivě či ve skupinách do čelních ploch nebo do trhlin. Napadá konstrukce větších rozměrů, ale také nábytek, okna, dveře nebo umělecko-řemeslné dřevo. Další druhy červotočů se značně neliší.

Pilořitka má vysoké nároky na vlhkost a připomíná svým tvarem těla vosy nebo sršně. Napadá živící stromy nebo stromy čerstvě poražené, přesto jsou larvy schopné se vyvinout i v zabudovaném dřevě bez založení nové generace. Vytváří okrouhlé chodbičky s hladkými okraji o průměru 4 až 7 mm s ucpanou moučkou v barvě dřeva, které jsou podobné chodbičkám tesaříka krovového.



Obr. 6 vlevo - Tesařík krovový [11], uprostřed – Červotoč proužkovaný [12], vpravo – Pilořitka velká [13]

2.5.3 Abiotická degradace

Abiotické degradaci nelze nikdy absolutně zabránit. Nejvážnější poškození je vlivem zvýšené vlhkosti, jejímž zdrojem jsou srážková voda, kapilární voda, kondenzovaná a sorpční voda. Mezi hlavní abiotické formy lze zařadit atmosférickou korozi dřeva, termickou degradaci dřeva a chemickou korozi dřeva.

Atmosférická koroze dřeva je způsobena vlivem povětrností v exteriéru, jehož hlavním faktorem je voda, kyslík, agresivní plyny, emise, prach, sluneční záření, vítr

a teplota. Největší vliv, způsobující stárnutí dřeva mají voda a sluneční záření (změna vzhledu).

Termická degradace (rozklad) dřeva je soubor chemických reakcí způsobený zvýšenou (aktivační) teplotou a hořením, kde hraje významnou úlohu kyslík. V kritické situaci hořlavé plyny při reakci s kyslíkem vytvoří takové množství tepla, které je dostatečné k samovolnému vznícení a dřevo začne hořet – nastává požár. [14]

Chemická koroze dřeva vzniká při použití nevhodných prostředků na ochranu dřeva s obsahem síranů a chloridů, jejímž působením se snižuje pH a dřevo se rozvlákňuje. Stupeň poškození dřeva závisí na typu a koncentraci chemických látek, teplotě a času působení, ale také na vlhkosti dřeva.

2.5.4 Konstrukční ochrana dřeva

Je založena na výběru správného druhu dřeva, zajištění kvality dřeva a spojovacích materiálů, tvaru, povrchových nátěrů (sloužící k zamezení přístupu škůdců) a řešení protipožárních úseků. Důležitou úlohu hraje také skladování, přeprava nebo samotná montáž. Znehodnocení dřevěných konstrukcí může být způsobeno biologickým napadením, povětrnostními vlivy, vysokou teplotou, ohněm a mechanickým opotřebením.

Konstrukce musí být dobře odvětrávaná tak, aby nebyla překročena absolutní vlhkost 18 %. Pokud je neimpregnované dřevo v přímém styku se zdivem a bez přístupu vzduchu, většinou dochází k napadení biotickými škůdci a také k poruše samotného zdiva. Nutnou součástí je použití izolace proti vodě v interiéru či exteriéru, ať už hydroizolace nebo vzduchová mezera mezi dřevem a jiným materiálem. V konstrukci může vznikat také kondenzovaná voda, vyskytující se ve střešním plášti nebo obvodových stěnách nevhodné skladby. Kvůli ochraně dřeva proti ohni a vysokým teplotám nesmí být ve styku s komíny nebo jinými zdroji tepla.

3 Metodika průzkumu dřevěných konstrukcí

Průzkum zahrnuje získání podkladů pro projektování, provedením průzkumných prací daného objektu. Hlavním cílem průzkumu je zjištění vlastností dřeva, rozsahu poškození, typu poškození a následné vypracování návrhu opatření. Stavební průzkumy lze rozdělit na stavebně historický nebo na stavebně technický.

3.1 Stavebně technický průzkum

Úkolem je získání informací o stávajícím stavu u konstrukcí, u kterých se plánuje zachování. K nimž patří konstrukční a statický průzkum, vlhkostní průzkum a zjištění rozsahu poškození znehodnocujícími činiteli. Průzkum se provádí v minimálním, nezbytně nutným zásahem, jelikož je vždy omezen, a to cenou průzkumných prací, uvolněním, případně vyklizením prostoru pro průzkum, možnostmi provedení sond pro zjištění stavu zakrytých částí, existencí a možnostmi zkušebních metod apod. [15] Důvodem stavebního průzkumu, ať už stavebně technického či stavebně historického, je havarijní stav konstrukce, zjištění přítomnosti biologických škůdců, rekonstrukce či nástavba, změna majitele objektu nebo může být pouze preventivní. Při průzkumu je nutné se zabývat nejen samotnou konstrukcí krovu, ale také vztahem k ostatním částem, jako je zdivo, římsy i stropy pod krovem.

Rozdělují se a provádí ve třech etapách – předběžný průzkum (základní), podrobný a doplňující.

Předběžný stavebně technický průzkum získává základní informace o konstrukci. První krok zahrnuje prostudování dostupného materiálu, jako je výkresová dokumentace nebo archivní materiály se zapsanými provedenými změnami. Dalším krokem je předběžná prohlídka k orientačnímu hodnocení vlastností pomocí vyhledávacích zkušebních metod, zjištění kritických míst, stanovení výpočtového modelu nosné konstrukce a pracovní hypotézy pro podrobný průzkum.

Podrobný stavebně technický průzkum rozšiřuje informace získané v předběžném průzkumu. Úkolem průzkumu je detailnější hodnocení stavu konstrukce (materiálu) s upřesněním zjištěných vad a poruch konstrukcí. Aplikují se diagnostické metody na vybraná (kritická) místa pro zjištění vlastností, geometrických rozměrů a druhu

materiálu. Pokud není doplňkový průzkum, jsou v závěrech navržena konstrukční a provozní opatření.

Doplňkový stavebně technický průzkum se provádí před zahájením rekonstrukce a slouží k doplnění poznatků a přehodnocení nejistých závěrů předchozího průzkumu, odběrem vzorků a následných vyhodnocením v laboratoři.

Konstrukční a statický průzkum objektu zjišťuje stav konstrukce, jejich poruchy, příčiny a míru porušení pomocí smyslových, přístrojových a laboratorních metod. Smyslovými metodami se zjišťuje výskyt trhlin, deformace, poruchy spojů či poškození znehodnocujícími činiteli. Přístrojovými metodami je možno zjistit mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Rozdělením metod se zabývá kapitola 4 Diagnostické metody. Vlhkostní průzkum objektu je základním předpokladem pro návrh sanačního opatření, který bude odpovídat charakteru a stavu objektu.

3.2 Stavebně historický průzkum

Před stavebně technickým průzkumem musí být u kulturních památek proveden stavebně historický průzkum, který je zaměřen na architektonický rozbor a umělecko – historické hodnocení stavby. Užívá hlavně nedestruktivních metod (např. zjištění stáří dřevěné konstrukce) a klade důraz na znalost původní technologie a zpracování tradičních materiálů, která usnadňuje hodnocení.

Průzkum je doporučeno členit na následující etapy [16]:

- Analýza historických podkladů, doklady o přestavbách a architektonickém vývoji
- Detailní popis památky a její zaměření, architektonický rozbor
- Hodnocení z hlediska umělecké a historické hodnoty
- Závěr a doporučení k alternativám ochrany památkové podstaty

3.3 Postup průzkumu

Metodika je založena na zjištění základních poznatků, jejich analýze, následném podrobném průzkumu vybraných míst a souhrnném zhodnocení. Zjištění základních poznatků o stávajícím stavu se získá předběžným průzkumem, kde se získají údaje o tvaru,

rozměrech, uspořádání konstrukce, materiálu, stavu prvků a jejich spojů, vztahu k ostatním částem stavby a údaje o vzniku stavby a jejích rekonstrukcích. Nutností je zaměřit se na místa nejčastějších poruch, jako jsou místa u komínů, lom střechy a podobně, ale také provedení vizuálního hodnocení celé konstrukce a zjištění přítomnosti biotických činitelů. Všechny tyto skutečnosti se vyznačí v projektové dokumentaci. Provedením analýzy se zjišťují všechny příčiny, které jsou anebo byly příčinou poruch a vytipují se místa, na která se zaměří při podrobném průzkumu. Podrobný průzkum využívá nedestruktivních metod k zjištění míry poškození a kvality dřeva na vybraných místech. V souhrnném zhodnocení se vypracovává závěrečná zpráva, která definuje rozsah a stupeň poškození, určení biotických činitelů, zda se poškození stalo v minulosti nebo je to současný problém, a zároveň stanovuje z analýzy příčiny poškození. Posledním krokem je návrh sanace, která se navrhuje na maximální množství stávajících prvků krovu s nejmenším množstvím zásahů do konstrukce. Využívá se pro odstranění zdrojů vlhkosti, konstrukční sanaci (částečné či úplné nahrazení prvků), sterilizaci dřevěné konstrukce a chemickou ochranu pro stávající i nově zabudované prvky.

4 Diagnostické metody

Diagnostické metody pro zkoumání dřevěných konstrukcí se rozdělují na nedestruktivní, semi-destruktivní a destruktivní.

Nedestruktivní metody jsou zcela neinvazivní. Mohou se rozdělit na smyslové (vizuální, hmatové, čichové, sluchové), nástrojové (poklep) a přístrojové (měření vlhkosti, zvukové, ultrazvukové, akustické emise, radiační metody, termografie). [7]

Semi-destruktivní metody způsobují malý, skoro zanedbatelný zásah v podobě vpichu nebo vývrtu. Lze je dělit na nástrojové (sondování), přístrojové (odporové zarážení trnu, odporové vrtání, zkoušení radiálních vývrtů, zkoušení tahových mikrotělisek, měření tvrdosti, endoskop). [7]

Destruktivní metody zahrnují odběr části nebo celého prvku pro laboratorní zkoušky. Přístrojové zkoušky – standardní destruktivní zkušební stroje a mikroskopické určování druhu dřeva. [7]

4.1 Vizualní hodnocení

Vizuální hodnocení je základní a svojí jednoduchostí také nejrozšířenější metodou používanou za účelem zjištění informací o vlastnostech a o stavu materiálu. Tato metoda využívá makroskopického zkoumání k určení druhu dřeva, charakteristických znaků, vad dřeva (suky, trhliny, odklon vláken) a rozsahu biotického a abiotického poškození. Slouží také k zjištění výskytu a určení biologických škůdců. Vizuálním hodnocením lze zjistit deformace prvků a uvolnění spojů v konstrukci. Je vhodná pro určení kritických míst, která se musí dále detailněji zkoumat nedestruktivními metodami. Vizuálním tříděním se vzorku dřeva přiřazují vizuální třídy jakosti. Třídy vizuálního hodnocení stanovuje norma ČSN EN 1912 (73 2073) Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti. [17]

4.2 Měření vlhkosti

Jelikož je dřevo hygroskopickým materiálem, má tendenci přizpůsobovat svoji vlhkost vlhkosti okolního prostředí. Zvýšená vlhkost mnohdy signalizuje větší riziko poškození například dřevokaznými houbami nebo dřevokazným hmyzem. Vlhkost

ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva. Určuje se vždy a především při průzkumech v in-situ. Zvýšený obsah vody může ovlivňovat výsledky průzkumu a zároveň může být dobrým vodítkem např. při identifikaci míst průsaku vody střešním pláštěm. [17] V místě, kde je detekována zvýšená vlhkost, by měl být proveden detailní průzkum a zhodnocena míra poškození.

Klasickou metodou pro zjištění vlhkosti je metoda gravimetrická, určující vlhkost na základě porovnání hmotnosti vzorku v normálním a v absolutně suchém stavu, vyjádřena procentuálním zastoupením vody ve dřevě. Tato metoda není vhodná pro použití v in-situ a uplatňuje se v laboratoři.

Pro diagnostiku zabudovaných prvků se používají příruční vlhkoměry, které jsou nastavené s ohledem na druh a teplotu dřeva. Vlhkoměry se rozdělují podle principu, na kterém pracují na odporové, kapacitní, absorpční, mikrovlnné a další. Nejpoužívanějšími v praxi jsou vlhkoměry odporové, využívající elektrický stejnosměrný odpor a vodivost dřeva.



Obr. 7 Vlhkoměr Hygrotest 6500

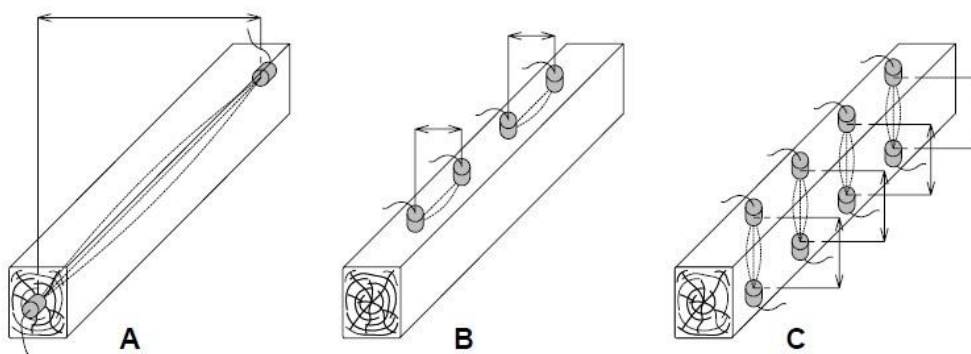
4.3 Měření šíření ultrazvukových vln

Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln je plně nedestruktivní metoda, a proto je jedna z nejpoužívanějších pro stavebně-technický průzkum. Z hlediska celkového stavu konstrukce nám dává okamžité výsledky. Diagnostické přístroje pracují s frekvencemi od 20 kHz do 500 kHz, záleží na typu přístroje a použitých sondách. [17] Nejpoužívanější přístroje jsou Arborsonic Decay Detector, Sylvatest, Tico a Pundit.



Obr. 8 Ultrazvukový přístroj TICO umožňuje použití více sond o různých frekvencích.

Nejčastějším způsobem měření je pomocí dvou sond, z nichž jedna je buď ultrazvukového signálu, a druhá je snímač. Rychlost šíření je závislá na druhu dřeva, jeho vlastnostech, hustotě, tuhosti a hlavně na jeho vadách (suky, trhliny, atd.). Rychlost šíření závisí také na vlhkosti dřeva, jelikož se vzrůstající vlhkostí klesá rychlost šíření. V místě vyskytujících se trhlín mají vlny delší dobu průchodu než ve zdravém dřevě. Nejlepší výsledky lze získat při měření rychlosti šíření vln podél vláken, to je však v in-situ ve většině případů nemožné. Dalším způsobem je měření rychlosti prostupu napříč vlákny, kdy se přikládají sondy z obou protilehlých stran prvku. Měřením na více místech po celém prvku může odhalit lokální poruchy.



Obr. 9 Možnost přikládání sond při měření ultrazvukem: a) přímé měření podél vláken, b) nepřímé měření podél vláken, c) přímé měření napříč vlákny [7]

Pokud je nutné diagnostikovat větší prvky, dochází k útlumu signálu a lze to napravit použitím nižších frekvencí, které jsou méně citlivé na vnitřní vady prvku. Ultrazvuková metoda se nejlépe uplatní na prvky menších rozměrů. Možnost detekce poškozených míst závisí na vlnové délce. [17] Pomocí ultrazvukové diagnostiky nelze

detekovat vady, které mají rozměr menší než polovina vlnové délky. Pokud jsou ve vzorku drobná dutá místa a vady, je lepší použít ultrazvuk s vyšší frekvencí a menší vlnovou délkou.

Tab. 2 Odhad stupně poškození dřeva na základě průměrné rychlosti šíření ultrazvukového vlnění napříč vlákna (vlhkost 12-16 %)

Průměrná rychlost kolmo na vlákna [m/s]			
stupeň poškození	druh dřeva		
	smrk, jedle	borovice	dub
1	1260 - 1800	1160 - 1750	1640 - 2100
2	920 - 1260	840 - 1160	1180 - 1640
3	750 - 920	680 - 840	850 - 1180
4	500 - 750	500 - 680	600 - 850

4.4 Radiační diagnostické metody

Radiační diagnostické metody jsou zcela nedestruktivní metody využívající ionizující záření, díky němuž je nutné zvláštní bezpečnostní opatření. Rozdělují se dvou skupin na radiometrii a radiografii.

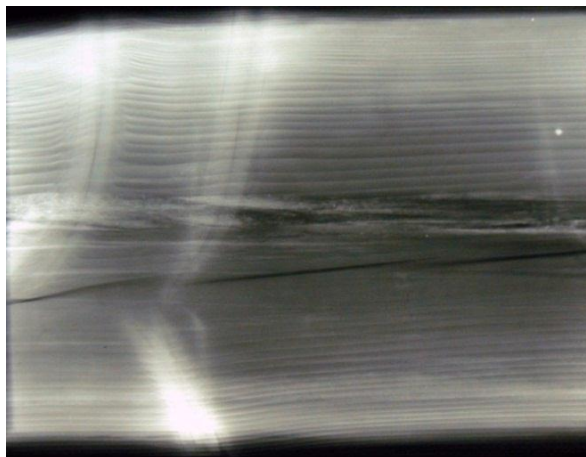
Radiometrie umožňuje nedestruktivní měření objemové hmotnosti a vlhkosti materiálu. Princip určení objemové hmotnosti je založen na průchodu a zeslabení záření gama, eventuálně rozptyl záření gama v materiálu. Jako zdroje záření gama se nejčastěji používá vhodný radioaktivní zářič, např. cesium Cs 137. [17] Detektory záření jsou buď Geiger-Müllerovy počítače částic, nebo scintilační detektory, spojeny s vyhodnocovací jednotkou, s naprogramovanou kalibrační křivkou, která udává výsledky v kilogramech na metr krychlový. Výsledkem měření je četnost impulsů za časovou jednotku, které díky kalibrační křivce lze převést na objemovou hmotnost.

Metoda průchodu a zeslabení záření gama – na protilehlých stranách materiálu jsou umístěny zdroje a detektory záření. V závislosti na tloušťce a objemové hmotnosti materiálu se záření v materiálu zeslabuje a výsledkem je průměrná objemová hmotnost měřeného materiálu mezi zdrojem záření a detektorem. Dosahuje se velmi přesných výsledků.

Metoda rozptylu záření gama – detektor a záření jsou umístěny na jedné straně materiálu, kde detektor zaznamenává pouze rozptýlené záření v materiálu

tzv. Comptonovým efektem. Stínící vrstva velké hustoty, nacházející se mezi zdrojem záření a detektorem, brání průchodu záření ze zářiče přímo do detektoru.

Radiografie pracuje na principu rozptylování a absorbování rentgenového záření a záření gama procházejícím prostředím – umožňuje tedy zobrazení vnitřní struktury, vad a poruch nedestruktivně. Míra zeslabení je závislá na tloušťce a na objemové hmotnosti materiálu a je zaznamenávána na radiografickém filmu nebo na modernější, mnohonásobně použitelné tzv. záznamové fólie.



Obr. 10 Radiogram masivního jedlového trámu v konstrukci krovů historického objektu. Dobře je patrna struktura dřeva, suky, trhliny ve středu rozvinutá středová hniloba, z povrchu trámu neviditelná. [17]

4.5 Odporové zarážení trnu

Tato metoda se řadí do semi-destruktivních zkoušek a provádí se pomocí jednoduchého mechanického přístroje Pilodyn. Umožňuje měření hloubky průniku trnu o průměru 2,5 mm, vystřeleného při konstantní práci 6 J, přičemž poškození materiálu je velice malé, v in situ téměř zanedbatelné. Maximální hloubky zarážení trnu je 40 mm, váha celého přístroje je 1,55 kg, průměr přístroje 50 mm a délka přístroje 355 mm. [7] Poskytuje způsob měření míry poškození dřeva napadeného měkkou hnilobou a také se využívá k měření tvrdosti chemicky ošetřeného materiálu.



Obr. 11 Pilodyn 6J

Vztahy pro zjištění hustoty dřeva na základě měření vlhkosti a hloubky vniku trnu:

$$\rho_{12} = -0,027102 \cdot t_{p,12} + 0,727987$$

$$t_{p,12} = t_p(1 - 0,007\Delta w)$$

$$\Delta w = w - 12$$

kde ρ_{12} – hustota dřeva při vlhkosti 12 % [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], $t_{p,12}$ – hloubka zarážení trnu do dřeva o vlhkosti 12 % [mm], t_p – hloubka zarážení trnu do dřeva o známé vlhkosti [mm], w – vlhkost dřeva v době měření [%]

Faktory ovlivňující měření – jelikož funkce Pilodynů může být ovlivněna vlhkostí umožňující lepší průnik do dřeva, je nutné před každým měřením Pilodyn kalibrovat. Pokud jsou nižší pevnostní charakteristiky způsobené poškozením hmyzem nebo hnilobou, bude vyšší hloubka penetrace. Při testování v radiálním směru se výsledky jeví průkaznější vlivem jarního a letního dřeva střídaného v rámci letokruhu. Při odklonu od radiálního směru menším než 30° bude variabilita měření do 10 %. [7] Testováním v tangenciálním směru se výsledky zkreslují, jelikož mnohdy se zaráží trn pouze do jedné části letokruhu.

4.6 Odporové mikrovrtání

Zařazuje se mezi semi-destruktivní metody a výsledkem je přehled o jeho vnitřní struktuře dřeva a jeho poškození. Přístroj, kterým lze měřit tato metoda, je například Resistograph 2450-S, založen na měření odporu materiálu proti prostupu malého vrtáku. Používají se wolframové vrtáky, které mají průměr 1,5 - 3,0 mm. Pokud jsou odlišné vrtací odpory, mohou objevit různé stupně poškození.



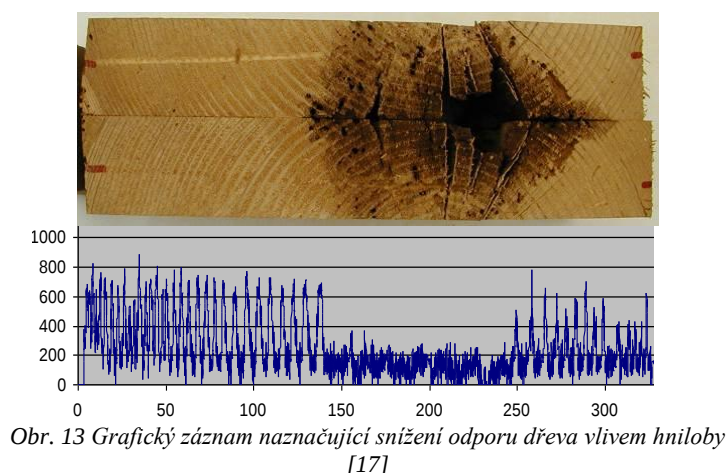
Obr. 12 Přístroj Resistograph firmy Rinntech [17]

Řezný odpor vrtání lze vypočítat dle vztahu:

$$RD = \frac{T_{\omega}}{\omega}$$

kde RD – odpor proti vrtání [Nm.s.rad^{-1}], T_{ω} – točivý moment [Nm], ω – úhlová rychlost [rad.s^{-1}]

Výstupem je grafický záznam (hustotní profil, dendrogram), zaznamenáván na papírové pásce, záznamníku či elektronicky do počítače. Nižší body v grafickém záznamu odpovídají nižšímu odporu a nižší hustotě. Grafy definují situaci jenom v místě vrtání.



Obr. 13 Grafický záznam naznačující snížení odporu dřeva vlivem hniloby [17]

Faktory ovlivňující měření – odporové mikrovrtání je závislé na vlhkosti. Ideální je vrtání v radiálním směru. Díky malému průměru vrtáku může docházet k ohýbání a nutností je také zajištění ostrosti vrtáku. Pro hodnocení stavu je nutné mnohonásobné vrtání, které je nevýhodou hlavně u dekorativních prvků, kde je nutné co nejvíce omezit zásahy.

4.7 Odporové zatlačování trnu a vytlačování vrutu

Přístroj vhodný pro využívání v in-situ, který se využívá pro nepřímé zjištění hustoty a mechanických vlastností, stanovující odpor proti pozvolnému vnikání trnu. Připevňuje se kolmo ke vzorku textilním popruhem, spojovacími vruty nebo pomocí válečkového řetězu. Trn je vtlačován silou působící pomocí ozubeného hřebenu poháněného ozubeným kolem, který je umístěn v pohybovém ústrojí, přičemž je síla průběžně snímána a zaznamenávána k měřené dráze v podobě pracovního diagramu. Jsou-li přítomny vady, trhliny, suky či cizorodé předměty, je vhodné se těmito místům

vyhnout, jelikož zkreslují výsledky, což se projeví poklesem síly v grafickém záznamu. Zato to vrcholy v grafickém záznamu představují vyšší sílu odpovídající vyššímu odporu dřeva vzorku. Trn má průměr 2,5 mm s půlkulatým hrotem. Během měření jsou v PC počítány základní charakteristiky, a to práce [N.mm] jakožto plocha pod křivkou síly vztažené k posuvu, délky vniku [mm], čas posuvu trnu [s] a max. a min. síla [N]. [17] Průměrnou sílu lze získat vydělením plochy pod křivkou hloubkou zatlačování, která je rozhodujícím parametrem pro stanovení mechanického odporu dřeva, závisující na vlastnostech dřeva a na stupni poškození.

Podobným principem je metoda konstantního vytahování vrutu, měřící sílu potřebnou k vytažení vrutu průměru 4 mm z hloubky 40 mm. Při vymezené vlhkosti lze odvodit hustotu dřeva, jelikož se zvyšující hustotou se také zvyšuje odpor dřeva proti vytažení vrutu.



Obr. 14 Detail průniku základnou přístroje [17]

4.8 Zkoušení radiálních vývrtů

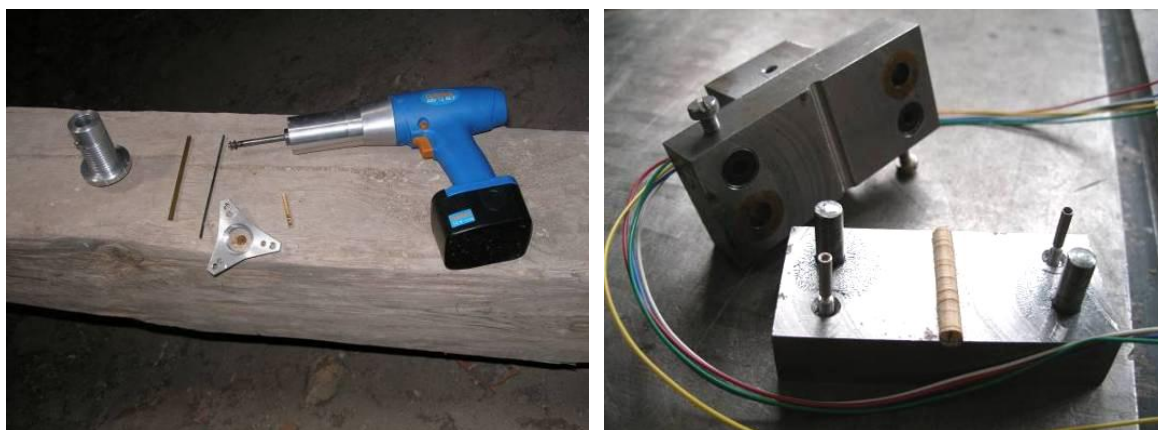
Zkoušení radiálních vývrtů je semi-destruktivní metodou, která spočívá v odběru radiálních vývrtů válcovitého tvaru o průměru 4,8 mm, zanechávající v prvku otvor velikosti 10 mm. Odebírá se konstantní rychlostí z nepoškozených míst v radiálním směru pomocí elektrické vrtačky se speciálním vrtákem, jehož hrot musí být čistý a ostrý. Kvůli střídání jarního a letního dřeva je nutné odebírat vývrty délky minimálně 20 mm. Otvory nijak zvlášť nesnižují pevnost prvku, přičemž jako prevence proti působící vlhkosti, hmyzu či hnilobě mohou být vývrty zazátkovány.

Na vývrtech se zjišťují pevnosti a moduly pružnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, ale mohou se však použít pro zjištění hustoty, vlhkosti, pro identifikaci dřeva, vizuálního hodnocení, analýzu hniloby a další. Pro zkoušku pevnosti v tlaku se používají čelisti s drážkami, umožňující tlak kolmo na osu vývrty, se dvěma lineárně proměnnými snímači pro měření vzdálenosti mezi čelistmi a měření deformace. Během zkoušení se vzniklé deformace a tlaková síla zaznamenávají do pracovního diagramu. Pro poskytnutí přesnějších výsledků je nutné odebrat více vzorků z jednoho prvku.

Výpočet tlakové pevnosti se vypočítá podle rovnice [17]:

$$f_c = \frac{F_{max}}{l \cdot d_c}$$

kde f_c – tlaková pevnost [MPa], F_{max} – zatížení odpočítané z diagramu [N], l – délka radiálního vývrty [mm], d_c – průměr radiálního vývrty [mm]



Obr. 15 Vrták a zatěžovací čelisti s vyfrézovanou drážkou pro radiální vývrt [17]

4.9 Zkoušení tahových mikrovzorků

Vzorky se odebírají pomocí přestavitelné okružní pilky, která provádí dva řezy pod úhlem 45° k povrchu prvku, jejichž hloubka je v rozmezí 5 - 8 mm, aby vznikly trojúhelníkové lišty s pravoúhlými stěnami. Odběr musí být bez vad, suků či trhlin. Zatěžuje se v běžném zatěžovacím stroji, ale pro uchycení se využívá dřevěných bloků pravoúhlého tvaru, které se nalepí na oba konce vzorku a vloží se do jednoduchých čelistí. Zkouškou se zjišťuje tahová pevnost a modul pružnosti, jejichž výsledky jsou srovnatelné se standardním testem, ale kvůli zásahu do povrchu ji nelze použít pro historické konstrukce.

Maximální tahové zatížení pro každý vzorek je zatížení při porušení a dovolené zatížení je určené podle vztahu [17]:

$$f_c = \frac{F_{max}}{\frac{1}{2} \cdot b h}$$

kde f_c – tlaková pevnost [MPa], F_{max} – porušení při zatížení [N], b – přepona trojúhelníkové lišty [mm], h – výška trojúhelníkové lišty [mm]



Obr. 16 Okružní pila s pojezdem upravená pro odběr tahových mikrovzorků [17]

4.10 Endoskopie

Endoskop či videoskop je semi-destruktivní metoda, která se používá v případě zabudovaných, těžce přístupných nebo zazděných konstrukcí, jako jsou například stropní konstrukce. Pomocí endoskopu lze vizuálně posuzovat biotické poškození dřeva, dále je možné odhadovat vývojové stádium hub, změny barvy, zborcení, povrchový nebo kostkovitý rozklad a mechanické poškození. [17] Díky charakteristickým požerkům a trusům lze určit dřevokazný hmyz, ale pro přesné určení hmyzu či hniloby je nutné odběr vzorků.

Nejběžnějším typem endoskopů je Videoprobe XL PRO, který umožňuje díky displeji sledovat obraz z mikrokamery, jenž je zároveň ukládán do videosouboru. Přístroj se skládá ze zdrojové jednotky, ovládacího panelu s displejem a pružného bovdenu s mikrokamerou a světlem. [17] Bovden s mikrokamerou se zasouvá do předvrtaného otvoru o velikosti 10 - 12 mm, jenž se může po ukončení zkoušky zazátkovat, nebo do štěrbin například ve skladbě stropů.



Obr. 17 Endoskopický přístroj Videoprobe XL PRO [7]

4.11 Odběr vzorků pro laboratorní zkoušky

Odběr vzorků je zcela destruktivní metoda. Zkouškami zjistíme fyzikální a mechanické vlastnosti, přičemž na výsledek má velký vliv vlhkost dřeva a provádí se na vzorku bez suků, smolnatosti a jiných vad. Směry zkoušení jsou podle evropským norem rozděleny na zkoušení rovnoběžně s vlákny (axiální směr s indexem 0) a kolmo na vlákna (index 90).

Charakteristická hodnota mechanických vlastností a hustoty konstrukčního dřeva odpovídá 5% kvantilu, stanovující se na výběru – základním souboru dřeva, jenž je reprezentativní svým původem, rozměry a jakostí. Zkušební tělesa výběru musí být zkoušeny při referenční vlhkosti, odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %, jinak se musí hodnoty 5% kvantilu upravit. Minimální počet zkušebních vzorků je 40. Zkoušky jsou prováděny na vzorku s příčnými rozměry 150 mm, ale mohou být také stanoveny na malých bezvadných tělesech nebo na tělesech konstrukčních rozměrů, kdy se hodnoty upraví součiniteli. Základní soubor dřeva se podle druhu dřeva pevnosti v ohybu přiřadí k určité třídě pevnosti uvedené v následujících tabulkách.

Tab. 3 Třídy pevnosti - charakteristické hodnoty pro jehličnaté dřeviny

	JEHLIČNATÉ DŘEVINY												
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI (v N/mm ²)													
Ohyb	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tah rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tah kolmo k vláknům	$f_{t,90,k} = 0,4$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Tlak rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	28	29
Tlak kolmo k vláknům	$f_{c,90,k} = 0,007 \rho_k$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Smyk	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
TUHOSTNÍ VLASTNOSTI (v kN/mm ²)													
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,05} = 0,67 E_{0,mean}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 30$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
HUSTOTA (v kg/m ³)													
Hustota	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Průměrná hodnota hustoty	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$	350	370	380	400	410	420	440	460	480	500	530	550
POZNÁMKA: Tabelované hodnoty odpovídají dřevu s vlhkostí při teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%.													

Tab. 4 Třídy pevnosti - charakteristické hodnoty pro listnaté dřeviny

	LISTNATÉ DŘEVINY								
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI (v N/mm ²)									
Ohyb	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tah rovnoběžně s vlákny	$f_{t,0,k} = 0,6 f_{m,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tah kolmo k vláknům	$f_{t,90,k} = 0,6$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Tlak rovnoběžně s vlákny	$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0,45}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Tlak kolmo k vláknům	$f_{c,90,k} = 0,015 \rho_k$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Smyk	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
TUHOSTNÍ VLASTNOSTI (v kN/mm ²)									
Průměrná hodnota modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,mean}$	9,5	10	11	12	13	14	17	20
5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny	$E_{0,05} = 0,84 E_{0,mean}$	8,0	8,4	9,2	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Průměrná hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 15$	0,63	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,13	1,33
Průměrná hodnota modulu pružnosti ve smyku	$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$	0,59	0,63	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
HUSTOTA (v kg/m ³)									
Hustota	ρ_k	500	520	530	540	550	620	700	900
Průměrná hodnota hustoty	$\rho_{mean} = 1,2 \rho_k$	600	620	640	650	660	740	840	1080
POZNÁMKA: Tabelované hodnoty odpovídají dřevu s vlhkostí při teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%.									

5 Diagnostika dřevěného prvku

K praktické části bakalářské práce byla odebrána část krokve délky 965 mm z rekonstruované střechy, kde se kompletně měnily všechny prvky krovu.



Obr. 18 Fotodokumentace zabudovaného prvku

První použitou metodou byla nedestruktivní metoda vizuálního hodnocení, podle kterého se určil druh dřeva a provedl se popis vzorku z hlediska jeho poškození. Na prvku se vyznačila místa po 20 mm a strany (A-D), na nichž bylo prováděno měření diagnostickými přístroji. Prvek byl v každém řezu změřen posuvným měřidlem z každé strany. Dále byly použity přístrojové nedestruktivní metody měření vlhkosti a šíření ultrazvukových vln dřevěným prvkem. Prvek byl následně zvážen, vystaven sušení při teplotě 103 ± 2 °C a znovu zvážen pro stanovení vlhkosti, která byla porovnána s průměrnou vlhkostí, změřenou vlhkoměrem. Poslední byla metoda destruktivní, při níž byl trám rozřezán na 216 malých hranolů, které se změřily, zvážily a vystavily zkoušce pevnosti v tlaku.



Obr. 19 Fotodokumentace prvku s vyznačenými místy pro měření

5.1 Vizuální vyhodnocení

Na první pohled bylo dřevo jednotně zbarvené se zřetelnými hranicemi mezi letokruhy, pryskyřičnými kanálky, nezřetelnými dřevovými paprsky a s nerozlišeným přechodem z jádra na běl. Z těchto makroskopických znaků se určilo, že by zkoušeným dřevem mohl být smrk. Pro přesné určení druhu dřeva by se musel využít mikroskop a musela by se prozkoumat mikroskopická stavba dřeva.

Při vizuální prohlídce bylo viditelné narušení dřevní hmoty vytvořenými výletovými otvory a chodbičkami, vyplněné požerky pod povrchem dřeva, a dále se škůdce dostával hlouběji dovnitř. Díky tomu se začalo dřevo povrchově rozpadat a při otočení prvku docházelo k vypadávání drtě. Podle způsobu poškození a velikosti chodbiček bylo dřevo pravděpodobně napadeno tesaříkem. Na prvku byly viditelné suky a znatelné podélné trhliny, z nichž některé sahají až k dřeni.



Obr. 20 Fotodokumentace celého prvku



Obr. 21 Fotodokumentace čel prvků

5.2 Měření vlhkosti

Měření vlhkosti bylo provedeno dvěma způsoby – váhovou metodou a pomocí přístroje Hygrotest 6500. Stanovení vlhkosti pomocí váhové metody bylo provedeno zvážení celého prvku v přirozeném stavu, vysušením stanoveným způsobem a poté opětovným zvážení ve vysušeném stavu. Hmotnost ve vlhkém stavu byla 6,103 kg a hmotnost prvku po vysušení bylo 5,684 kg. Výsledná vlhkost:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{6,103 - 5,684}{5,684} \cdot 100 = 7,38\%$$

Vlhkost získaná přístrojem, byla naměřena na vyznačených řezech ve vzdálenosti 100 mm z každé strany a výsledky byly zprůměrovány.

Tab. 5 Výsledky měření přístrojem Hygrotest 6500

číslo řezu	vzdálenost [mm]	strana A ω_A [%]	strana B ω_B [%]	strana C ω_C [%]	strana D ω_D [%]
5	100	7,8	5,5	6,5	6,8
10	200	7,2	5,7	7,3	7,6
15	300	7,2	4,5	7,5	7,9
20	400	5,3	4,5	8,0	7,3
25	500	7,5	5,2	8,5	7,8
30	600	8,1	5,6	8,6	7,6
35	700	8,2	7,4	9,2	7,8
40	800	8,5	7,6	9,2	8,3
45	900	9,2	8,2	9,3	8,5
Průměr $m_{\omega i}$		7,6	6,0	8,2	7,8
Minimum $\min_i [\omega_i]$		5,3	4,5	6,5	6,8
Maximum $\max_i [\omega_i]$		9,2	8,2	9,3	8,5
Směrodatná odchylka s_ω		1,1	1,4	1,0	0,5
Průměr stran ABCD m_ω		7,4 %			

Porovnáním výsledků obou metod se zjistil rozdíl obou hodnot pouze o 0,02%.

5.3 Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln

Doba šíření ultrazvukových vln uvnitř dřevěného prvku se měřila přístrojem TICO v podélném i v příčném směru. V podélném směru se sondy přiložily na čela prvku

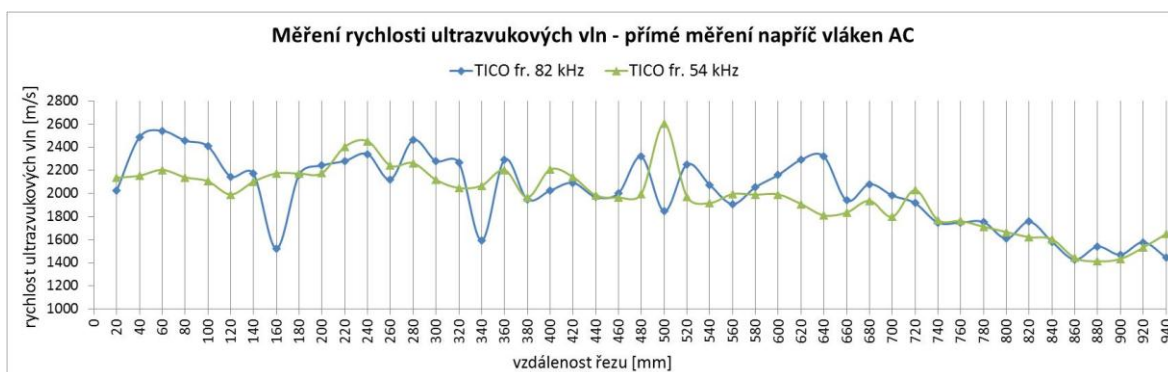
a měřily se ve třech místech - uprostřed průřezu a na dvou sousedních místech. V příčném směru se měřily na každém vyznačeném řezu z každé strany prvku. Doba přenosu se prodlužuje, jsou-li v prvku nějaké defekty, jako růstové vady, dutiny a trhliny či cizorodé prvky. Rychlost šíření také ovlivňuje směr (anizotropie) měření a vlhkost prvku.

Rychlost šíření ultrazvukových vln podle doby průchodu se spočítala vzorcem:

$$v = \frac{h}{t}$$

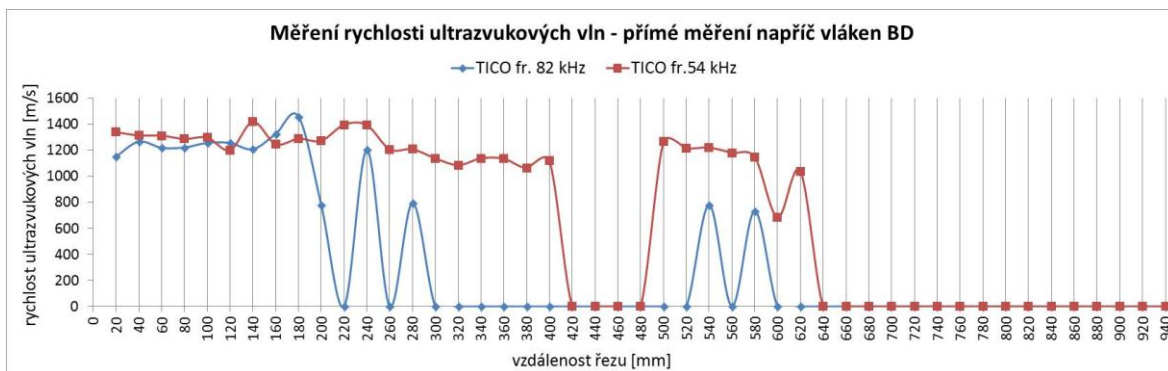
kde h – délka měřeného úseku [m], t – doba přenosu ultrazvukových vln [s]

5.3.1 Přímé měření napříč vláken



Graf 1 Porovnání ultrazvukových měření napříč vláken AC

Měření napříč vláken pro strany AC se pohybují v rozmezí 1410 až 2600 m/s. Místa se sníženými rychlostmi ultrazvukových vln jsou způsobená vadami uvnitř dřevěného prvku.



Graf 2 Porovnání ultrazvukových měření napříč vláken BD

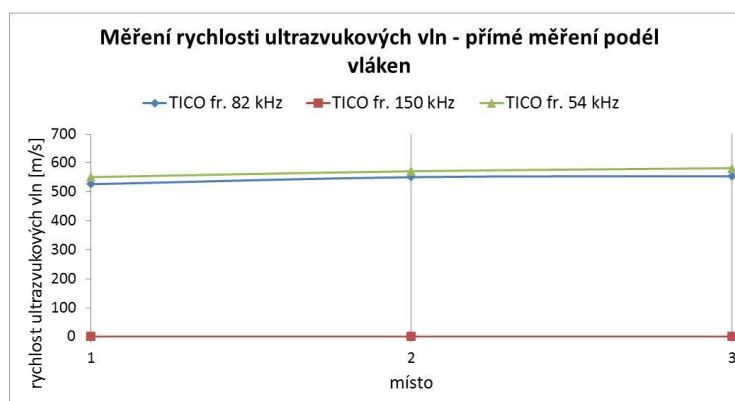
Při měření napříč vláken stran BD frekvencí 82 kHz se vlivem většího rozsahu poškozeného povrchu na některých místech nepodařilo změřit, ale při použití nižší frekvence 54 kHz se získalo více výsledků. Zde se hodnoty pohybují od 0 do 1460 m/s.

Měření strany AC vykazovalo menší počet vad v prvku než měření strany BD. I přesto, že se měřilo všemi třemi frekvencemi, při měření frekvencí o 150 kHz se rychlost nepodařilo získat. Výsledky měření obsaženy v příloze 2 a v příloze 3.

5.3.2 Přímé měření podél vláken

Tab. 6 Výsledky měření rychlosti šíření ultrazvukových vln podél vláken

frekvence	1		2		3	
	čas [μ s]	rychlost [m/s]	čas [μ s]	rychlost [m/s]	čas [μ s]	rychlost [m/s]
82kHz	183,1	527	175	551	174	555
150kHz	-	-	-	-	-	-
54kHz	175	551	168,8	572	165,7	582



Graf 3 Porovnání ultrazvukových měření podél vláken

Měření rychlosti ultrazvukových vln podél vláken se měřilo na třech místech v čelech průřezu při použití frekvencí 54 kHz, 82 kHz a 150 kHz. Výsledky měření rychlostí se pohybují v rozmezí od 0 do 582 m/s. Z grafu je patrné, že měření frekvencí 150 kHz pro nás nebylo přínosné, ale ostatní dvě frekvence vykazují přibližně stejné hodnoty.

5.4 Stanovení pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny

Přípravou na tuto zkoušku bylo rozřezání prvku na 216 malých hranolů, z nichž se 14 vzorků rozpadlo už při samotném řezání, díky sukům a ostatním vadám dřeva. Rozměry vzorku odpovídaly stanoveným rozměrům pro zkoušku pevnosti v tlaku, kdy se šířka rovná šestinásobku výšky vzorku a čelní plochy jsou rovné. Na vzorcích byla možnost shlédnout velké množství chodbiček, vytvořených s největší pravděpodobností tesaříkem, a na dvou byly vidět chodbičky patrně způsobené červotočem. Použitím posuvného měřidla se změřili jejich rozměry (výška, šířka, hloubka) a každý vzorek se pečlivě zvážil jak v přirozeném stavu, tak ve vysušeném stavu.

strana D			strana A						strana B		
			AD	AD	AD	AB	AB	AB			
			1-1	1-3	1-5	1-1	1-3	1-5			
			AD	AD	AD	AB	AB	AB			
			1-2	1-4	1-6	1-2	1-4	1-6			
			CD	CD	CD	BC	BC	BC			
			1-2	1-4	1-6	1-2	1-4	1-6			
			CD	CD	CD	BC	BC	BC			
			1-1	1-3	1-5	1-1	1-3	1-5			

strana C

Obr. 22 Schéma rozřezání vzorku

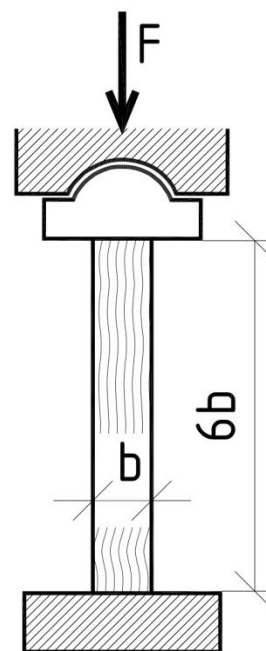


Obr. 23 Fotodokumentace rozřezaného vzorku na zkušební hranoly



Obr. 24 Detail poškození vzorku tesaříkem

Po této přípravě se mohlo přejít k samotnému vystavení hranolů zatěžování v tlaku, rovnoměrně konstantní rychlostí, kdy se zjišťovalo maximální zatížení až do porušení vzorku. Zkušební těleso se zatěžovalo v lisu dostředně pomocí tlačné desky, která byla opatřena kloubem.



Obr. 25 Fotodokumentace a schéma zkoušky pevnosti v tlaku

Ze zkoušky pevnosti v tlaku se dostaly hodnoty maximální zatěžovací síly pro jednotlivé vzorky, z kterých se spočítala pevnost v tlaku podle vzorce:

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

kde F_{max} – maximální zatěžovací síla [N], A – zatěžovací plocha (plocha čel) [mm²]

Vypočítáním vlhkostí hranolů váhovou metodou se zjistila vlhkost pohybující se okolo 3 %, proto se musela pevnost vzorků upravit vzorcem z ČSN 49 0110, jelikož vzorek neměl normou předepsanou referenční vlhkost dřeva 12 %:

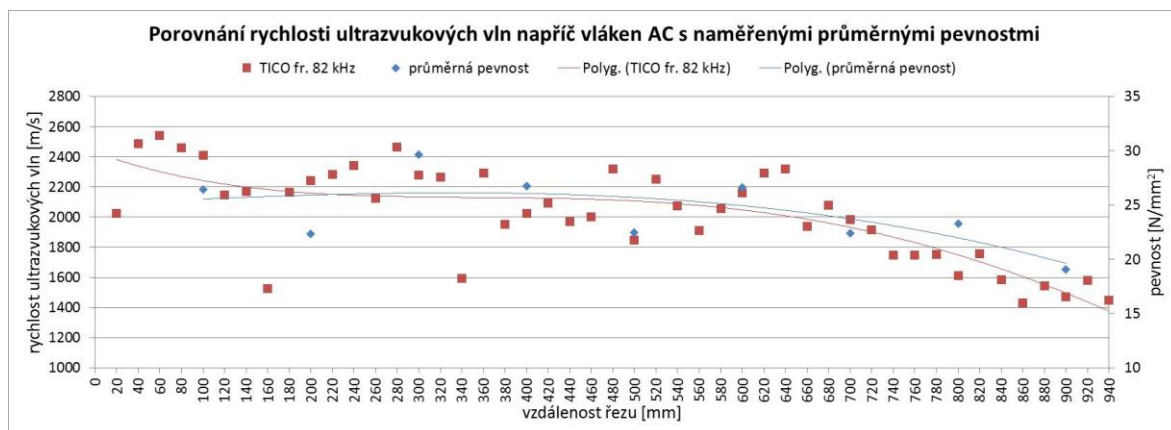
$$f = f_{c,0}[1 + \alpha \cdot (\omega - 12)]$$

kde $f_{c,0}$ – pevnost v tlaku [N/mm²], ω – vlhkost zkušebního vzorku [%], α – opravný vlhkostní koeficient stejný pro všechny dřeviny $\alpha = 0,04$

Pro porovnání výsledků z ultrazvuku a spočítaných pevností bylo nutné zprůměrovat hodnoty pevností v tlaku na vzdálenosti, na kterých se měřilo ultrazvukem. Na závěr se přepočítané hodnoty průměrných pevností a rychlostí ultrazvuku zanesly do grafu, přičemž hodnoty se proložily polynomicou spojnicí. Jelikož hodnoty rychlostí měření ultrazvuku napříč vláken BD vlivem množství znehodnocení na těchto stranách velmi kolísaly, porovnávaly se pevnosti s hodnotami měřenými napříč vláken AC.

Tab. 7 Přepočítané průměrné pevnosti v tlaku

vzdálenost [mm]	průměrné pevnosti f [N/mm ²]
100	26,5
200	22,4
300	29,7
400	26,8
500	22,5
600	26,7
700	22,5
800	23,3
900	19,1
Průměr m_{fi}	24,4
Minimum $\min_i [f_i]$	19,1
Maximum $\max_i [f_i]$	29,7
Směrodatná odchylka s_{fi}	3,2

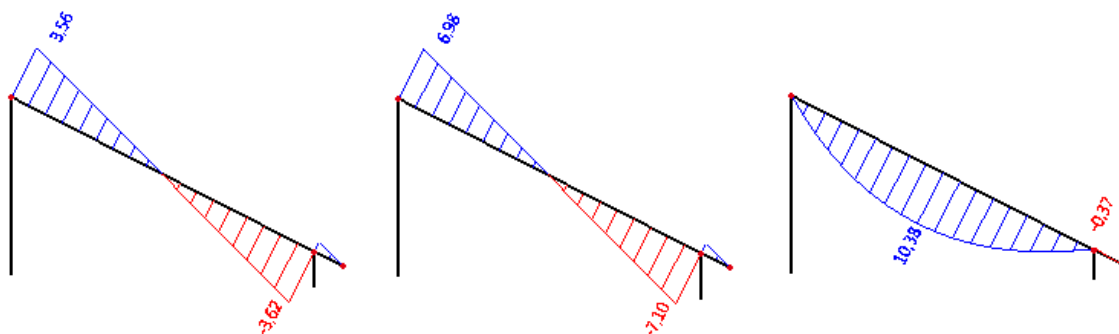


Graf 4 Porovnání rychlostí získaných ultrazvukovým přístrojem s naměřenými průměrnými pevnostmi

Z grafu je viditelná podobnost spojnic obou měření, proto měření lze považovat za správně naměřené. Při porovnání pevností v tlaku a rychlostí ultrazvuku napříč vláken AC, vykazoval lepší průběh spojnice rychlostí s frekvencí 82 kHz než s frekvencí 54 kHz. Podle získané průměrné pevnosti v tlaku se dřevo zatřídilo do třídy C35, která byla použita pro statický výpočet posouzení prvku.

6 Posouzení nosníku na ohyb a smyk

Pro posouzení na tlak, ohyb a smyk je brán prvek obdélníkového průřezu o průměrné výšce 138 mm, šířce 104 mm a délce krokve 6,56 m s převislým koncem. Hodnoty výšky a šířky průřezu se získaly průměrem z měření rozměrů na celém prvku. Prvek byl podle zjištěné pevnosti v tlaku zatříděn do třídy C35. Předpokládá se sklon střechy 30° s krokvemi rozmístěnými po metru. Vlastní tíha celé krokve je brána jako spojitě zatížení o hodnotě 0,057 kN/m a další stálou složkou je krytina s laťováním s hodnotou 1,5 kN/m. Je počítáno také s nahodilým klimatickým zatížením sněhem (0,8 kN/m) a větrem (0,11 kN/m). Stavba se nachází v II. sněhové oblasti s charakteristickou hodnotou 1,0 kN/m² a v II. větrné oblasti se základní rychlostí větru 25 m/s. Pro získání hodnot vnitřních sil se podle rovnice 6.10 vytvořila kombinace.



Obr. 26 Vnitřní síly na prvku (vlevo – normálové síly, uprostřed – posouvající síly, vpravo – ohybové momenty)

6.1 Vstupní údaje

zatřídění dřeva:	C35
Maximální ohybový moment M_d :	10,38 kNm
Maximální posouvající síla V_d :	7,10 kN
Maximální normálová síla N_d :	3,56 kN
Modifikační součinitel k_{mod} :	0,80
Součinitel materiál γ_M :	1,30
Pevnost materiálu v ohybu $f_{m,k}$:	35,00 MPa
Pevnost materiálu v tahu $f_{t,0,k}$:	21,00 MPa
Pevnost materiálu v tlaku $f_{c,0,k}$:	24,76 MPa
Pevnost materiálu ve smyku $f_{v,k}$:	4,00 MPa
Modul pružnosti $E_{0,mean}$:	13,00 GPa

6.2 Namáhání prostým tlakem

- 1) Výpočet pevnosti dřeva

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{mod} = \frac{24,76}{1,30} \cdot 0,80 = 15,24 \text{ MPa}$$

- 2) Výpočet plochy skutečného průřezu

$$A = b \cdot h = 103,90 \cdot 137,7 = 103,90 \cdot 137,7 = 1410,3 \text{ mm}^2$$

- 3) Normálové napětí

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{3,56 \cdot 10^3}{14310,3} = 0,25 \text{ MPa}$$

- 4) Podmínky spolehlivosti

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$0,25 \text{ MPa} \leq 15,24 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE NA TLAK

6.3 Namáhání ohybem

- 1) Výpočet pevnosti dřeva

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \cdot k_{mod} = \frac{35}{1,30} \cdot 0,80 = 21,54 \text{ MPa}$$

- 2) Výpočet modulu pružnosti skutečného průřezu

$$W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = \frac{1}{6} \cdot 103,9 \cdot 137,7^2 = 328\,493 \text{ mm}^3$$

- 3) Normálové napětí

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{10,38 \cdot 10^6}{328493} = 31,60 \text{ MPa}$$

- 4) Podmínky spolehlivosti

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

$$31,60 \text{ MPa} \leq 21,54 \text{ MPa}$$

NEVYHOVUJE NA OHYB

6.4 Namáhání smykem

- 1) Výpočet pevnosti dřeva

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \cdot k_{mod} = \frac{4}{1,30} \cdot 0,80 = 2,46 \text{ MPa}$$

- 2) Smykové napětí

$$\tau_d = \frac{1,5V_d}{A} = \frac{1,5 \cdot 7,10 \cdot 10^3}{1410,3} = 0,74 \text{ MPa}$$

3) Podmínky spolehlivosti

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$0,74 \text{ MPa} \leq 2,46 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE NA SMYK

Krokev je staticky řešena jako prostě podepřený šikmý nosník s převislým koncem. Prvek vyhověl na prostý tlak o 14,99 MPa a na smyk o 1,72 MPa, ale nevyhověl na ohyb o 10,06 MPa. I přes to, že prvek vypadal v relativně dobrém stavu, kdyby byl v konstrukci, bylo by nutné ho vyměnit.

7 Závěr

Cílem bylo aplikování diagnostických metod na vybraném prvku, zjištění jeho vlastností a míry poškození. Při vizuální prohlídce se dřevo podle makroskopických znaků zatřídilo a podle způsobu poškození a velikosti chodbiček byl prvek pravděpodobně poškozen tesaříkem. Na prvku se popsaly strany a na každé straně se označily řezy, které se změřily posuvným měřidlem. Na prvku bylo provedeno měření vlhkosti, doby průchodu ultrazvukových vln a pevnosti v tlaku. Stanovení vlhkosti bylo metodou váhovou a pomocí odporového přístroje Hygrotest 6500, přičemž obě získané vlhkosti se porovnaly, a díky minimálnímu rozdílu se výsledky uznaly za věrohodné. Přístrojem Tico o fr. 54, 82 a 150 kHz se provádělo měření doby průchodu ultrazvukových vln, z kterých se zjistily hodnoty rychlostí v měřených řezech na strany AC a BD. Po vnesení do grafu se projevíly místa snížených rychlostí, způsobené vadami uvnitř prvku. Graf pro měření na strany AC vykazoval menší počet vad než graf měření na strany BD, proto byl použit pro závěrečný graf, kde se rychlosti srovnávali s pevnostmi, zjištěných ze zkoušky pevnosti v tlaku. V měření podél vláken se rychlosti navzájem příliš nelišili. Před závěrečnou zkouškou se prvek rozřezal na hranoly stanovených rozměrů pro zkoušku pevnosti v tlaku, a každému se změřily jejich rozměry a zvážily se jak v přirozeném, tak ve vysušeném stavu. Při zkoušce pevnosti v tlaku se zjišťovaly hodnoty maximálního zatížení, které vydrží jednotlivé vzorky. Jelikož vzorky neměly normou předepsanou referenční vlhkost 12 %, pevnosti se upravily vzorcem. Tyto pevnosti se zprůměrovaly na vzdálenosti po 100 mm a vynesly se do grafu spolu s rychlostí ultrazvuku na stranu AC o frekvenci 82 kHz. Ze všech hodnot pevností se provedl aritmetický průměr, podle kterého se dřevo zatřídilo jako C35. V grafu se hodnoty proložily polynomicou spojnici, které měly přibližně stejný průběh, z čehož se metody usoudily za úspěšné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005, 171 s. ISBN 80-867-6972-0.
- [2] ADÁMEK, Jiří. a kolektiv, *Studijní opora pro komb. st. Modul BI-M04 Keramika, dřevo, kovy a sklo*. Brno: CERM, 2004.
- [3] Makroskopická stavba dřeva – teoretická část. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. © 2009-2013 [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_makroskopicka_stavba_dreva/
- [4] GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002, iv, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
- [5] VAŠÍČEK, Jaromír. *Národní inventarizace lesů v České republice: 2001-2004 : úvod, metody, výsledky = National forest inventory in the Czech Republic : 2001-2004 : introduction, methods, results* [online]. Vyd. 1. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, 2007, 222 s. [cit. 2013-08-28]. ISBN 978-80-254-1470-5. Dostupné z: http://www.uhul.cz/images/nil/NIL_CR_2001-2004_NFI_CZ_2001-2004.pdf
- [6] VANĚREK J. a kolektiv, *Studijní opora pro komb. st. Modul M01 Kovové a dřevěné materiály*. Brno: CERM, 2006.
- [7] KLOIBER, Michal. *Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva*. Brno, 2007. Disertační práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [8] Dřevomorka domácí. *Biological library* [online]. 27. 7. 2006 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.biolib.cz/cz/image/id18136/>
- [9] Koniofora sklepní. *Škudci.com* [online]. neuvedeno [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.skudci.com/koniofora-sklepní>
- [10] Trámovka plotní. *Škudci.com* [online]. neuvedeno [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.skudci.com/tramovka-plotni>
- [11] Tesařík krovový. *Desinsekta* [online]. © 2014 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.desinsekta.cz/cs/component/content/article/2-kdce/79-tesarik-krovovy>
- [12] Červotoč proužkováný. *Desinsekta* [online]. © 2014 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.desinsekta.cz/cs/component/content/article/2-kdce/33-cervotoc-prouzkovany>

- [13] Pilořitka veliká. *Desinsekta* [online]. © 2014 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.desinsekta.cz/cs/atlas-kdc/62-piloritka-velika>
- [14] REINPRECHT, Ladislav. *Ochrana dřeva*. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.
- [15] VLČEK, Milan. *Poruchy a rekonstrukce staveb*. 1. vyd. Brno: ERA, 2001. Technická knihovna (ERA). ISBN 8086517101.
- [16] MENCL, Vojtěch. *Stavebně technické průzkumy: MP 8.1 : metodická pomůcka k činnosti autorizovaných osob*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2012, 48 s. Metodické pomůcky k činnosti autorizovaných osob. ISBN 978-80-87438-27-5.
- [17] HEŘMÁNKOVÁ, V.; KLOIBER, M.; TIPPNER, J.; ANTON, O. DIAGNOSTICKÉ METODY PRO HODNOCENÍ KONSTRUKČNÍHO DŘEVA. In Sborník recenzovaných příspěvků konference ZKOUŠENÍ A JAKOST VE STAVEBNICTVÍ 2011. Brno: VUT v Brně, 2011. s. 77-95. ISBN: 978-80-214-4338- 9.
- [18] ČSN EN 13183-1. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 1: Stanovení váhovou metodou*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [19] ČSN EN 12504-4. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005.
- [20] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2011.
- [21] ČSN EN 408. *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012.
- [22] ČSN EN 13183-2. *Vlhkost vzorku řeziva - Část 2: Odhad elektrickou odporovou metodou*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [23] ČSN 49 0108. *Dřevo: Zisťovanie hustoty*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1993.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Tabulka rozměrů trámu na určených řezech	I
Příloha 2 - Tabulka měření rychlosti ultrazvukového šíření napříč vláken AC a BD frekvencí 82 kHz.....	II
Příloha 3 - Tabulka měření rychlosti ultrazvukového šíření napříč vláken AC a BD frekvencí 54 kHz.....	III
Příloha 4 - Tabulka pro stranu AB s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky	IV
Příloha 5 - Tabulka pro stranu AD s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky	V
Příloha 6 - Tabulka pro stranu BC s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky	VI
Příloha 7 - Tabulka pro stranu CD s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky	VII

Příloha 1 - Tabulka rozměrů trámu na určených řezech

číslo řezu	vzdálenost [mm]	strana A [mm]	strana B [mm]	strana C [mm]	strana D [mm]
1	20	132,23	103,66	138,82	100,33
2	40	134,34	103,84	139,19	99,23
3	60	135,83	103,32	139,25	99,19
4	80	136,06	103,26	139,18	97,41
5	100	136,02	103,03	139,48	97,16
6	120	136,6	102,92	140,19	96,9
7	140	138,62	102,79	141,41	98,15
8	160	139,73	103,9	140,3	97,99
9	180	139,15	103,74	140,8	97,44
10	200	138,7	103,6	141,14	97,72
11	220	136,08	103,59	140,85	97,62
12	240	136,39	103,06	141,75	97,57
13	260	137,49	102,8	141,77	97,72
14	280	137,6	103,46	141,67	97,4
15	300	136,07	104,71	140,64	97,92
16	320	132,07	104,91	140,26	97,4
17	340	132,13	105,36	139,31	97,59
18	360	131,74	105,64	139,31	98,79
19	380	125,94	105,74	139,58	98,99
20	400	124,76	106,39	138,85	100,17
21	420	130,04	106,74	138,67	100,28
22	440	131,57	106,12	136,79	99,94
23	460	135,81	105,33	137,41	100,27
24	480	136,67	105,21	137,39	100,54
25	500	134,17	106,08	139,05	100,15
26	520	136,55	105,94	133,65	99,84
27	540	137,47	106,5	137,18	100,1
28	560	137,42	106,97	138,31	99,82
29	580	136,78	107,32	139,4	100,72
30	600	136,47	108,14	140,45	101,61
31	620	140,51	107,92	140,49	100,96
32	640	140,52	107,63	140,23	101,53
33	660	140,14	107,06	141,09	103,29
34	680	139,32	107,37	141,6	104,46
35	700	134,06	108,2	141,15	105,72
36	720	133,35	108,97	141,09	106,15
37	740	133,69	108,66	141,09	106,53
38	760	136,71	109,48	140,69	107,32
39	780	139,63	109,44	139,88	107,81
40	800	135,12	110,16	140,26	108,02
41	820	136,31	109,99	140,85	108,1
42	840	134,15	109,57	140,57	107,68
43	860	133,83	109,89	141,24	107,33
44	880	133,88	110,26	141,39	107,29
45	900	134,71	110,36	141,76	107,19
46	920	136,27	110,04	140,57	106,63
47	940	137,68	109,13	140,23	106,5
Průměr m_i		136	106	140	101
Minimum $\min_i$		125	103	134	97
Maximum $\max_i$		141	110	142	108
Směrodatná odchylka s_i		3,3	2,5	1,6	3,9

**Příloha 2 - Tabulka měření rychlosti ultrazvukového šíření napříč vláken AC a BD
frekvencí 82 kHz**

napříč vláken AC					napříč vláken BD			
sonda 82 kHz								
číslo řezu	vzdálenost [mm]	čas [μs]	rychlost [m/s]	stupeň poškození	číslo řezu	čas [μs]	rychlost [m/s]	stupeň poškození
1	20	67	2020	1	1	88,5	1150	2
2	40	55	2490	1	2	80,1	1270	1
3	60	54,1	2540	1	3	83	1220	2
4	80	56	2460	1	4	82,1	1220	2
5	100	57,2	2410	1	5	79,6	1260	1
6	120	64,5	2150	1	6	79,5	1260	1
7	140	64,5	2170	1	7	83,1	1210	2
8	160	91,9	1520	1	8	76,1	1330	1
9	180	64,7	2160	1	9	68,9	1460	1
10	200	62,4	2240	1	10	129	780	3
11	220	60,7	2280	1	11	-	-	-
12	240	59,4	2340	1	12	83,3	1200	2
13	260	65,8	2120	1	13	-	-	-
14	280	56,7	2460	1	14	126	800	3
15	300	60,7	2280	1	15	-	-	-
16	320	60,1	2270	1	16	-	-	-
17	340	85,2	1590	1	17	-	-	-
18	360	59,1	2290	1	18	-	-	-
19	380	68,1	1950	1	19	-	-	-
20	400	65,1	2020	1	20	-	-	-
21	420	64,2	2090	1	21	-	-	-
22	440	68,1	1970	1	22	-	-	-
23	460	68,2	2000	1	23	-	-	-
24	480	59,1	2320	1	24	-	-	-
25	500	74	1850	1	25	-	-	-
26	520	60	2250	1	26	-	-	-
27	540	66,2	2070	1	27	132,2	780	3
28	560	72,2	1910	1	28	-	-	-
29	580	67,2	2050	1	29	141,6	730	4
30	600	64,1	2160	1	30	-	-	-
31	620	61,3	2290	1	31	-	-	-
32	640	60,5	2320	1	32	-	-	-
33	660	72,5	1940	1	33	-	-	-
34	680	67,5	2080	1	34	-	-	-
35	700	69,4	1980	1	35	-	-	-
36	720	71,6	1920	1	36	-	-	-
37	740	78,6	1750	1	37	-	-	-
38	760	79,3	1750	1	38	-	-	-
39	780	79,7	1750	1	39	-	-	-
40	800	85,5	1610	1	40	-	-	-
41	820	78,9	1760	1	41	-	-	-
42	840	86,8	1580	1	42	-	-	-
43	860	96,3	1430	1	43	-	-	-
44	880	89,3	1540	1	44	-	-	-
45	900	94	1470	1	45	-	-	-
46	920	87,7	1580	1	46	-	-	-
47	940	96	1450	1	47	-	-	-

**Příloha 3 - Tabulka měření rychlosti ultrazvukového šíření napříč vláken AC a BD
frekvencí 54 kHz**

napříč vláken AC					napříč vláken BD			
sonda 54 kHz								
číslo řezu	vzdálenost [mm]	čas [μs]	rychlost [m/s]	stupeň poškození	číslo řezu	čas [μs]	rychlost [m/s]	stupeň poškození
1	20	63,4	2140	1	1	76,1	1340	1
2	40	63,5	2150	1	2	77,2	1320	1
3	60	62,4	2200	1	3	77,1	1310	1
4	80	64,3	2140	1	4	77,9	1290	1
5	100	65,4	2110	1	5	77,1	1300	1
6	120	69,5	1990	1	6	83,1	1200	2
7	140	66,6	2100	1	7	70,8	1420	1
8	160	64,4	2170	1	8	80,9	1250	2
9	180	64,4	2170	1	9	78	1290	1
10	200	64,3	2180	1	10	79	1270	1
11	220	57,6	2400	1	11	72	1400	1
12	240	56,7	2450	1	12	72	1390	1
13	260	62,3	2240	1	13	83	1210	2
14	280	61,7	2260	1	14	83,1	1210	2
15	300	65,3	2120	1	15	89	1140	2
16	320	66,5	2050	1	16	93,1	1090	2
17	340	65,6	2070	1	17	89,1	1140	2
18	360	61,5	2200	1	18	90	1140	2
19	380	67,5	1970	1	19	96,2	1060	2
20	400	59,7	2210	1	20	92,1	1120	2
21	420	62,7	2140	1	21	-	-	-
22	440	67,6	1980	1	22	-	-	-
23	460	69,5	1970	1	23	-	-	-
24	480	68,6	2000	1	24	-	-	-
25	500	52,5	2600	1	25	81,4	1270	1
26	520	68,5	1970	1	26	84,6	1220	2
27	540	71,6	1920	1	27	84,6	1220	2
28	560	69,1	2000	1	28	87,5	1180	2
29	580	69,4	1990	1	29	90,6	1150	2
30	600	69,5	1990	1	30	153,2	680	4
31	620	73,6	1910	1	31	100,6	1040	2
32	640	77,5	1810	1	32	-	-	-
33	660	76,6	1840	1	33	-	-	-
34	680	72,5	1940	1	34	-	-	-
35	700	76,5	1800	1	35	-	-	-
36	720	67,6	2030	1	36	-	-	-
37	740	77,6	1770	1	37	-	-	-
38	760	78,7	1760	1	38	-	-	-
39	780	81,6	1710	1	39	-	-	-
40	800	82,6	1670	1	40	-	-	-
41	820	85,4	1620	1	41	-	-	-
42	840	85,6	1600	1	42	-	-	-
43	860	95,3	1440	1	43	-	-	-
44	880	97,4	1410	1	44	-	-	-
45	900	96,4	1430	1	45	-	-	-
46	920	90,3	1530	1	46	-	-	-
47	940	84,2	1650	1	47	-	-	-

Příloha 4 - Tabulka pro stranu AB s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky

AB	naměřené hodnoty						spočítané hodnoty					
	š [mm]	h [mm]	v [mm]	m _s [g]	m _v [g]	F _{max} [kN]	V [mm ³]	A [mm ²]	w [%]	f _w [N/mm ²]	f [N/mm ²]	ς [kg/m ³]
1-1	16,4	16,49	96,45	10,22	10,5	9,3	26100	270	2,7	34,4	21,7	402
1-2	15,5	16,55	96,37	10,5	10,74	14,5	24700	257	2,3	56,5	34,6	435
1-3	16,52	16,75	96,45	11,33	11,66	13,65	26700	277	2,9	49,3	31,4	437
1-4	15,84	16,54	97,01	11,25	11,55	11,7	25400	262	2,7	44,7	28,0	455
1-5	16,84	17,34	96,89	12,66	13,14	4,55	28300	292	3,8	15,6	10,5	464
1-6	16,17	16,94	96,58	12,46	12,85	14,05	26500	274	3,1	51,3	33,1	485
2-1	16,25	16,2	96,59	11,15	11,48	9,2	25400	263	3,0	34,9	22,3	452
2-2	15,36	16,06	96,42	10,86	11,06	10,6	23800	247	1,8	43,0	25,5	465
2-3	16,62	16,9	97,09	12,51	12,88	12,75	27300	281	3,0	45,4	29,0	472
2-4	15,48	15,95	96,68	13,36	13,63	4,3	23900	247	2,0	17,4	10,5	570
2-5	16,83	17,15	96,51	14,8	15,06	3,7	27900	289	1,8	12,8	7,6	540
2-6	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
3-1	15,91	16,08	96,73	12,04	12,25	6,5	24700	256	1,7	25,4	15,0	496
3-2	15,06	15,82	96,93	9,7	9,97	15,1	23100	238	2,8	63,4	40,0	432
3-3	16,34	16,86	96,62	11,39	11,77	10,6	26600	275	3,3	38,5	25,1	442
3-4	15,42	15,79	96,58	10,96	11,15	7,95	23500	243	1,7	32,7	19,2	474
3-5	16,81	14,23	96,6	9,46	9,84	1,8	23100	239	4,0	7,5	5,1	426
3-6	15,46	17,14	96,89	11,06	11,28	12	25700	265	2,0	45,3	27,2	439
4-1	16,02	16,19	97,08	10,92	11,24	13,85	25200	259	2,9	53,4	34,0	446
4-2	15,22	16,41	96,94	9,8	10,12	13,3	24200	250	3,3	53,3	34,6	418
4-3	16,49	16,83	96,8	11,43	11,69	15,45	26900	278	2,3	55,7	34,0	435
4-4	15,25	15,67	96,87	10,9	11,11	13,9	23100	239	1,9	58,2	34,7	481
4-5	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
4-6	14,82	15,35	96,72	10,55	10,81	6,2	22000	227	2,5	27,3	16,9	491
5-1	15,2	16,54	97,03	12,16	12,5	12,1	24400	251	2,8	48,1	30,4	512
5-2	15,59	16,51	96,66	10,02	10,29	9,6	24900	257	2,7	37,3	23,4	413
5-3	15,78	16,85	96,98	11,25	11,49	11,8	25800	266	2,1	44,4	26,9	445
5-4	15,49	15,68	96,65	11,06	11,31	15,6	23500	243	2,3	64,2	39,2	481
5-5	16,13	17,51	96,7	11,99	12,27	6,4	27300	282	2,3	22,7	13,9	449
5-6	14,74	17,08	96,66	10,33	10,56	9,35	24300	252	2,2	37,1	22,6	435
6-1	15,26	16,63	96,73	10,56	10,84	12,05	24500	254	2,7	47,5	29,7	442
6-2	15,79	16,4	96,73	10,3	10,54	11,6	25000	259	2,3	44,8	27,5	422
6-3	16,07	16,72	96,58	11,56	11,96	11,2	26000	269	3,5	41,7	27,4	460
6-4	15,77	15,9	96,38	11,34	11,56	16,4	24200	251	1,9	65,4	39,1	478
6-5	16,23	16,72	96,62	12,03	12,35	5,9	26200	271	2,7	21,7	13,6	471
6-6	15,46	17,27	96,55	12,01	12,34	7,1	25800	267	2,7	26,6	16,8	478
7-1	15,88	16,32	96,8	10,6	10,9	16,8	25100	259	2,8	64,8	41,0	434
7-2	15,77	16,22	96,84	10,4	10,74	12,5	24800	256	3,3	48,9	31,8	433
7-3	16,11	16,21	96,77	11,35	11,73	10,35	25300	261	3,3	39,6	25,9	464
7-4	16,03	16,24	96,36	12,08	12,48	12	25100	260	3,3	46,1	30,1	497
7-5	16,49	16,8	96,44	12,25	12,63	5,5	26700	277	3,1	19,9	12,8	473
7-6	15,95	17,28	96,7	12,94	13,35	6,05	26700	276	3,2	22,0	14,2	500
8-1	16,19	16,89	96,25	11,04	11,44	12,7	26300	273	3,6	46,4	30,9	435
8-2	16,09	16,11	96,8	10,33	10,57	14,7	25100	259	2,3	56,7	34,8	421
8-3	16,42	16,81	96,36	10,68	10,91	10,35	26600	276	2,2	37,5	22,7	410
8-4	16,11	16,43	96,63	12,14	12,42	19	25600	265	2,3	71,8	43,9	485
8-5	16,7	17,29	96,43	12,97	13,29	2,65	27800	289	2,5	9,2	5,7	478
8-6	16,19	17,51	96,59	13,8	14,27	12,95	27400	283	3,4	45,7	30,0	521
9-1	16,44	17,12	96,96	11,33	11,75	15	27300	281	3,7	53,3	35,6	430
9-2	16,17	16,7	96,58	10,87	11,16	14,4	26100	270	2,7	53,3	33,4	428
9-3	16,55	16,63	97,06	11,63	11,94	18,5	26700	275	2,7	67,2	42,1	447
9-4	16,03	16,63	96,76	13,25	13,55	20,15	25800	267	2,3	75,6	46,2	525
9-5	16,45	16,99	96,54	13,36	13,76	2,55	27000	279	3,0	9,1	5,8	510
9-6	16,34	17,24	96,29	11,86	12,13	15,5	27100	282	2,3	55,0	33,6	448

Příloha 5 - Tabulka pro stranu AD s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky

AD	naměřené hodnoty						spočítané hodnoty					
	š [mm]	h [mm]	v [mm]	m _s [g]	m _v [g]	F _{max} [kN]	V [mm ³]	A [mm ²]	w [%]	f _w [N/mm ²]	f [N/mm ²]	ς [kg/m ³]
1-1	17	17,91	96,24	11,76	12,01	16,8	29300	304	2,1	55,2	33,4	410
1-2	16,45	17,24	96,8	11,11	11,44	15,75	27500	284	3,0	55,5	35,5	416
1-3	16,57	17,86	96,7	11,82	12,14	14,8	28600	296	2,7	50,0	31,4	424
1-4	16,28	16,88	96,6	11,15	11,48	12,8	26500	275	3,0	46,6	29,7	433
1-5	16,34	18,05	96,44	13,77	14,22	15,55	28400	295	3,3	52,7	34,3	501
1-6	16,09	16,34	96,44	12,25	12,69	7,05	25400	263	3,6	26,8	17,8	500
2-1	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
2-2	16,19	16,65	96,58	11,7	11,98	12,2	26000	270	2,4	45,3	27,9	461
2-3	16,6	17,71	96,65	12,42	12,81	19,5	28400	294	3,1	66,3	42,8	451
2-4	16,21	16,28	96,34	12,38	12,7	8,1	25400	264	2,6	30,7	19,1	500
2-5	16,48	18,16	96,45	13,61	13,96	18,25	28900	299	2,6	61,0	38,0	483
2-6	16,44	17,42	96,26	14,66	15,03	3,8	27600	286	2,5	13,3	8,2	545
3-1	16,71	15,86	96,4	10,26	10,55	5,4	25500	265	2,8	20,4	12,9	414
3-2	16,56	16,67	96,74	11	11,37	10,8	26700	276	3,4	39,1	25,6	426
3-3	16,63	17,83	96,59	11,65	12,03	13,75	28600	297	3,3	46,4	30,2	421
3-4	16,55	16	96,92	10,94	11,26	14,65	25700	265	2,9	55,3	35,2	438
3-5	16,53	17,78	96,48	12,89	13,36	16,2	28400	294	3,6	55,1	36,7	470
3-6	16,34	17,13	96,51	12,16	12,56	19,1	27000	280	3,3	68,2	44,5	465
4-1	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
4-2	16,63	16,26	96,72	10,56	10,91	10,9	26200	270	3,3	40,3	26,3	416
4-3	16,7	17,31	96,51	11,43	11,65	18,25	27900	289	1,9	63,1	37,7	418
4-4	16,93	15,78	96,74	10,88	11,18	14,4	25800	267	2,8	53,9	34,0	433
4-5	16,71	18,12	96,4	12,25	12,65	7,9	29200	303	3,3	26,1	17,0	433
4-6	16,81	17,11	96,79	12,62	13,04	13,4	27800	288	3,3	46,6	30,4	469
5-1	16,8	17,57	96,58	12,25	12,7	3,65	28500	295	3,7	12,4	8,2	446
5-2	16,09	16,02	96,96	11,4	11,75	12,15	25000	258	3,1	47,1	30,3	470
5-3	16,62	17,49	96,58	12,89	13,24	12	28100	291	2,7	41,3	26,0	471
5-4	16,58	15,87	96,92	12,36	12,81	9,4	25500	263	3,6	35,7	23,8	502
5-5	16,27	18,12	96,74	12,83	13,2	4,15	28500	295	2,9	14,1	8,9	463
5-6	16,58	17,5	97,31	13,88	14,39	2,2	28200	290	3,7	7,6	5,1	510
6-1	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
6-2	16,19	15,8	96,75	10,24	10,63	7,5	24700	256	3,8	29,3	19,7	430
6-3	16,61	17,09	96,55	10,91	11,29	16,85	27400	284	3,5	59,4	39,1	412
6-4	16,29	15,94	96,84	10,55	10,91	12,9	25100	260	3,4	49,7	32,6	435
6-5	16,11	17,87	96,38	10,93	11,31	13,45	27700	288	3,5	46,7	30,8	408
6-6	16,52	16,98	96,57	10,82	11,23	8,6	27100	281	3,8	30,7	20,6	414
7-1	16,88	16,13	96,55	10,58	10,82	7,4	26300	272	2,3	27,2	16,6	411
7-2	16,13	15,76	96,69	9,75	9,95	9	24600	254	2,1	35,4	21,3	404
7-3	16,15	16,83	96,51	10,69	11,03	14,35	26200	272	3,2	52,8	34,2	421
7-4	16,26	16,36	96,9	10,55	10,89	11,75	25800	266	3,2	44,2	28,7	422
7-5	15,57	18,25	96,44	11,49	11,84	13,2	27400	284	3,0	46,5	29,8	432
7-6	15,67	17,42	96,56	10,14	10,4	9,5	26400	273	2,6	34,8	21,7	394
8-1	16,84	16,39	97	10,77	11,03	6,45	26800	276	2,4	23,4	14,4	412
8-2	16,2	16,47	97,19	10,17	10,56	6,6	25900	267	3,8	24,7	16,7	408
8-3	16,37	17,23	97,35	11,26	11,65	17,8	27500	282	3,5	63,1	41,6	424
8-4	16,46	16,38	97,13	10,03	10,38	11,6	26200	270	3,5	43,0	28,4	396
8-5	15,62	17,66	96,56	11,28	11,73	7,7	26600	276	4,0	27,9	19,0	441
8-6	13,91	17,11	96,55	8,88	9,03	10,7	23000	238	1,7	45,0	26,4	393
9-1	17,48	17,3	97,16	13,79	14,16	5,8	29400	302	2,7	19,2	12,0	482
9-2	15,88	16,73	96,89	10,3	10,5	5,1	25700	266	1,9	19,2	11,5	409
9-3	16,42	17,58	96,1	12,99	13,48	12,4	27700	289	3,8	43,0	28,8	487
9-4	13,57	17,21	96,62	8,49	8,79	5,6	22600	234	3,5	24,0	15,9	389
9-5	15,48	17,89	96,07	10,41	10,78	3,65	26600	277	3,6	13,2	8,7	405
9-6	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0

Příloha 6 - Tabulka pro stranu BC s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky

BC	naměřené hodnoty						spočítané hodnoty					
	š [mm]	h [mm]	v [mm]	m _s [g]	m _v [g]	F _{max} [kN]	V [mm ³]	A [mm ²]	w [%]	f _w [N/mm ²]	f [N/mm ²]	ς [kg/m ³]
1-1	16,41	16,43	96,53	11,05	11,39	14,75	26000	270	3,1	54,7	35,2	438
1-2	16,29	17,23	96,57	11,28	11,49	16,7	27100	281	1,9	59,5	35,4	424
1-3	16,85	17,18	96,54	13,05	13,37	15,8	27900	289	2,5	54,6	33,7	479
1-4	16,41	17,26	96,54	12,6	12,88	17	27300	283	2,2	60,0	36,5	472
1-5	17,53	17,51	96,82	16,19	16,47	12,7	29700	307	1,7	41,4	24,4	555
1-6	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
2-1	15,78	17,67	96,56	11,86	12,16	7,8	26900	279	2,5	28,0	17,4	452
2-2	15,89	16,47	96,86	11,03	11,26	8,1	25300	262	2,1	31,0	18,7	445
2-3	16,12	16,59	96,5	12,3	12,58	16,2	25800	267	2,3	60,6	37,0	488
2-4	15,86	16,33	96,67	12,82	13,19	15,45	25000	259	2,9	59,7	37,9	528
2-5	16,56	17,82	96,51	14,91	15,38	15,45	28500	295	3,2	52,4	33,8	540
2-6	15,92	16,95	96,75	12,32	12,77	6,45	26100	270	3,7	23,9	15,9	489
3-1	15,37	17,28	96,46	11,19	11,41	11,9	25600	266	2,0	44,8	26,8	446
3-2	15,31	16,67	96,66	10,04	10,41	15,5	24700	255	3,7	60,7	40,5	421
3-3	15,73	16,39	96,42	11,36	11,76	16,1	24900	258	3,5	62,4	41,3	472
3-4	15,1	16,39	96,81	11,4	11,63	12,3	24000	247	2,0	49,7	29,9	485
3-5	16,1	17,74	96,43	14,39	14,64	13,45	27500	286	1,7	47,1	27,8	532
3-6	15,18	17	96,49	11,2	11,44	11,8	24900	258	2,1	45,7	27,7	459
4-1	15,37	17,36	96,77	11,4	11,62	12,15	25800	267	1,9	45,5	27,2	450
4-2	14,44	16,99	96,7	9,98	10,32	9,25	23700	245	3,4	37,7	24,7	435
4-3	15,67	16,28	96,56	11	11,43	12,15	24600	255	3,9	47,6	32,2	465
4-4	14,96	15,94	96,98	11,1	11,37	14,2	23100	238	2,4	59,5	36,8	492
4-5	15,76	17,96	96,53	14,18	14,45	15,6	27300	283	1,9	55,1	32,9	529
4-6	15,37	16,9	96,54	11,23	11,45	7,05	25100	260	2,0	27,1	16,2	456
5-1	14,88	17,16	96,6	11,41	11,68	15,2	24700	255	2,4	59,5	36,6	473
5-2	14,22	16,75	96,75	10	10,38	10,9	23000	238	3,8	45,8	30,8	451
5-3	15,55	16,22	96,51	10,17	10,4	10,5	24300	252	2,3	41,6	25,4	428
5-4	14,64	16,16	96,7	11,22	11,44	5,4	22900	237	2,0	22,8	13,7	500
5-5	15,77	17,46	96,5	14,69	14,96	12,1	26600	275	1,8	43,9	26,1	562
5-6	15,28	17,11	96,8	11,24	11,5	5,65	25300	261	2,3	21,6	13,2	455
6-1	15,43	17,18	97,1	11,57	11,79	14,05	25700	265	1,9	53,0	31,6	459
6-2	13,62	16,77	96,84	9,34	9,54	11	22100	228	2,1	48,2	29,2	432
6-3	15,73	16,62	96,62	11,57	11,89	13,1	25300	261	2,8	50,1	31,6	470
6-4	14,27	15,62	96,57	10,39	10,61	14,35	21500	223	2,1	64,4	38,9	493
6-5	15,96	17,97	96,55	15,12	15,46	16,45	27700	287	2,2	57,4	35,0	558
6-6	14,6	17,7	96,45	10,29	10,64	3	24900	258	3,4	11,6	7,6	427
7-1	15,78	17,1	96,84	11,7	12,12	15	26100	270	3,6	55,6	36,9	464
7-2	13,87	16,54	96,77	9,49	9,72	14,55	22200	229	2,4	63,4	39,1	438
7-3	15,92	16,86	96,7	12,24	12,51	6,6	26000	268	2,2	24,6	15,0	481
7-4	14,66	15,9	96,94	10,66	10,9	8,15	22600	233	2,3	35,0	21,3	482
7-5	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
7-6	16,12	17,53	97,1	15,81	16,13	12,35	27400	283	2,0	43,7	26,3	589
8-1	16,14	16,52	96,94	11,86	12,16	19,75	25800	267	2,5	74,1	46,0	471
8-2	14,24	16,89	96,82	10,1	10,36	6,2	23300	241	2,6	25,8	16,1	445
8-3	16,27	17,43	96,7	12,38	12,81	14,2	27400	284	3,5	50,1	33,0	468
8-4	14,94	16,29	96,77	11,25	11,49	15,55	23600	243	2,1	63,9	38,7	487
8-5	16,67	17,54	96,93	15,56	15,86	10,9	28300	292	1,9	37,3	22,3	560
8-6	-	-	-	-	-	-	0	0	0,0	0,0	0,0	0
9-1	16,05	17,53	97,41	11,6	11,81	15,4	27400	281	1,8	54,7	32,4	431
9-2	15,71	17,02	97,12	11,51	11,77	6,55	26000	267	2,3	24,5	15,0	453
9-3	16,38	17,32	97,27	13,77	14,04	10,4	27600	284	2,0	36,7	21,9	509
9-4	16,21	16,66	96,63	13,81	14,07	5,9	26100	270	1,9	21,8	13,0	539
9-5	17,14	17,59	97,12	15,01	15,29	5,2	29300	301	1,9	17,2	10,3	522
9-6	16,27	17,24	96,62	11,91	12,25	2,2	27100	280	2,9	7,8	5,0	452

Příloha 7 - Tabulka pro stranu CD s naměřenými a spočítanými hodnotami pro jednotlivé vzorky

CD	naměřené hodnoty						spočítané hodnoty					
	š [mm]	h [mm]	v [mm]	m _s [g]	m _v [g]	F _{max} [kN]	V [mm ³]	A [mm ²]	w [%]	f _w [N/mm ²]	f [N/mm ²]	ς [kg/m ³]
1-1	16,23	17,27	96,75	10,18	10,42	8,25	27100	280,3	2,4	29,4	18,1	385
1-2	16,03	17,13	96,5	10,66	10,93	11,6	26500	274,6	2,5	42,2	26,2	412
1-3	16,3	17,37	96,39	11,61	11,86	16,15	27300	283,1	2,2	57,0	34,6	434
1-4	16,42	17,33	96,36	11,89	12,14	10,9	27400	284,6	2,1	38,3	23,1	443
1-5	16,8	18,19	96,52	13,86	14,19	6,65	29500	305,6	2,4	21,8	13,4	481
1-6	17,03	17,44	96,39	13,08	13,36	6,85	28600	297,0	2,1	23,1	14,0	467
2-1	16,12	17,65	96,63	11,39	11,61	19,4	27500	284,5	1,9	68,2	40,7	422
2-2	15,24	16,29	96,81	11,33	11,56	9,5	24000	248,3	2,0	38,3	23,0	482
2-3	16,66	17,36	96,49	12,4	12,82	16,1	27900	289,2	3,4	55,7	36,5	459
2-4	15,39	17,01	96,98	13,91	14,27	5,95	25400	261,8	2,6	22,7	14,2	562
2-5	17,04	18,35	96,37	14,69	15	9,5	30100	312,7	2,1	30,4	18,4	498
2-6	15,36	17,62	96,62	12,79	13,13	5,95	26100	270,6	2,7	22,0	13,8	503
3-1	16,91	16,77	96,5	10,07	10,29	10,4	27400	283,6	2,2	36,7	22,3	376
3-2	13,97	16,19	97	9,1	9,26	11,05	21900	226,2	1,8	48,9	28,8	423
3-3	17,14	17,31	96,39	12,13	12,45	16,1	28600	296,7	2,6	54,3	33,9	435
3-4	14,56	16,69	96,97	9,74	10,07	15,8	23600	243,0	3,4	65,0	42,6	427
3-5	17,37	17,8	96,51	14,43	14,84	19,9	29800	309,2	2,8	64,4	40,8	498
3-6	14,73	17,68	96,47	10,76	11,09	13,95	25100	260,4	3,1	53,6	34,4	442
4-1	16,47	17,41	96,51	10,37	10,74	8,8	27700	286,7	3,6	30,7	20,3	388
4-2	13,86	16,01	96,52	8,39	8,58	10,5	21400	221,9	2,3	47,3	28,9	401
4-3	17,09	17,25	96,83	11,8	12,08	16	28500	294,8	2,4	54,3	33,4	424
4-4	13,44	16,36	96,45	9,2	9,48	11,3	21200	219,9	3,0	51,4	33,0	447
4-5	17,51	18,16	96,38	15,01	15,25	16,1	30600	318,0	1,6	50,6	29,6	498
4-6	13,37	17,52	96,4	9,75	10,06	10,1	22600	234,2	3,2	43,1	27,9	445
5-1	16,67	18	96,53	14,8	15,08	3,9	29000	300,1	1,9	13,0	7,7	520
5-2	13,87	15,9	96,69	9,33	9,55	7,2	21300	220,5	2,4	32,6	20,1	448
5-3	17	17,86	96,69	14,31	14,64	11,9	29400	303,6	2,3	39,2	24,0	498
5-4	13,71	16,32	96,68	9,42	9,59	11,45	21600	223,7	1,8	51,2	30,3	444
5-5	17,72	17,88	96,41	14,07	14,4	15,65	30500	316,8	2,3	49,4	30,3	472
5-6	13,66	17,95	96,8	10,61	10,9	9,4	23700	245,2	2,7	38,3	24,1	460
6-1	16,14	17,75	96,55	10,82	11,04	11,4	27700	286,5	2,0	39,8	23,9	399
6-2	13,97	16,13	96,37	8,52	8,7	8,85	21700	225,3	2,1	39,3	23,7	401
6-3	16,75	17,94	96,76	12,49	12,71	14,15	29100	300,5	1,8	47,1	27,8	437
6-4	13,78	16,65	96,7	9,19	9,38	15,35	22200	229,4	2,1	66,9	40,3	423
6-5	17,35	17,78	96,43	12,47	12,79	12	29700	308,5	2,6	38,9	24,2	431
6-6	13,51	17,8	96,42	9,8	10,03	11,75	23200	240,5	2,3	48,9	30,0	432
7-1	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
7-2	14,67	17,73	96,22	9,76	10,02	8,1	25000	260,1	2,7	31,1	19,5	401
7-3	15,49	18,05	96,69	12,05	12,39	10,65	27000	279,6	2,8	38,1	24,1	459
7-4	14,68	17,17	96,34	9,91	10,13	12,15	24300	252,1	2,2	48,2	29,3	417
7-5	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
7-6	14,46	16,47	96,35	9,62	9,91	7,15	22900	238,2	3,0	30,0	19,2	433
8-1	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
8-2	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
8-3	15,13	18,27	96,53	11,23	11,63	7,6	26700	276,4	3,6	27,5	18,2	436
8-4	15,57	17,35	96,32	10,69	10,91	17,4	26000	270,1	2,1	64,4	38,8	420
8-5	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
8-6	15,42	17,82	96,55	11,2	11,39	15,2	26500	274,8	1,7	55,3	32,5	430
9-1	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
9-2	14,81	16,53	96,93	9,5	9,67	9,6	23700	244,8	1,8	39,2	23,2	408
9-3	15,3	18,09	97,17	10,82	11,07	11,3	26900	276,8	2,3	40,8	25,0	412
9-4	15,53	17,74	97,19	10,63	10,86	10,6	26800	275,5	2,2	38,5	23,3	405
9-5	-	-	-	-	-	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
9-6	15,59	17,76	96,68	10,63	10,88	7,35	26800	276,9	2,4	26,5	16,3	406