

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Predikce kroucení konstrukčních prvků při vysychání na
základě měření točitosti smrkové kulatiny**

Diplomová práce

Bc. Miroslav Kotmel

Ing. Michal Kloiber, Ph.D.

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Miroslav Kotmel

Dřevěné konstrukce a stavby na bázi dřeva

Název práce

Predikce kroucení konstrukčních prvků při vysychání na základě měření točitosti smrkové kulatiny

Název anglicky

Prediction of twisting structural elements during drying based on measured spiral grain of spruce logs

Cíle práce

Cílem práce bude stanovit predikci kroucení konstrukční prvků (trámů) při vysychání na základě měření točitosti pod kůrou smrkových stromů (pomocí přístroje Fakopp) a následně měřením točitosti kulatiny při manipulaci pomocí črtáku.

Metodika

Vyhledat archivní a literární zdroje týkající se tématu práce. Na vybraných smrkových stromech provést měření točitosti pomocí přístroje Fakopp. Po těžbě stromů měřit skutečnou točitost jednotlivých výřezů kulatiny pomocí črtáku. Po nařezání konstrukčních prvků (středových trámů) a přirozeném vysušení, měřit míru kroucení pilařských výřezů. Výsledky měření přehledně zpracovat do tabulkové a grafické podoby, včetně doplnění o vlastní fotodokumentaci. Na základě naměřených dat stanovit závislost točitosti pod kůrou stromu získanou z měření pomocí neinvazivního přístroje Fakopp a točitosti měřenou pomocí črtáku na odkorněné kulatině. Dále stanovit možnost predikce kroucení konstrukčních prvků na základě měřené točitosti stromů či kulatiny po těžbě.

Harmonogram práce:

červenec – srpen 2022, literární rešerše

září – listopad 2022, měření v terénu

prosinec 2022 – leden 2023, vyhodnocení naměřených dat

únor – březen 2023, psaní závěrečné práce

duben 2023, odevzdání závěrečné práce

Doporučený rozsah práce

50

Klíčová slova

Dřevo, smrk, kulatina, trám, točitost, kroucení.

Doporučené zdroje informací

- Dinwoodie, J. M.: Timber, its nature and behaviour. E & FN Spon, London. 2000.
- Harris, J.M.: Spiral grain and wave phenomena in wood formation. Springer-Verlag, Berlin. 1989. 214 pp.
- Johansson, G., Kliger, R., Perstorper, M.: Quality of structural timber-product specification system required by end-users. Holz als Roh- und Werkstoff, 52, 2007. pp. 42-48.
- Kliger, I.R.: Spiral grain on logs under bark reveals twist-prone raw material. 2001.
- Kollman, F.P., Côté, W.A.: Principles of wood science and technology, 1. SolidWood. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1968. 592 pp.
- Kubler, H.: Function of spiral grain in trees. Trees, 5(3). 1991. pp. 125-135.
- Pape, R.: Influence of Thinning on Spiral Grain in Norway Spruce Grown on Highly productive sites in southern Sweden. Silva Fennica, 33(1). 1999. pp. 3-12.
- Ross, J.R., Brashaw, K.B., Wang, X., White, H.R., Pellerin, F.R.: Wood and Timber Condition Assessment Manual. Forest Products Society Madison, WI., 2004. 73 p.
- Säll, H.: Spiral Grain in Norway Spruce. Acta Wexionesia, 22. 2002. 171 pp.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Michal Kloiber, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 20. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 02. 04. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Predikce kroucení konstrukčních prvků při vysychání na základě měření točitosti smrkové kulatiny " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 04.04.2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Michalovi Koloiberovi, Ph.D. za užitečné rady při psaní diplomové práce a za vysvětlení způsobů měření točitosti stromů, kulatiny a konstrukčních trámů. Dále bych chtěl poděkovat řešitelům projektu GAČR 21-29389S – Experimentální a numerický odhad únosnosti zářezu v nosnících z konstrukčního dřeva v obecném místě pomocí LEFM z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR a Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT za možnost měření točitosti konstrukčních trámů na dřevě, které bylo pořízeno za účelem experimentálních testů v rámci uvedeného projektu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při mém studiu.

Predikce kroucení konstrukčních prvků při vysychání na základě měření točitosti smrkové kulatiny

Abstrakt

Práce se zabývá predikcí kroucení pilařských výřezů (trámů) na základě měření točitosti pod kůrou pomocí přístroje Fakopp při výběru smrkových stromů. Na základě měření přístrojem využívajícím princip rychlosti šíření zvukových vln byly vytvořeny závislosti na skutečné točitosti měřené na kulatině pomocí črtáku a na kroucení pilařských výřezů po přirozeném vysušení. Točitost pro účely experimentu byla měřena na vybraných 22 stromech smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) H. Karst.) z nichž bylo nařezáno 39 kusů 6 m výřezů kulatiny, které se dále dělí na 22 kusů 6 m výřezů ze spodní části stromu 0–6 m výšky stromu a 17 kusů 6 m výřezů z následující výšky stromu 6–12 m. Z 6 m výřezů kulatiny bylo na pásové pilce vyřezáno celkem 30 trámů profilu 200×250 mm, z toho 19 trámů z výšky stromu 0–6 m a 11 trámů z výšky 6–12 m.

Cílem bylo ověřit hypotézu, že měření přístrojem využívajícím princip rychlosti šíření zvukových vln je možné predikovat skutečnou točitost kulatiny a konstrukčních prvků. Z výsledků práce je patrné, že lze predikovat závislost rozdílu rychlostí šíření zvukových vln a odklonu vláken na vzniku kroucení pilařských výřezů s vysokou mírou pravděpodobnosti. Dle mezinárodní pilařské praxe se točitost do 5 cm/m délky kulatiny nepovažuje za chybu. Je však velice důležité, jakým směrem se pilařským výřezům (trámům) odklání vlákna. V případě, kdy se jedná o levosměrnou točitost na obvodu kulatiny, se výsledná točitost po opracování kulatiny a následném vysušení zvětšuje na více levotočivou točitost. Naopak pravosměrná točitost se se stejnými procesy opracování kulatiny zmenšuje. Přestože byl u některých 6 m výřezů kulatiny naměřen levosměrný odklon vláken do 5 cm/m, výsledná točitost opracovaných prvků dosahuje výraznější levosměrné odklony vláken, jenž významným způsobem ovlivňují kroucení pilařských výřezů (trámů) při vysychání. Na druhou stranu trámy, které byly nařezány z pravotočivé kulatiny s odklonem vláken do 5 cm/m, se po vysušení staly netočivými, díky tomu nedošlo při vysychání k znehodnocení kroucením. Tento fenomén byl v této práci potvrzen. Díky ověřeným závislostem by bylo možné metodu měření pomocí přístroje Fakopp 1D ArborSonic Microsecond Timer implementovat do třídících postupů při výběru kulatiny, minimálně pro specializované výrobky jako je konstrukční dřevo pro opravy památek, hudební nástroje atd. Celá práce byla doplněna přehledným grafickým a tabulkovým zpracováním, dále byla k práci vytvořena podrobná fotodokumentace jednotlivých kroků měření a měřeného materiálu.

Klíčová slova: Dřevo, smrk, kulatina, trám, točitost, kroucení.

Prediction of twisting structural elements during drying based on measured spiral grain of spruce logs

Summary

The diploma thesis deals with the prediction of twisting of sawn cuts (beams) based on measurements of spiral grain under the bark using the Fakopp device when the spruce trees are selecting. Dependencies on actual spiral grain measured on the round timber using a spiral grain detector and on the twisting of sawn timber after natural drying were created based on measurements by a device that utilizes the principle of sound wave propagation. Spiral grain for the experiment was measured on selected 22 trees of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), from which 39 pieces of 6 m logs were sawn, which were further divided into 22 pieces of 6 m logs from the lower part of the tree, 0–6 m in height, and 17 pieces of 6 m logs from the following height of the tree, 6–12 m. A total of 30 beams with a profile of 200×250 mm were cut from the 6 m logs using a band saw, including 19 beams from the height of 0–6 m and 11 beams from the height of 6–12 m.

The aim was to verify the hypothesis that the measurement using a device utilizing the principle of sound wave propagation can predict the actual spiral grain of sawn logs and timber structural elements. The results of the study show that it is possible to predict the relationship between the difference in sound wave propagation velocity and the deviation of wood grains in the creation of twisted timbers, with a high degree of probability. According to international sawmill practice, spiral grain up to 5 cm/m of sawn logs length is not considered as an error. However, it is crucial in which direction the spiral grain deviate in the sawn cuts (beams). In the case of left-handed spiral grain on the circumference of the log, the resulting spiral grain increases to a more left-handed spiral grain after processing and subsequent drying of the sawn cuts (beams). Conversely, right-handed spiral grain decreases with the same processes of processing the log. Although left-handed spiral grain up to 5 cm/m was measured in some 6 m logs, the resulting spiral grain of processed structural elements reaches significantly more left-handed spiral grain, which significantly affect the twisting of sawn cuts (beams) during drying. On the other hand, beams that were cut from right-handed logs with spiral grain up to 5 cm/m became untwisted after drying, avoiding devaluation caused by twisting during drying. This phenomenon was confirmed in this study. Thanks to the verified dependencies, the measurement method using the Fakopp 1D ArborSonic Microsecond Timer device could be implemented into sorting procedures for log selection, at least for specialized products such as structural timber for monument repairs, musical instruments, etc. The entire diploma thesis was complemented by clear graphical and tabular processing and detailed photo documentation of individual measurement steps and measured material.

Keywords: Wood, spruce, log, beam, spiral grain, twist.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Úvod..... | 10 |
| 2. Cíl práce..... | 11 |
| 3. Literární rešerše..... | 12 |
| 3.1 Definování točitosti vláken | 12 |
| 3.1.1 Směr točitosti vláken | 12 |
| 3.1.2 Úhel odklonu vláken | 13 |
| 3.1.3 Změny směru točitosti a odklonu vláken jehličnatých dřevin | 13 |
| 3.2 Vznik točitosti | 14 |
| 3.2.1 Vliv vnějšího prostředí na vznik točitosti | 15 |
| 3.3 Vliv odklonu vláken na vlastnosti a použití dřeva | 16 |
| 3.3.1 Konstrukční požadavky a vlastnosti točitého dřeva | 16 |
| 3.3.2 Mechanické vlastnosti točitého dřeva..... | 19 |
| 3.4 Měření točitosti vláken..... | 20 |
| 3.4.1 Detekce točitosti na stromech pozorováním | 20 |
| 3.4.2 Detekce točitosti ve dřevě..... | 20 |
| 3.4.3 Detekce točitosti pomocí přístrojových metod | 22 |
| 4. Materiál a metodika | 27 |
| 4.1 Materiál | 27 |
| 4.2 Metodika | 29 |
| 4.2.1 Měření točitosti na živých stromech | 29 |
| 4.2.2 Měření skutečné točitosti na 6 m výřezech kulatiny..... | 31 |
| 4.2.3 Měření skutečné točitosti a kroucení trámů | 33 |
| 4.2.4 Vyhodnocení naměřených dat | 35 |
| 5. Výsledky a diskuze | 36 |
| 5.1 Výsledky měření predikované točitosti na živých stromech..... | 36 |
| 5.2 Výsledky měření skutečné točitosti na 6 m výřezech kulatiny | 37 |
| 5.3 Výsledky měření skutečné točitosti na trámech..... | 39 |
| 5.3.1 Výsledky měření kroucení trámů..... | 40 |
| 5.4 Predikce točitosti a kroucení | 42 |
| 5.4.1 Predikce točitosti 6 m výřezů kulatiny na základě měření Fakoppem | 42 |
| 5.4.2 Predikce kroucení trámů | 44 |
| 6. Závěr..... | 49 |
| 7. Literární zdroje | 50 |
| 7.1 Odborné publikace | 50 |
| 7.2 Elektronické zdroje | 51 |

| | | |
|-----------|--------------------------|---------------|
| 7.3 | Legislativní zdroje..... | 57 |
| 8. | Přílohy..... | 58 (1) |

Seznam grafů

| | |
|--|----|
| Graf 5.1 – hodnoty měření přístrojem Fakopp 1D ArborSonic Microsecond Timer na stromech | 36 |
| Graf 5.2 – distribuce odklonu vláken 6 m výřezů kulatiny po výšce kmene (1–11) | 38 |
| Graf 5.3 – distribuce odklonu vláken 6 m výřezů kulatiny po výšce kmene (12–22) | 38 |
| Graf 5.4 – distribuce odklonu vláken trámů po výšce kmene (1–11) | 39 |
| Graf 5.5 – distribuce odklonu vláken trámů po výšce kmene (12–21) | 40 |
| Graf 5.6 – distribuce kroucení trámů (0–6 m) po výšce kmene (1–S až 21–S) | 41 |
| Graf 5.7 – distribuce kroucení trámů (6–12 m) po výšce kmene (1–V až 21–V) | 41 |
| Graf 5.8 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 0–6 m od paty stromu | 43 |
| Graf 5.9 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 0–12 m od paty stromu | 43 |
| Graf 5.10 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 6–12 m od paty stromu | 44 |
| Graf 5.11 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 0–6 m od paty stromu | 45 |
| Graf 5.12 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 6–12 m od paty stromu | 45 |
| Graf 5.13 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 0–12 m od paty stromu | 46 |
| Graf 5.14 – závislost točitosti z črtáku měřeno na kulatině 6 m délky vs kroucení trámů | 46 |
| Graf 5.15 – závislost točitosti z črtáku měřeno na trámu 6 m délky vs kroucení trámů | 47 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 3.1 – směry točitosti vláken (Kloiber a kol. 2021) | 12 |
| Obrázek 3.2 – odklon vláken v průběhu stáří stromu (Säll 2002) | 13 |
| Obrázek 3.3 – vliv větru na točitost stromů (asknature.org 2021) | 16 |
| Obrázek 3.4 – schéma rozměrů zkrouceného příčného profilu (Johansson a kol. 1994) | 17 |
| Obrázek 3.5 – způsoby borcení dřeva (Säll 2002) | 18 |
| Obrázek 4.1 – poloha smrkového porostu, odkud pocházejí výřezy smrkové kulatiny pro experimenty (mapy.cz) | 27 |
| Obrázek 4.2 – smrkový porost, kde byl proveden výběr stromů pro experimentální činnost | 27 |
| Obrázek 4.3 – 6 m výřezy smrkové kulatiny na manipulační skládce v lese | 28 |
| Obrázek 4.4 – uskladněné trámy při měření točitosti pomocí črtáku v areálu UCEEB ČVUT | 28 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 4.5 – uskladněné trámy při měření točitosti pomocí črtáku v areálu | |
| ÚTAM AV ČR..... | 28 |
| Obrázek 4.6 – šablona pro měření točitosti | 29 |
| Obrázek 4.7 – odsazení šablony od terénu | 29 |
| Obrázek 4.8 – levosměrná konfigurace osazení senzorů při měření točitosti na stromě | 30 |
| Obrázek 4.9 – číslování 6 m výřezů kulatiny | 31 |
| Obrázek 4.10 – lať pro značení osy kulatiny s vyznačeným délkovým úsekem 200 mm | 32 |
| Obrázek 4.11 – počáteční stav při měření točitosti na kulatině pomocí črtáku (zaražení hrotu črtáku do výchozího místa v ose kulatiny)..... | 32 |
| Obrázek 4.12 – tah črtákem ke spodní pomocné čáře | 32 |
| Obrázek 4.13 – schéma měření črtákem | 32 |
| Obrázek 4.14 – přichycení lajnovací šňůry označující osu trámu | 33 |
| Obrázek 4.15 – měření odklonu vláken ze vztahu výsušné trhliny a čáry označující osu trámu | 34 |
| Obrázek 4.16 – měření kroucení trámů svinovacím metrem | 34 |
| Obrázek 4.17 – schéma měření kroucení trámů | 34 |
| Obrázek 5.1 – extrémně levotočivý trám 21–S..... | 42 |
| Obrázek 5.2 – netočivý trám 14–S | 42 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 5.1 – přehled koeficientů determinace v závislosti na měření Fakoppem | 48 |
|---|----|

1. Úvod

Dřevo je materiál používaný lidstvem již po tisíciletí. Jeho využití pro konstrukční účely je záležitostí minulosti, současnosti i budoucnosti. V dnešní době se z dřeva staví v České republice více a více rodinných domů a je pouze otázka času, než se dřevo začne využívat ve větší míře i k výškovým stavbám. Z těchto důvodů bude důležité, aby se pro konstrukční účely používalo dřevo dobré kvality, tedy nejlépe dřevo s co možná nejméně suky a trhlinami. Za jednu z nejzásadnějších vad dřeva lze však považovat točitost, a právě tou se tato práce bude zabývat.

Točitost u stromů je od pradávna vnímána jako nežádoucí jev, při kterém dochází ke spirálovému odklonu vláken pravým nebo levým směrem od osy kmene. Tato přirozená vada dřeva se do jisté míry vyskytuje téměř u všech stromů. Již na první pohled ji můžeme identifikovat na boční straně obvodu kmene, kdy je průběh vláken spirálovitý. V přírodě se s točitostí můžeme setkat u starých stromů, ve kterých se objevují praskliny a spirálovitý průběh vláken je v tomto místě zdřejmý.

Už mnoho staletí je známo, že u smrku a našich dalších jehličnanech je dobré se vyhýbat levotočivému dřevu, ne vždy je však levotočivé dřevo vhodné pouze k nekonstrukčním účelům. Šindeláři si levotočivého dřeva velice cení, protože ho používají v místech, kde se mění střešní rovina (např. nároží, úžlabí atd.). Dále své využití točitého dřeva nachází v oblasti dýhárenství, ve kterém se z točitého dřeva vyrábí okrasné dýhy. Pro konstrukční účely je nejlepší takové dřevo, které je po vyschnutí rovnoleté. Pravotočivost na stromu nemusí nutně znamenat, že toto dřevo bude pro konstrukční účely nevhodné, v některých případech má tendenci se stát po vyschnutí rovnoletým.

Možnost třídit stromy v lese nebo třídit kulatinu před nařezáním na konstrukční prvky, z důvodu zamezení použití materiálu s velkým sklonem ke kroucení, by měla být pro dřevozpracující průmysl velmi důležitá. Točitá struktura dřeva může mít významný vliv na technické chování dřeva a zejména na jeho kroucení. Pro predikci točitosti dřeva na živých stojících stromech se v současné době dá použít přístroj, který funguje na principu přenosu zvukových vln. Metoda, jakou se měření provádí, se dá považovat za neinvazivní. Z tohoto důvodu je tento způsob měření velice vhodný, protože nedochází zásadním způsobem k narušení kůry a dřevo tak není poškozeno. Způsoby měření pomocí črtáku jsou spíše vhodné pro měření skutečné točitosti výřezů kulatiny a po nařezání i konstrukčních prvků. V práci jsou popsány vztahy mezi predikovanou a skutečnou točitostí kulatiny, konstrukčních prvků a jejich kroucení.

Motivací pro psaní této diplomové práce byla snaha o prokázání, že měření přístrojem využívajícím princip šíření zvukových vln je možné predikovat skutečnou točitost kulatiny a konstrukčních prvků. V České republice se točitost dřeva zatím příliš nezkoumala, což prohloubilo mou touhu se touto prací zabývat. Při prokázání určitých závislostí by bylo možné tuto metodu implementovat do třídících postupů při výběru kulatiny, která bude určena pro těžbu a zároveň i konstrukční účely.

2. Cíl práce

Cílem práce bude stanovit predikci kroucení konstrukčních prvků (trámů) při vysychání na základě měření točitosti pod kůrou smrkových stromů (pomocí přístroje Fakopp) a následně měřením točitosti kulatiny při manipulaci pomocí črtáku.

Dalšími cíli bude vyhledat archivní a literární zdroje týkající se tématu práce. Na vybraných smrkových stromech provést měření točitosti pomocí přístroje Fakopp ID ArborSonic Microsecond Timer. Po těžbě stromů měřit skutečnou točitost jednotlivých výřezů kulatiny pomocí črtáku. Po nařezání konstrukčních prvků (středových trámů) a přirozeném vysušení, měřit míru kroucení pilařských výřezů. Výsledky měření přehledně zpracovat do tabulkové a grafické podoby, včetně doplnění o vlastní fotodokumentaci. Na základě naměřených dat stanovit závislost točitosti pod kůrou stromu získanou z měření pomocí neinvazivního přístroje Fakopp a točitosti měřenou pomocí črtáku na odkorněné kulatině. Dále stanovit možnost predikce kroucení konstrukčních prvků na základě měřené točitosti stromů či kulatiny po těžbě.

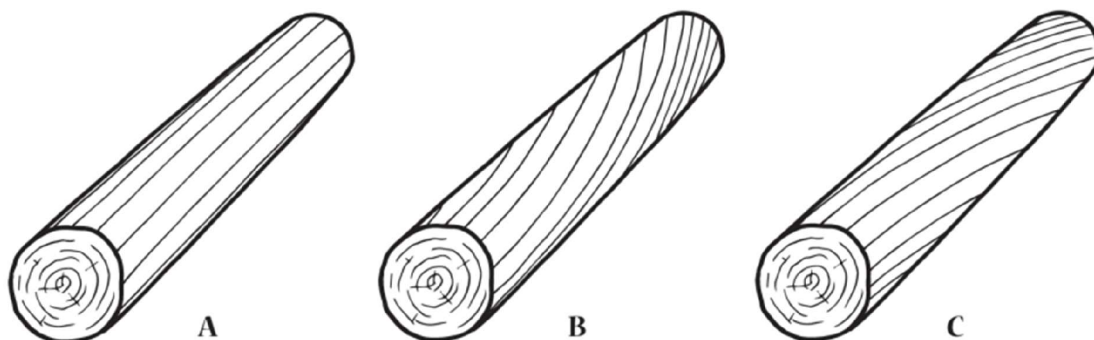
3. Literární rešerše

3.1 Definování točitosti vláken

Točitost vlákna daného průměru kmene lze definovat podle směru rotace a úhlu, který svírá s osou kmene (Harris 1989). Norma ČSN 48 0205 (1983) klasifikuje točitost jako závitové uložení dřevních vláken na povrchu kulatiny, oproti tomu norma ČSN EN 844 (2020) popisuje točitost jako spirálovitý průběh vláken okolo dřevě. Je to společná vlastnost jehličnanů i listnáčů (Mavrou 2007) a je považována za jednu z klíčových vlastností určujících vhodnost dřeva pro použití na konstrukční účely (Raymond 2002).

3.1.1 Směr točitosti vláken

Jestliže je průběh vláken rovnoběžný s osou kmene, jedná se o dřevo netočité (viz obr. 3.1A). V současné době se používá definice směru točitosti jako levotočivé (viz obr. 3.1B), pokud je odklon vláken od osy kmene vlevo z pohledu pozorovatele na zemi, a pravotočivé (viz. obr. 3.1C), pokud je odklon vláken vpravo od osy kmene. Ve stejném smyslu jsou popisovány i úhly odklonu vláken. Někteří autoři používají pro směr vláken také písmena S a Z, zejména pro označení orientace buněk v anatomických studiích, přičemž směr šikmého tahu v obou písmenech se používá pro označení levého, resp. pravého sklonu (Harris 1989).



Obrázek 3.1 – směry točitosti vláken (Kloiber a kol. 2021)

V minulosti od dob starověkého Řecka byly používány výrazy pro levotočitost jako *sinistorse*, *sinistral* a *sennotes*, oproti tomu pro pravotočitost se užívalo pojmenování *dextrorse*, *dextral*, *dextres*. V německé literatuře se používají výrazy "*sonnig*" a "*widersonnig*", jejichž význam je "se sluncem" a "proti slunci", a proto se (na severní polokouli) vztahují k levotočivému a pravotočivému směru vláken (Meyer 1949).

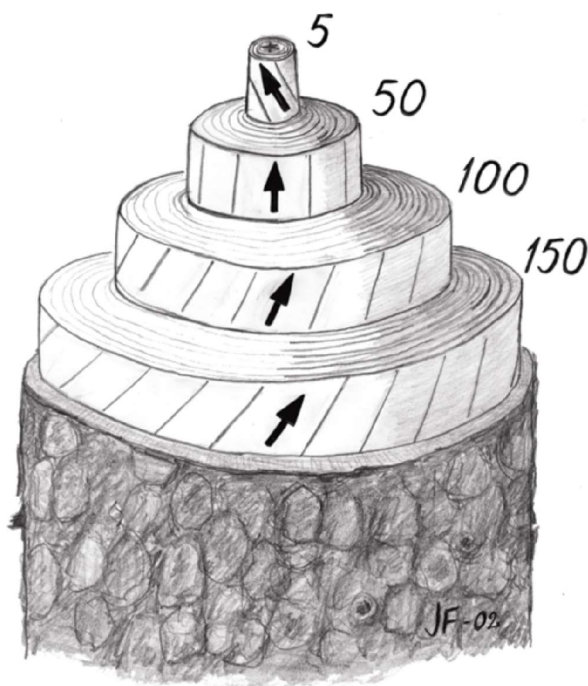
U starších jehličnatých stromů bývají trhliny ve většině případů pravotočivé. Úhel vláken je směřován pravotočivým způsobem a viditelné praskliny na stromech tvoří tzv. spirálu proti směru hodinových ručiček, pokud se díváme od spoda k vrcholu trhliny. U smrků je však úhel vláken blízko k jádru vždy levotočivý, což znamená, že vlákna se pohybují pod úhlem ve směru hodinových ručiček (Säll 2002).

3.1.2 Úhel odklonu vláken

Úhel odklonu vláken se obvykle určuje jako úhel, který svírá směr vláken od podélné osy kmene. Některé druhy dřevin mohou dosahovat extrémního odklonu vláken. U borovice dlouholisté (*Pinus roxburghii* Sarg.) pěstované v jejím přirozeném i v exotickém prostředí dosahoval úhel odklonu vláken směrem doleva téměř 90°. Tato extrémní hodnota byla naměřena v bazální části kmene (Harris 1989).

3.1.3 Změny směru točitosti a odklonu vláken jehličnatých dřevin

Změny směru točitosti vyplývají z výzkumu, ve kterém se měřila točitost na sloupech elektrického vedení. Sloupy, které vykazovaly levotočivá vlákna na svém povrchu měla tendenci k výraznému zhoršování levotočivosti. Sloupy s pravotočivým vláknem na povrchu byly stabilnější vůči dalšímu stáčení směrem doprava. Příčinou tohoto jevu je vnitřní struktura vláken. Sloupy s povrchovou levotočivostí obsahovaly levotočivé vlákno od oblasti jádra směrem ven k povrchu. Sloupy s povrchovou pravotočivostí obsahovaly levotočivé vlákno v oblasti jádra a pravotočivé vlákno na povrchu. Výsledkem pravotočivosti na povrchu jsou protichůdná a pouze malá zkroucení na povrchu sloupu (Wellner, Lowery 1967). Strom, který má jeden směr odkloněných vláken od svého středu až po povrch, se bude po vyschnutí hodně kroutit. Pravotočivé růstové vrstvy v blízkosti vnější strany kmene jsou nápomocny k vyrovnání napětí při kroucení levotočivé růstové vrstvy, které se nachází prakticky uvnitř všech kmenů. Stromy s levotočivostí jsou problematické, protože nemají pravotočivé vnitřní vrstvy, které by pomáhaly udržovat jejich napětí v rovnováze (Chambers 2007). U smrku ztepilého je úhel odklonu vláken obvykle největší mezi 4. a 10. letokruhem směrem od jádra. Následně se úhel vláken ve většině případů zmenšuje a smrk se obvykle narovná mezi 40. a 70. letokruhem. Později vzniklé letokruhy jsou postupně více a více pravotočivé (viz obr. 3.2) (Säll 2002).



Obrázek 3.2 – odklon vláken v průběhu stáří stromu (Säll 2002)

Iniciace spirality v primárním xylému a prvopočátečním sekundárním xylému byla často naznačována používáním výrazů jako "vysoká počáteční spirality" apod. nebo zkroucením růstu v dominantním stonku (Northcott 1957). Ve skutečnosti Jablanczy (1969) popsal téměř 45° zkroucení v hypokotylu semenáčku smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) H. Karst.), toto je zřejmě nejdrsnější způsob točitosti, který si lze představit.

V prvním roce růstu jehličnatých stromů, dle mnoha výzkumů, byla vlákna rovná. Bylo tomu tak i v případě výzkumu (*Pinus roxburghii* Sarg.), točitost se začala objevovat během druhého až třetího roku růstu stromu. Změna točitosti z levotočivého počátečního období růstu stromu na pravotočivý je variabilní jak mezidruhově, tak i v rámci jednoho druhu (Harris 1989). U jehličnatých stromů je možné vypořádat levotočivost v horní části kmene, i když střední či základní část kmene má rovná vlákna. Tento jev je způsoben nerovnoměrným stářím stromu, kdy u pařezu může mít strom 70 letokruhů a v horní části kmene pouze 35 letokruhů. Horní část je tedy o polovinu mladší než část u pařezu a levotočitá vlákna se ještě nemusela přeorientovat na pravotočitá (Chambers 2007).

Existují výjimky, ve kterých se v počáteční fázi růstu objevuje pravotočivost a postupem času se mění na levotočivost, mezi tyto druhy patří některé japonské druhy borovic, např. borovice korejská (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.), borovice drobnokvětá (*Pinus parviflora* Negishi) a borovice zakrslá (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), dále pak např. nohoplod velkolistý (*Podocarpus macrophylla* (Thunb.) Sweet) a kryptomérie japonská (*Cryptomeria japonica* D. Don). Výsledky měření vedly k domněnce, že stromy s počáteční pravotočivostí se vyskytují častěji na jižní polokouli než na severní (Ohkura 1958; Smith, Smart 1972). Tato domněnka se vyvrátila díky tomu, že stromy pěstované běžně na severní polokouli, které se vysadily na polokouli jižní, svou počáteční levotočivost nezměnily. Neexistuje tedy žádné biologické opodstatnění, že výsadba stejných stromů pod nebo nad rovníkem má vliv na počáteční levotočivost či pravotočivost (Harris 1989).

Nařezaná kulatina se při vysychání kroutí více, než když je ve formě živého stromu. Pokud měl živý strom odklon vláken 10° nalevo od osy kmene, bude mít nařezaná kulatina po vyschnutí odklon vláken více než 10°. Stejně pravidlo platí i pro pravotočivé stromy, ty se však nekrotí tolik jako levotočivé (Chambers 2007). U 290 sloupů elektrického vedení byl proveden výzkum, kdy se opracované sloupy nechaly sušit po dobu 5 let. Levotočivé sloupy měly změnu odklonu vláken po vysušení až o 40°, kdežto pravotočivé sloupy pouze o 15° (Wellner, Lowery 1967; Lowery, Erickson 1967).

U smrku ztepilého v porostech pěstovaných na úrodných stanovištích v Dánsku bylo zjištěno, že změny úhlu vláken byly větší u rychle rostoucích stromů než u stromů rostoucích pomaleji (Danborg 1994). Podobně tomu bylo i u smrku sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) (Brazier 1967). V jiných výzkumech na smrku ztepilém však nebyla zjištěna žádná korelace mezi šířkou letokruhů a točitostí vláken (Krempl 1970; Bues 1990). Tvorba točitosti vláken je pod značnou genetickou kontrolou, zatímco její projevy lze měnit lesnickými metodami, které ovlivňují rychlost růstu, jedná se zejména o prořezávky porostu. Při větších prořezávkách porostu se odklon vláken zvyšuje (Pape 1999).

3.2 Vznik točitosti

Studium struktury a funkce živých buněk a činnosti protoplazmy vedlo k závěru, že točitost je základní jev v celé rostlinné říši (Harris 1989). Schmucker (1924) vytvořil přehled pravotočivých a levotočivých tendencí u rostlin, od bakterií a prvoků, až po pteridofyty a spermatofyty.

Tvorba točitých vláken je řízena geneticky, ale podílejí se na ní i faktory prostředí (Pyszyński 1977, Mattheck 1991, Eklund, Säll 2000). Většina údajů naznačuje, že geneticky řízené točité vlákno je lokalizováno v kambiu a že tvorba točitého vlákna může být spojena s buněčným dělením probíhajícím v této oblasti (Harris 1989), zároveň může být regulována i rostlinnými hormony (Zagórska-Marek, Little 1986).

Předpokládá se, že existují tři procesy buněčného dělení, které způsobují vznik točitosti (Hejnowicz, Zagórska-Marek 1974). Změna úhlu točitého vlákna souvisí s frekvencí pseudo transverálního dělení vertikálně orientovaných kambialních buněk (Hejnowicz 1980). Samotný intruzivní růst buněk bez pseudotransverálního dělení znamená, že špičaté konce prodlužujících se kambialních derivátů kloužou jeden přes druhý, čímž se mění jejich relativní orientace. Oba konce buňky se pohybují v opačných směrech, což vede k mírné rotaci buňky. To má za následek změnu úhlu vlákna v buňce od osy kmene (Säll 2002). Třetím předpokládaným procesem je nedokonalé periklinální dělení a diferenciací buněk, která toto dělení doprovází (Savidge, Farrar 1984). Neúplné dělení znamená, že se částečně a nově vytvořené buněčné stěny nerozšiřují z jednoho konce buňky na druhý. Zatím však neexistuje žádný důkaz, že by některá z těchto tří teorií byla pravděpodobnější nebo nepravděpodobnější než ostatní (Säll 2002).

V kambiovém dřevě s rostoucí točitostí se úhel sklonu buněk k ose kmene s časem zvětšuje. Pseudopříčné antiklinální dělení a intruzivní růst mezi radiálními buněčnými stěnami nevysvětlují poměrně velkou rychlost změny úhlu odklonu vláken. Analýza kambia borovice lesní naznačuje, že velká rychlost změny úhlu je způsobena orientovaným intruzivním růstem iniciálních buněk v určitých souborech, které vstupují do prostoru mezi tangenciálními buněčnými stěnami sousedních souborů. Intruzivní růst konců iniciálních buněk je způsoben vychýlením konců sousedních iniciálních buněk v radiálním směru. Periklinální dělicí rovina nedosahuje vychýleného konce, a tak vznikají dvě nestejně velké derivace, z nichž kratší zůstává iniciální buňkou, zatímco delší se stává xylémovou nebo floémovou mateřskou buňkou. Pokud jsou tyto události intenzivní, způsobují rychlou změnu sklonu buněk podél osy kmene. Taková rychlá změna může probíhat i bez šikmého antiklinálního dělení (Włoch a kol. 2002).

Aby se strom přizpůsobil zvětšujícímu se průměru, musí se kambialní zóna zvětšovat po obvodu, čehož se dosahuje periodickým tangenciálním dělením kambialních buněk. V tomto případě je nová buněčná stěna šikmá a následné prodloužení každé poloviny buňky vede k překrývání buněk, často pod malým úhlem ke svislé ose, což vede ke vzniku spirálovitých vláken ve dřevě. Rychlost tangenciálního dělení kambia má výrazný vliv na průměrnou délku buňky vyrobeného dřeva (Dinwoodie 2000).

U borovice paprscité se levotočivé stáčení vláken přítomné v raných letokruzích, v později utvářených porostech, důsledně narovnává a může se vyvinout v pravotočivé stáčení vláken (Chattaway 1959; Cown a kol. 1991; Moore a kol. 2015). Míra, do jaké se tento vzor vyvíjí, je částečně geneticky dědičná (Nicholls a kol. 1964; Burdon, Low 1992; Gapare a kol. 2007). Podobný efekt dědičnosti byl prokázán i u dalších nahosemenných rostlin, včetně borovice vejmutovky (Zobel a kol. 1968), smrku ztepilého (Costa e Silva a kol. 2000) a smrku sitka (Hansen, Roulund 1997). Protože se jedná o určitý stupeň dědičnosti, musí existovat genetické faktory, které ovlivňují vývoj točitých vláken. Geny zodpovědné za vývoj a modulaci točitých vláken a mechanismy, kterými mohou působit, však dosud nebyly identifikovány (Thomas a kol. 2022).

3.2.1 Vliv vnějšího prostředí na vznik točitosti

Od nejstarších dob se předpokládalo, že faktory prostředí mohou buď vyvolat točitost, nebo ovlivnit její vývoj. Stromy s točitým vláknem zkroucené severním větrem jsou nevhodné

ke kácení (Meyer 1949). V různých dobách byly vítr, slunce, půda, expozice, nadmořská výška a mnoho dalších vlastností považovány za faktory zodpovědné za zkroucení stromů. Většina vlastností prostředí bude po celý život stromu působit účinně jedním směrem. Je zřejmé, že nemohou být odpovědné za všechny typy točitosti, zejména ne za měnící se směry točitosti v průběhu let. Na druhou stranu, jakýkoli element schopný modifikovat růst a vývoj stromu může být schopen ovlivnit intenzitu točitých vláken v něm, ať už je jeho původ jakýkoli. Mnoho environmentálních rysů spolu nevyhnutelně souvisí. Vítr, expozice a nadmořská výška stromu mohou být do jisté míry vzájemně závislé faktory ovlivňující točitost vláken (Harris 1989).

V porovnání s rovně rostoucími kmeny se točitě rostoucí kmeny a větve při silném větru více ohýbají a krotí, takže kladou menší odpor větru a je méně pravděpodobné, že se zlomí (viz obr. 3.3). Díky ohýbání a kroucení sníh z větví spíše sklouzává, než aby se pod tíhou sněhu lámaly větve (Kubler 1991).



Obrázek 3.3 – vliv větru na točitost stromů (asknature.org 2021)

Z nevysvětlitelných důvodů začíná mnoho stromů růst spirálovitě pod vlivem silného tlaku větru a sněhu, se kterým se často setkáváme v horách nebo v subarktických oblastech. Za těchto okolností se mohou vlákna dřeva odchýlit až o 30° od svislého směru růstu. Protože tento spirálovitý růst poskytuje rostlině lepší ochranu před mechanickým poškozením, lze jej považovat za určitý druh obranné reakce (Tributsch 1982).

Rovně rostoucí stromy mají zachován symetrický vzor vláken, který byl v blízkosti jádra slabě pravotočivý, ale během prvních osmi měsíců růstu se postupně stával více levotočivým. U nakloněných stromů byl však vývoj levotočivého vlákna potlačen tvorbou tlakového dřeva na spodní straně stromu, zatímco dřevo v horní části stromu vyvíjelo stále více levotočivé vlákno. Existuje dosud neznámá souvislost mezi tvorbou tlakového dřeva a inhibicí vývoje točitých vláken (Thomas a kol. 2022). Borovice paprscitá obvykle vykazuje počáteční vývoj levotočivého vlákna v pravidelném vzoru kolem kmene. U nakloněných stromů je v dolní polovině tvořeno tlakové dřevo a organizace pryskyřičných kanálků kolem jádra je asymetrická. V oblasti tlakového dřeva bylo méně pryskyřičných kanálků a ty se zdály být mnohem rovnější než zkroucené kanálky, které se vyskytovaly jinde. U pryskyřičných kanálků mimo oblast tlakového dřeva byly vykazovány podobné vlastnosti jako u kanálků ve svisle rostoucích stromech (Thomas, Collings 2017).

3.3 Vliv odklonu vláken na vlastnosti a použití dřeva

3.3.1 Konstrukční požadavky a vlastnosti točitého dřeva

Kulatina se spirálovitou strukturou nemá sama o sobě abnormální smršťovací vlastnosti, ale pokud je následně nařezána na konstrukční prvky, dochází po vysušení k abnormálnímu

tangenciálnímu smršťování (Harris 1965). Odklony vláken okolo větví nebo suků se vyvíjejí ve směru vláken a je tak zvyšována maximální odchylka ve stejném směru (Harris 1989). Typ deformace vznikající v důsledku točitého uspořádání vláken se nazývá rotace. Rotace vzniká jako natočení rovinného povrchu po délce konstrukčního trámu. Zkoumáním orientace letokruhů lze do jisté míry předpovědět, jak se dřevo při sušení smrští a pokrotí (Kollmann, Côté 1968).

Pokud by úhel odklonu byl v celém kmeni konstantní, měly by letokruhy tendenci se stáčet úměrně své vzdálenosti od jádra. Tím by bylo vyvoláno vnitřní torzní napětí. Kdyby se úhel odklonu vláken v celém průměru měnil jen nepatrně, platilo by tvrzení, že čím větší je průměr kmene, tím menší je jeho tendence ke kroucení během sušení. Ploché řezivo ze stromů s velkým průměrem by se při sušení kroutilo méně než úzká prkna řezaná z menších stromů (Stevens, Johnston 1960).

Kroucení řeziva (viz obr. 3.5a) je v největší míře závislé na vlhkosti dřeva a točitosti (Danborg 1994; Kliger, Säll 2000; Johansson a kol. 2001). Při řezání dřeva se řez více či méně odchyluje od směru vláken. Tato odchylka je způsobena točitými vlákny, tvarem kmene a suky. Důležitá je velikost úhlu odklonu, jeho směr a způsob, jakým se tento směr mění (Lowery, Erickson 1967; Kollmann, Côté 1968; Johansson 2002). Použitím vhodných rozměrů řeziva a správných metod sušení lze do jisté míry zabránit kroucení.

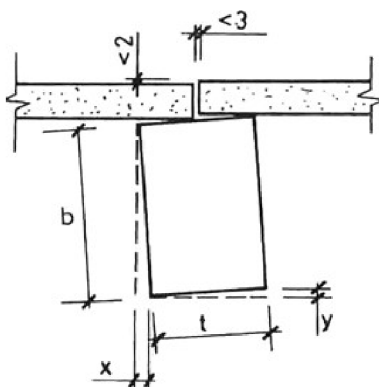
Rovnice přípustného kroucení konstrukčních prvků (3.1):

$$\frac{x}{b} = \frac{y}{t} < \frac{2}{\frac{t}{2} + 3} \quad (3.1)$$

Podle obr. 3.4 by mělo být kroucení omezeno podle rovnice (3.2), která pro $t = 45 \text{ mm}$ udává $x/b = 8,3 \%$ a pro $t = 38 \text{ mm}$ odpovídá $x/b = 9,8 \%$.

$$\frac{x}{b} < \frac{4}{t + 3} \quad (3.2)$$

Mezní limity pro absolutní hodnoty kladou velké nároky na schopnost dřevěných výrobků udržet si přijatelný tvar po vysušení (Johansson a kol. 1994).

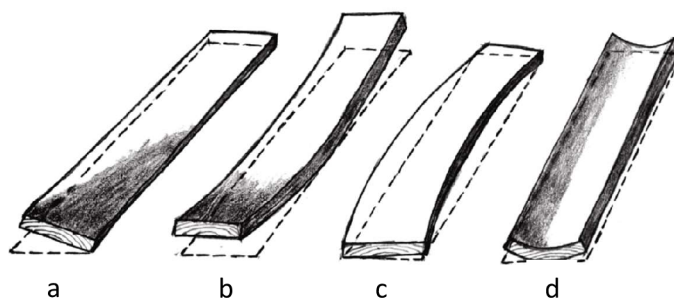


Obrázek 3.4 – schéma rozměrů zkrouceného příčného profilu (Johansson a kol. 1994)

Další tvarové deformace, jako je ohyb v podélném směru (viz obr. 3.5b) a ohyb boční plochy (viz obr. 3.5c), jsou způsobeny především rozdíly ve vlastnostech spojenými se sesycháním od jádra ke kůře. Nepřímo jsou tyto deformace ovlivňovány tlakovým dřevem, podílem jádrového dřeva a rozdílnou šířkou letokruhů (Kollmann, Côté 1968, Thörnqvist 1990). Ohyb v příčném směru (viz obr. 3.5d) je způsoben sesycháním a liší se v závislosti na tangenciálním či radiálním směru, orientaci letokruhů a poloměru křivky letokruhu v příčném řezu konstrukčního řeziva (Kollmann, Côté 1968).

Typ porostu, ať už rychle nebo pomalurostoucí porost, nemá statisticky významný vliv na deformace ve tvaru ohybu (viz obr. 3.5b, c), nejvíce se prohýbají prvky vyřezané blízko jádra a zároveň z rychlerostoucího porostu. Při cyklickém sušení ($w = 15,6-7,2-14,4-7,8$ %) byla stanovena závislost mezi změnami vlhkosti a změnou deformace na ohyb jako pravděpodobně lineární ($R^2 = 0,73-0,76$). Pokud se vysušené prvky vrátí na svou původní vlhkost, vrátí se do určité míry i jejich původní tvar (Kliger a kol. 2003). To samé platí i pro deformaci kroucení. Druhá nejvýznamější závislost pro kroucení je vztah mezi odklonem vláken a vznikem kroucení. Vzájemná korelace tohoto vztahu se pohybovala v rozmezí $R^2 = 0,24-0,26$. Ve výzkumu tohoto vztahu však byly použity i vzorky jen 200 mm dlouhé, což může značně zkreslovat výsledné hodnoty pro větší prvky (Johansson a kol. 2001).

Výše zmíněné tvarové deformace jsou v různé míře ovlivněny změnami vlhkosti dřeva. Pokud je vlhkost vyšší než bod nasycení vláken (u smrku přibližně 28 %), nedochází ke smršťování buněčných stěn, a tím ani k deformaci (Kollmann, Côté 1968). Kroucení se zvyšuje úměrně poklesu obsahu vlhkosti při vysychání dřeva. Tvarové vady, jako je oblouk naproti tomu vznikají při řezání i při sušení (Säll 2002).



Obrázek 3.5 – způsoby borcení dřeva (Säll 2002)

Tendence řezaného smrku ke kroucení je silně spojena s úhlem vláken pod kůrou i se změnami úhlu vlákna v radiálním směru. Zkroucení dřeva řezaného z kmene s úhlem odklonu vláken pod kůrou 10° a průměrem 120 mm je větší než u kmene se stejným úhlem odklonu vlákna a průměrem 250 mm (Kliger, Säll 2000). Stromy nevhodné jako konstrukční dřevo se v daném porostu vyskytují ve větší či menší míře v různých průměrových třídách. Dřevo, které je řezáno blízko jádra a z tenkých kmenů, menších než 180 mm, má tendence ke kroucení v závislosti na vzdálenosti od jádra (Johansson a kol. 2001; Kliger, Säll 2000). Jádrové dřevo a jeho vlastnosti mají negativní vliv na kvalitu řeziva z několika hledisek (Thörnqvist 1990).

Konstrukční řezivo produkované z levotočivých sromů je pro většinu uživatelů příliš nekvalitní (Lowery, Erickson 1967; Kollmann, Côté 1968; Kliger, Säll 2000; Johansson 2002). Při stavbě roubených domů se řemeslníci vyhýbali levotočivým kmenům, zatímco použití kmenů s pravotočivou rotací se nepovažovalo za škodlivé pro stavební účely (Säll 2002). Použitím levotočivých klád ve srubových konstrukcích je vyvoláno značné vytvoření mezer v rohových průřezích a dále je nad těmito kládami nadzvedáván konstrukční materiál. Pro srubové stavby lze levotočivé stromy použít jako sloupky a nízko uložené prvky ve srubových

stěnách. Pravotočivé stromy lze použít kdekoli ve stěně srubu kromě horní části (Chambers 2007).

Zejména u materiálu z kulatiny o malém průměru dochází k nadměrnému kroucení. Pomocí nové techniky řezání lze minimalizovat problém kroucení materiálu z kmenů o malém průměru. Téměř všechny konstrukční hranolky (50×100 mm) řezané z kulatiny malého průměru se krotí ve stejném levotočivém směru. Otáčením kmenů během řezání je možné vyrobit hranolky s malým pravotočivým předkroucením. V důsledku sušení se hranolky normálně zkrotí, ale díky pravotočivému předkroucení se po vysušení narovnejí (Kliger a kol. 2006).

Počet rovnovlákněných kulatin po vysušení lze snadno zvýšit tím, že se vyhneme kácení kmenů s velkým levotočivým vláknem měřeným pod kůrou. Pro pilařský průmysl by měla být velmi zajímavá možnost vyřazovat kmeny s ohledem na jejich příliš velkou točitost, aby se zlepšila rovinnost řeziva v provozu při požadované nízké vlhkosti. Střední oblast kolem jádra, přibližně 50×50 mm, by se obecně neměla zpracovávat na řezivo pro stavebnictví, a to z důvodu velmi vysokého procenta zmetkovitosti kulatiny řezané z této oblasti (Kliger 2001).

V České republice se podle mezinárodní praxe točitost do 5 cm na 1 m délky nepovažuje za chybu např. podle EN 1310 (1997). Kulatina, ideální pro konstrukční účely má na povrchu mírnou pravotočivost vláken (do 5 cm na 1 m délky kmene). Při řezání s minimálním úběrem je zapotřebí vybrat kulatinu s menší pravotočivostí na povrchu (do 3 cm na 1 m délky kmene). Po vyschnutí se dřevo stává netočitým a pro konstrukční účely je pak ideální. Pokud je potřeba vytvořit obdelníkový či pětiboký profil, u kterého je větší úběr při řezání, je možné použít kulatinu s větší pravotočivostí (od 2 do 5 cm na 1 m délky kmene) (Kloiber a kol. 2021).

3.3.2 Mechanické vlastnosti točitého dřeva

Modul pružnosti roste se zvyšující se vzdáleností od jádra. Vztahy mezi vlastnostmi materiálu, směrem vláken a geometrickými údaji a deformačními, tuhostními a pevnostními vlastnostmi latí lze využít při třídění dřeva. V závislosti na předpokládaných vlastnostech lze třídit latě do různých jakostních tříd (Dahlblom a kol. 2000). Modulem pružnosti je dána tuhost kulatiny, která je nižší u levotočivé než u pravotočivé kulatiny. Levotočivé stromy se při stejném zatížení ohnou více než stromy pravotočivé (Chambers 2007).

Silně levotočivé konstrukční prvky mají nižší pevnost v ohybu a krotí se více než silně pravotočivé konstrukční prvky. Středně pravotočivé prvky se sklonem 1:12 (4,77°) nebo menším, mají zanedbatelný vliv na pevnost v ohybu. Pravotočivé prvky s odklonem vláken větším než 1:8 (7,17°) mohou mít 75 % pevnosti v ohybu rovně rostlých prvků. Levotočivé prvky s odklonem vláken 1:12 (4,77°) až 1:8 (7,17°) nemusí mít větší pevnost než 50 až 60 % ve srovnání s rovně rostlými prvky (Lowery, Erickson 1967).

Při odklonu vláken mezi 5° a 10° dochází ke ztrátě pevnosti v tahu, ohybu a tlaku o 10 % (Kollmann, Côté 1968). Rázová pevnost je obzvláště citlivá na odklon vláken a bylo navrženo, aby odklon vláken nepřesahoval 2° (Harris 1989). Pevnost v tahu a pevnost v ohybu dřeva, u něhož je odklon vláken 15°, se snižuje o 40 %, resp. 50 % ve srovnání se dřevem s rovnými vlákny (Dinwoodie 2000). Úhel mikrofibril v buněčných stěnách je u jádrového dřeva také větší, což rovněž negativně ovlivňuje tahové vlastnosti. To vede k tomu, že i mírný úhel vláken v jádrovém dřevě (3° až 5°), spolu s vysokým úhlem mikrofibril snižuje pevnost v ohybu a pevnost v tahu o více než 50 % ve srovnání se zralým dřevem s vlákny bez odklonu (Dinwoodie 2000). Pevnost dřeva v tahu je negativně ovlivňována odklonem vláken více než pevnost v ohybu (Säll 2002).

Ve výzkumu točivého momentu měřeného na 12 prvcích bylo zjištěno, že sušení za vysokých teplot má významný vliv na rychlost vzniku točivého momentu. Nárůst točivého momentu dosahoval 50 % již během prvního týdne sušení. Při výzkumu byla naměřena točitost prvků v rozmezí 3,4° až 11,6° (Bäckström a kol. 2004).

3.4 Měření točitosti vláken

3.4.1 Detekce točitosti na stromech pozorováním

Pravidelná točitá vlákna se vyskytují spíše u mladých stromů rostoucích na plantážích než u starších stromů v přirozených porostech, i když i u starých stromů by se pozorování povrchových úhlů odklonu vláken mohlo ukázat jako užitečné v závislosti na růstových vlastnostech jednotlivých druhů. Točitá vlákna na kulatině a odumřelých stromech bez kůry se obvykle nejprve projeví vznikem trhlin při vysychání. Užitečnými indikátory mohou být i další znaky, např. velké dřeňové paprsky, cévy a pryskyřičné kanálky. U stojících stromů mohou o uspořádání dřevních vláken svědčit i trhliny po poškození větrem, mrazem a bleskem (Harris 1989).

Zkroucené větve jsou charakteristickým znakem stromů s oběma směry točitosti, ačkoli i tento znak je výraznější u stromů s levotočivostí než u stromů s pravotočivostí. Dalším indikátorem točitosti na povrchu kulatiny je kůra některých druhů dřevin. U smrku ztepilého je tento způsob detekce obvykle obtížný a velmi nespolehlivý. Problematická je orientace kůrových prvků pocházejících z floému, která poskytuje zrcadlový obraz orientace v xylému (Harris 1989).

3.4.2 Detekce točitosti ve dřevě

3.4.2.1 Scribe test (detekce točitosti pomocí črtáku – metoda rýhování)

Nejčastěji používaná metoda k detekci točitosti stromů, řeziva, kulatiny a dýh je metoda pomocí črtáku. Tato metoda spočívá v zatlačení ostrého hrotu do povrchu dřeva, kdy po jeho tažení podél vlákna je skutečný směr vlákna označen rýhou (Harris 1989). Črták se skládá z ocelové tyče, která má na jednom konci volně otočnou dřevěnou rukojeť a na druhém konci vyčnívá ocelový trn (Koehler 1955). Črták byl různě modifikován ve snaze učinit ho méně subjektivním při použití. Byla snaha zajistit, aby tah črtákem co nejpřesněji kopíroval směr vláken a zároveň byl kontrolován tlak při vkládání. I zjednodušená verze črtáku však poskytuje uspokojivé výsledky měření. Črták může být používán s velkou přesností, pokud jsou pochopena jeho omezení a jsou přijata vhodná opatření. Je potřeba se vyhnout měření v přechodu jarního a letního dřeva, protože tah črtákem může být odkloněn přes měkčí jarní dřevo. Při všech aplikacích je výhodné provést první pokus, aby bylo možné trn vytáhnout co nejbližší ke skutečnému směru vláken. Poté je vhodné udělat tři nebo čtyři značky, aby bylo zajištěno, že vlákna probíhají rovnoběžně v celé měřené oblasti (Harris 1989).

Kliger (2001) popsal ve svém článku způsoby měření odklonu vláken na živém stromu, na pokáceném stromu a na konstrukčním řezivu. Měření na živém stromu bylo popsáno takto: Na severní a jižní straně stromu byla odkorněna malá plocha bez suků (cca 100×150 mm) v prsní výšce. V každé ploše byly vyryty tři rýhy, aby bylo možné získat opakované výsledky. Pomocí vodováhy (600 mm) byla nalezena svislá čára vůči kmeni stromu k bodu spodního konce vyryté rýhy. Následně byla změřena horizontální vzdálenost od svislé čáry k hornímu konci vyryté rýhy. Měření bylo provedeno na délce 100 mm. Kladný odklon vláken byl definován vlevo a záporný vpravo od svislé čáry. Měření odklonu vlákna na opačné straně kmene stromu nebyl zohledněn vliv úhlu naklonění stromu.

Při měření na pokáceném stromu byla využita tato metoda: Kmen byl položen severní stranou nahoru a někde uprostřed kmene a na dvou protilehlých stranách kmene (západo-východní a bezsuková oblast) byla odkorněna malá plocha (100×150 mm). Dále byly nataženy 2 provázky procházející jádrem na obou koncích kmene. Provázky byly přichyceny hřebíky a poté byly nataženy po východní a západní straně kmene. Na každé odkorněné ploše byly vyryty tři čáry. Provázek procházel spodním koncem tažené rýhy a následně byla změřena svislá vzdálenost od horního konce tažené čáry k provázku. Kladná orientace odklonu vláken byla definována nad provázkem a záporná pod provázkem. Odklon vláken byl vypočten jako průměrná hodnota dvou měření (Kliger 2001).

3.4.2.2 Jiné testové metody dle Harrise (1989)

- **Barevný test** – Zabarvení vláken lze dosáhnout uměle pomocí barviv, např. safraninu v alkoholu nebo jakéhokoli inkoustu (ne však černého kreslicího inkoustu). Barevný roztok nanesený jako příčná čára vedená přes tangenciální povrch dřeva se rychle šíří nahoru a dolů po vlákních, čímž vzniká řada jemných čar ve směru vláken.
- **Inkoustový test** – V inkoustovém testu jsou barviva vstříknuta pomocí injekce do bělí za účelem detekce odklonu vláken v stojících stromech. Sklon vlákna na povrchu dřeva lze zjistit z malých okének vyříznutých v kůře nad místem vpichu. Posouzení pohybu barviva v bělí vyžaduje pokácení a rozřezání stromu.
- **Radioaktivní indikátory** – Radioaktivní indikační prvky ⁴²K byly použity k tomu, aby bylo možné zjišťovat odklony vláken bez odstranění kůry. Radioaktivní stopovací látka se vstříkuje těsně pod kambium a je vedena stoupající mizou ve směru vlákna. Přítomnost stopovacího prvku (cca. 1 metr nad místem vpichu) se zjistí přiložením fotografického filmu na kůru a úhel vlákna na povrchu dřeva lze změřit s přesností 1° nebo 2°.
- **Vytažení vláken** – Zkouška vytažením spočívá v tahání za malý svazek vláken, aby se podél vláken vytvořila oddělovací rýha. V hrubém řezu lze uvolnit povrchové třísky jemným dlátem nebo ostrým šroubovákem. Pro výzkumné účely lze použít jemnou pinzetu a vzorky dřeva s vlhkostí vyšší, než je bod nasycení vláken. Při této metodě lze dosáhnout značné přesnosti odstraněním pouhých 30 vláken. Tato technika je preferována pro měření malých vzorků, které mohou být odebrány nedestruktivně ze stojících stromů.
- **Štípání špalků (kotoučů)** – Při štípání špalků je zakreslován směr křivky podélného odklonu vláken rozštípnutého špalku (Harris 1989). Z každého stromu jsou vyříznuty dva kotouče o tloušťce 100–150 mm ve výšce přibližně 4 a 10 m. Kotouče jsou následně vysušeny na 12 % vlhkosti a poté jsou rozděleny na poloviny pomocí hydraulicky poháněného tupého nože ve směru sever-jih. Úhel odklonu vláken je měřen na rozděleném povrchu v intervalech pěti letokruhů od jádra ke kůře. Každé měření je provedeno na protilehlých poloměrech každého letokruhu a je vypočten průměr, aby se vyloučily chyby vzniklé při příčném řezu a přípravě vzorku (Brazier 1965; Mavrou 2007; Fonweban a kol. 2013).

3.4.3 Detekce točitosti pomocí přístrojových metod

3.4.3.1 Metoda šíření elastických vln

Metoda funguje na principu průchodu elastické vlny dřevem. Nejčastěji zjišťovanými parametry jsou rychlost šíření vlnění nebo čas průchodu, popřípadě frekvenční spektrum a útlum. Tato neinvazivní metoda detekce je používána pro identifikaci zhoršených vlastností konstrukčních prvků, odhalování vnitřních dutin a odvození mechanických vlastností (např. korelace s mezí pevnosti, výpočet dynamického modulu pružnosti aj.).

Ultrazvukové vlny mají frekvenci v neslyšitelné oblasti, oproti tomu zvukové vlny, které se nachází v slyšitelné oblasti, mají frekvenci pod 20 000 Hz. Vlny se šíří pomocí kmitavého pohybu hmotných částic skrze elastický materiál. Druh vlnění je určen směrem pohybu vlny, směr vlny se vztahuje ke směru pohybu volných částic. Pro neinvazivní testování je obvyklým tvarem podélná postupná vlna, kdy hmotné částice se pohybují ve stejném směru jako vlny. Základními vlastnostmi vln jsou vlnová délka (potřebná vzdálenost k dokončení jednoho cyklu) a frekvence (počet kmitů za daný čas). Vztah vlnové délky, rychlosti vlny a frekvence je dán (3.3):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.3)$$

λ ... vlnová délka [m]

v ... rychlost šíření vln [m.s⁻¹]

f ... frekvence [Hz] = [s⁻¹]

Hlavním parametrem pro neinvazivní hodnocení je rychlost šíření vln. Rychlost je dána vztahem (3.4):

$$v = \frac{l}{t} \quad (3.4)$$

v ... rychlost šíření vln [m.s⁻¹]

l ... vzdálenost mezi dvěma body, jimiž vlna prochází [m]

t ... čas šíření vln [s] (Kloiber, Drdácký 2015)

Vlnová délka sehrává klíčovou roli při detekci poškození. Platí obecné pravidlo, že nelze detekovat vady menší, než je jedna polovina vlnové délky vyvolaného signálu. Ultrazvukové vlny lépe zachycují jemné vnitřní dutiny díky vyšší frekvenci a menší vlnové délce. Jejich nedostatkem je však náchylnost ke ztátě signálu nebo k jeho utlumení, čímž může dojít k zamezení detekce větších vad. Ve slyšitelném spektru mají zvukové vlny delší vlnovou délku, proto nejsou vhodné pro určení menších vad, naopak jsou však používány pro detekci vad větších (Kasal a kol. 2011).

Zvukové vlny lze vyvolat jednoduchým mechanickým nárazem (např. kladivem). Na konstrukční prvek jsou umístěny dva senzory z důvodu detekce měření času šíření vlny. Senzory musí být od sebe umístěny v účinné vzdálenosti. Pro příčné měření je vyžadován volný přístup k protilehlým stranám prvku. V místě styku senzorů a kladiva dojde k vyvolání zvukové vlny a k aktivaci systému. Přístroje používané k detekci šíření zvukových vln jsou např.: Fakopp 2D, IML Micro Hammer a Metriguard 239A Stress Wave Timber. Tato frekvenčně

rezonanční metoda detekce nabízí rozsáhlé informace o celém prvku a je vhodná výhradně pro volně umístěné a prizmatické dřevěné prvky (Kloiber, Drdáký 2015).

Delší čas přesunu vlny nebo nižší rychlost šíření vlny signalizují případné poškození. Rychlost, jakou jsou ve dřevě vlny přenášeny, je anizotropní a zároveň je funkcí aktuálního stavu materiálu. Poškozené dřevo odpovídá nižší rychlosti šíření zvuku (Ross, Pellerin 2002). Rychlostní změny šíření vln jsou způsobeny odbouráváním jednotlivých chemických komponentů dřeva (celulóza, lignin a hemicelulóza). Tyto změny se mikroskopicky projevují jako trhliny v dřevní struktuře (Kloiber, Drdáký 2015). Zvuková vlna obchází zóny s růstovými odchylkami (odklon vláken, suky, trhliny, hniloba), tím je snižována její rychlost. Časy průchodu, resp. rozdílné rychlosti jsou porovnávacími veličinami pro hodnocení aktuálního stavu zkoumaného materiálu. Na základě naměřených hodnot je možné určit i jejich závislost na fyzikálních a mechanických vlastnostech dřeva (Feio 2005).

Pro velkorozměrové prvky je útlum signálu omezujícím faktorem šíření vln. Vysokofrekvenční měření je vhodné pro prvky malých rozměrů nebo prvky s malými vnitřními vadami. Nízkofrekvenční signál může být použit pro prvky velkých rozměrů, avšak jeho citlivost na malé vady uvnitř prvku je menší (Lear 2005). Útlum a rychlost šíření vln jsou ovlivněny geometrií prvku, druhem dřeva, orientací letokruhů, typem měniče přístroje konzervačním ošetřením, mechanickým zatížením, fyzikálními vlastnostmi prvku, jeho teplotou a vlhkostí. Pro výběr zkoumaných parametrů musí být uvedeny měřicí podmínky a technické vybavení (Kloiber, Drdáký 2015).

Druh dřeva je klíčovým faktorem pro šíření vln ve dřevě. V listnatých stromech se zvuk šíří rychleji než ve dřevě jehličnatých stromů. Pro posouzení rychlosti šíření vln je nutné se zaměřit na úhel mezi orientací letokruhů a směr průchodu. Vlny v podélném směru se pohybují přibližně 3–5× rychleji než vlny ve směru příčném. Způsob šíření vlny v příčném směru může probíhat třemi způsoby: tangenciálně vůči letokruhům, radiálně nebo tangenciálně napříč letokruhy v odlišném úhlu od 0° do 90°. U příčného šíření je nejpomalejší rychlost při orientaci úhlu 45° k letokruhům, nejrychlejší je pak u radiálního šíření, a to přibližně o 30 %. Rychlost šíření vlny v radiálním směru je cca 1500 m.s⁻¹ (Dackermann a kol. 2014).

Se vzrůstající vlhkostí ve dřevě klesá rychlost šíření vln. Tento útlum rychlosti šíření je způsoben vodíkovými vazbami mezi celulózovými řetězci a molekulami vody. Vlhkost je díky vysoké hygroskopicitě dřeva důležitým faktorem pro analýzu mechanických a fyzikálních vlastností konstrukčních prvků (Požgaj 1993). Bylo zjištěno, že u jedle nádherné se rychlost šíření u ultrazvukových vln snižuje o 0,8 % při zvýšení vlhkosti o 1 % (toto tvrzení platí do meze nasycení buněčných stěn – vlhkost cca 30 %) (Sandoz 1989). Vliv teploty na změnu rychlosti šíření vln je nepatrný. V rozmezí teplot od 0 °C do 40 °C se při zvýšení teploty o 1 °C sníží rychlost přibližně o 3 m.s⁻¹. Pro změny teplot byly vytvořeny opravné koeficienty (Kang, Booker 2002; Fakopp Enterprise Bt. 2022; Kloiber, Drdáký 2015).

Je velice důležité zabezpečit kontakt mezi povrchem prvku a přístrojovými senzory. Pokud jsou vlny přenášeny vzduchem, dochází tím k pomalejšímu přenosu. Z tohoto důvodu je potřebné eliminovat vliv plynného prostředí při průchodu signálu mezi materiálem a senzory. Optimálním tlakem senzorů na povrch vzorku a vhodným pojivem je zaručena dobrá vazba (Bucur 1995).

Odchylky naměřených hodnot, způsobené umístěním senzorů proti sobě, lze zjistit při opakovaných měřeních. K zamezení nepřesností při měření je vhodné používat vodící pravítka, pomocí něhož se senzory osadí přímo proti sobě (Feio 2005). V některých případech může být prvek povrchově upraven, např. broušením, hoblováním nebo jinými metodami, z důvodu zlepšení přenosu signálu mezi senzory a povrchem materiálu (Lear 2005).

V terénních podmínkách bývají více využívány zvukové vlny z důvodu ztáty signálu nebo většího útlumu ultrazvukových vln. Metoda měření pomocí zvukové vlny s využitím záražecích senzorů méně zkresluje výsledky měření a je vhodnější pro detekci větších dutin. Pro měření v terénu na dřevěných prvcích je vhodné se držet těchto kroků (Kloiber, Drdácý 2015):

- **Identifikace měřeného místa**
- **Připojení senzorů k prvku** – K posuzovanému materiálu musí být měřicí senzory pevně připevněny pomocí hrotu nebo šroubu. Příložné senzory se k prvkům přikládají s bezpečným přitlakem a příslušným mediem (např. gelem), které je vždy specifikováno doporučením konkrétního typu přístroje. Pokud dochází k připojení senzoru k prvku hrotem, používá se gumové kladivo na zaražení hrotu senzoru do prvku. V závislosti na požadované dráze zvukové vlny a na přístupnosti prvku se senzory mohou umístit v odlišných polohách – polopřímo rovnoběžně s vlákny, přímo nebo nepřímo rovnoběžně s vlákny a kolmo k vláknům. Šrouby či záražecí hroty jsou podle způsobu přenosu zvukové vlny vedeny kolmo k povrchu (u příčného, přímého podélného a polopřímého šíření zvukových vln) nebo pod úhlem 45°-60° (u nepřímého podélného šíření zvukových vln).
- **Měření vzdálenosti mezi senzory** – Vždy je měřena nejkratší vzdálenost mezi dvěma body, ve kterých jsou připojeny senzory. Vzdálenost mezi bodem vložení senzoru a místem úderu musí být stanovena pro některá zařízení.
- **Excitace dřevěného prvku kladivem** – Úder kladivem musí být veden vždy přímo s linií šroubu nebo hrotu. Kladivem je veden úder do prvního senzoru.
- **Záznam doby šíření** – Po zobrazení naměřené hodnoty na elektronické jednotce je potřeba tuto hodnotu zaznamenat.
- **Opakování zkoušky** – Platí všeobecné pravidlo, že čím více se provede zkoušek, tím přesnější a spolehlivější výsledky lze očekávat.
- **Měření vlhkosti a teploty** – Vlhkost prvku by měla být zjištěna kalibrovaným vlhkoměrem nebo přímou metodou. Dále je nutné brát v úvahu i vliv teploty a jiných faktorů.
- **Vyhodnocení výsledku zkoušek** – Rychlosti zvukové vlny jsou podle mnoha faktorů hodnoceny na základě referenčních vlnových rychlostí. Po vyhodnocení výsledků se rozhoduje, zda bude potřeba dalšího měření pro zpřesnění naměřených hodnot.
- **Záznam podmínek provádění měření a jiných okolností**

3.4.3.2 Měření mikroskopem

Ve struktuře dřeva je označeno uspořádání podélných prvků, např. tracheid, vláken a cév. Ve smyslu zkoumání těchto mikroelementů je mikroskopování hlavní metodou pro zjištění skutečného směru vláken. U jehličnatých dřevin bez podélných pryskyřičných kanálků a u

mnoha listnatých dřevin lze toto měření provést pouze lupou. Dobrá lupa může být dostačující, ale mikroskop s malým výkonem obvykle poskytuje větší přesnost měření. Malé odchylky, jako jsou odchylky způsobené stopami listů v mladých kmenech, mohou představovat určité problémy, ale průměrný směr vláken lze pravděpodobně určit stejně přesně pomocí mikroskopu s malým výkonem jako jakýmkoli jiným způsobem. Vzorky by samozřejmě měly být vždy pozorovány na vnějším povrchu (Harris 1989).

3.4.3.3 Digitální snímače

Bylo vyvinuto zařízení pro měření deformace konstrukčních prvků založené na digitálních snímačích. Nejprve byl prvek umístěn na zařízení lícem dolů a následně byl zasazen na tři čepy se zaoblenými hlavami (dva čepy na spodním konci a jeden čep na horním konci). Dvěma digitálními snímači na horním konci prvku byly zaznamenávány deformace (rotace, ohyb v podélném směru) a dále jedním digitálním snímačem v polovině rozpětí. Poté byl prvek otočen na bok, aby bylo možné pomocí snímače v polovině rozpětí zaznamenat deformace ohybu v boční ploše. Při každém měření byl každý prvek nasazen na zařízení stejným způsobem (Perstorper a kol. 2001).

3.4.3.4 Laserové skenování

Měřené vzorky (špalky) jsou upevněny na pojízdnu plošinu a následně naskenovány laserovým skenerem T1 Fiber On-Line™ (SP Trätek, Borås, Švédsko), který využívá „tracheidový efekt“ k určení orientace vláken (Oja a kol. 2006). Laserový paprsek je promítán laserovým zdrojem na povrch kmene, kde je vedeno světlo přednostně podél směru vláken. Vestavěná kamera průběžně zaznamenává rozměry laserové skvrny podél 16 poloměrů po obvodu, čímž lze získat přibližně 3 000 datových bodů pro následné analýzy. Data jsou převedena na úhly vláken (Nyström 2003). Polohy obvodového skenování jsou zvoleny tak, aby umožnily analýzu možných systematických odchylek na povrchu kmene a jiných přispívajících faktorů, jako jsou např. větve. Data jsou následně tříděna pomocí úhlového kritéria, aby se odstranily odchylky v okolí velkých suků, přetřhaných vláken a kůry (Cown a kol. 2010).

Paprsek laseru může být rozdělen na bodovou linii difrakčním optickým prvkem na povrchu desky. Vzdálenost mezi jednotlivými měřeními body je pravidelná (např. rozteče 4 mm). Sklon vlákna se vypočítává z elipsy vytvořené rozptylem světla pro každý bod. Pohybem desky na dopravníku lze zachytit jeden obraz každý milimetr podél podélného směru desky. Výsledkem je lokální měření sklonu vlákna v intervalu 1 mm podél podélného směru a 4 mm podél příčného směru desky (Daval a kol. 2015).

Metoda vedení tepla se používá k lokálnímu měření sklonu vláken listnatého a jehličnatého dřeva pomocí tepelně vodivostních vlastností dřeva. Podobný přístup, nazývaný elipsometrie, se již používá při studiu kompozitních materiálů k odhadu orientace kompozitních vláken (Fernandes, Maldague 2015). Tepelná vodivost dřeva závisí především na struktuře dřeva, na směru vláken, vyjimečnostech dřeva (suky atd.) a je větší ve směru vláken než ve směru kolmém na vlákna (asi 2,5×) (Kollmann, Côté 1968; Maku 1954). Proto je možné pomocí infračerveného laseru, který zahřívá povrch dřeva, zjistit a odhadnout sklon vláken. Aby nedošlo k poškození dřeva, musí nárůst teploty zůstat relativně nízký. Proto k vizualizaci vedení musí být použita infračervená kamera s citlivostí na vlnové délky kolem 5 μm. Lokálním buzením povrchu laserem a vizualizací vedení infračervenou kamerou je tedy možné zjistit a odhadnout sklon vláken u jakéhokoli druhu dřeva (Daval a kol. 2015).

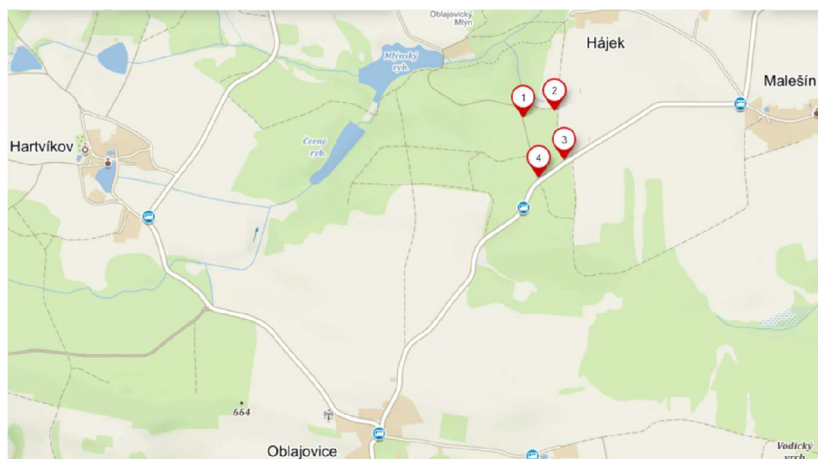
3.4.3.5 Rentgenová mikrotomografie

Vysušené vzorky jsou vertikálně upevněny na držák vzorků a zobrazeny pomocí rentgenového záření a vysoce citlivé digitální CCD kamery v postupných sekcích po $0,3^\circ$ při otočení o 180° . Tyto nezpracované rentgenové snímky jsou zpracovány pomocí softwaru SkyScan a z nezpracovaných rentgenových snímků jsou vytvořeny série příčných řezů (tomogramů). V tomogramech jsou detekovány pryskyřičné kanálky, následně jsou rekonstruovány 3D obrazy a jsou tak zjištěny odklony vláken na základě orientace pryskyřičných kanálků (Thomas, Collings 2017).

4. Materiál a metodika

4.1 Materiál

Zkoumaným materiálem pro tuto práci bylo 22 smrků ztepilých (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Smrkový porost (viz obr. 4.2), z kterého byly stromy vybrány se nachází v lesní oblasti mezi vesnicemi Oblajovice, Hájek a Malešín (viz obr. 4.1). Průměrná nadmořská výška této oblasti je 647 m n. m. a přibližná rozloha porostu činí 28 600 m². Stáří porostu se pohybovalo od 80–140 let.



Obrázek 4.1 – poloha smrkového porostu, odkud pocházejí výřezy smrkové kulatiny pro experimenty (mapy.cz)



Obrázek 4.2 – smrkový porost, kde byl proveden výběr stromů pro experimentální činnost

Z vybraných 22 stromů bylo nařezáno 39 kusů 6 m výřezů kulatiny (viz obr. 4.3) a to tak, že 22 kusů 6 m výřezů kulatiny bylo ze spodní části stromu 0–6 m a 17 kusů z následující výšky stromu 6–12 m. Z výřezů kulatiny byly na pásové pile nařezány konstrukční trámy. Z celkového počtu 39 ks výřezů kulatiny bylo nařezáno 30 kusů konstrukčních trámů o průřezu 200×250 mm, z toho 19 trámů bylo z výřezů kulatiny 0–6 m a 11 trámů z výřezů kulatiny 6–12 m. 10 trámů (viz obr. 4.4) bylo uskladněno v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT (ve skladu) a 20 trámů (viz obr. 4.5) v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR (pod porvizonní stříškou ve venkovním prostředí).



Obrázek 4.3 – 6 m výřezy smrkové kulatiny na manipulační skládce v lese



Obrázek 4.4 – uskladněné trámy při měření točitosti pomocí črtáku v areálu UCEEB ČVUT



Obrázek 4.5 – uskladněné trámy při měření točitosti pomocí črtáku v areálu ÚTAM AV ČR

4.2 Metodika

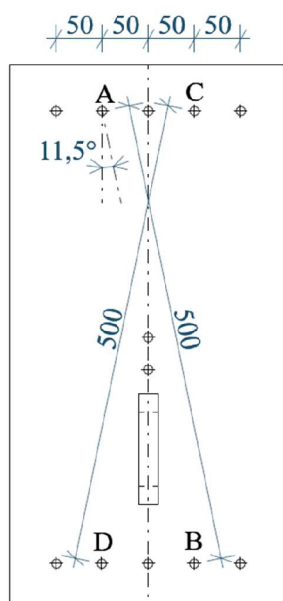
4.2.1 Měření točitosti na živých stromech

Pomůcky a přístroje potřebné k měření na živých stromech:

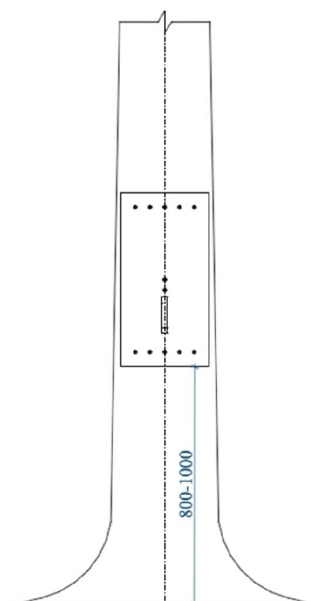
- Šablona pro měření točitosti
- Měřicí přístroj – šíření elastických vln
- Kovové kladívko
- Gumová palička
- Aku šroubovák
- Vruty do dřeva
- Svinovací metr
- Záznamový arch a tužka

Pro detekci točitosti na živých stromech byl použit přístroj využívající princip šíření elastických vln, konkrétně zvukových. Tento přístroj se nazývá Fakopp 1D ArborSonic Microsecond Timer (Fakopp Enterprise Bt 2022). Metoda měření byla provedena podle tohoto postupu:

- **Zajištění měřeného místa a přístroje** – Pro začátek měření bylo potřebné místo měření zpřístupnit. Pokud se jednalo o zarostlá stanoviště, při přítomnosti křovin nebo jiných náletů zabraňujících nebo znemožňujících měření, bylo nutné tyto nálety odstranit. Baterie v přístroji by měly být před měřením nabité.
- **Přípevnění šablony k měřenému stromu** – Šablona pro měření predikované točitosti (viz obr. 4.6) byla připevněna ke stromu pomocí vruty, který byl do stromu zašroubován Aku šroubovákem. Vrut pro přípevnění se nachází ve středu šablony a umožňuje jednoduché natočení šablony podle osy kmene. Střed šablony by měl být umístěn v ose kmene v prsní výšce, potom spodní hrana šablony byla umístěna v rozmezí 800–1000 mm nad zemí (viz obr. 4.7). Tato výška je doporučena z důvodu ovlivnění výsledku měření od kořenových náběhů.



Obrázek 4.6 – šablona pro měření točitosti



Obrázek 4.7 – odsazení šablony od terénu

- **Sestavení přístroje k měření** – Před měřením bylo potřeba zapojit senzory k měřicí jednotce dle požadavků výrobce. Následně byl přístroj zapnut.
- **Přichycení senzorů a jejich konfigurace** – Senzory byly do šablony zatlučeny pomocí gumové paličky. Body A, B, C a D byly umístěny 50 mm od podélné osy kmene v horizontální rovině (dle šablony). Vzájemné vzdálenosti mezi body A–B a C–D byly 500 mm (dle šablony). Konfigurace pro měření jednotlivých směrů byly odlišné. Pro měření levotočivosti byla využívána konfigurace A–B (viz obr. 4.8), pro měření pravotočivosti pak konfigurace C–D. Do míst A a C byl zatlučen první senzor (excitační), do míst B a D senzor druhý (přijímací).



Obrázek 4.8 – levosměrná konfigurace osazení senzorů při měření točitosti na stromě

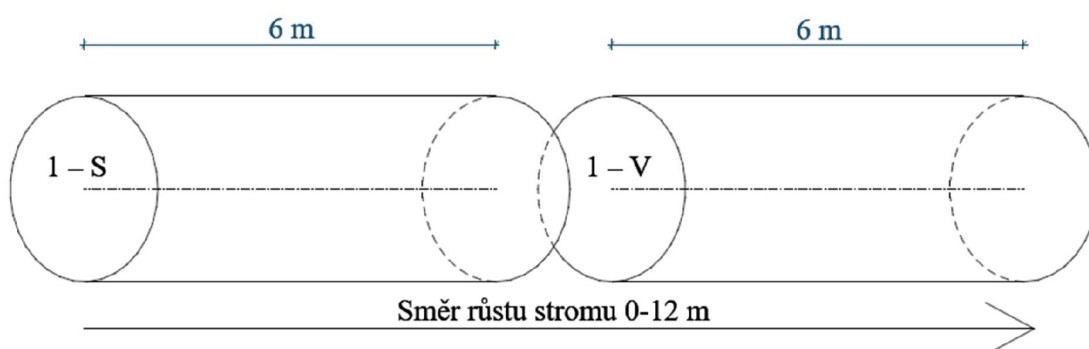
- **Excitace senzorů** – Senzory byly v příslušných konfiguracích excitovány pomocí kovového kladívka v bodech A a C. Pro přesnost měření bylo na jednom stromu měřeno 5 hodnot pro každý směr. Výsledná hodnota měření byla průměrem oněch pěti hodnot měření. Již na místě měření šlo odhadnout, zda byly stromy pravotočivé nebo levotočivé. Pokud byl zaznamenaný čas průchodu v levém nebo pravém směru menší než ve směru druhém, byl tento směr dominantní. Při stejných nebo podobných hodnotách měření v obou směrech byl strom považován za netočitý.
- **Zapisování hodnot** – Hodnoty měření pro jednotlivé směry na 22 stromech byly zapsány do záznamového archu.

4.2.2 Měření skutečné točitosti na 6 m výřezech kulatiny

Pomůcky potřebné k měření na živých stromech:

- Črták
- Tužka
- Lat' délky 1000 mm
- Pořiz
- Svinovací metr a lesnická průměrka
- Odporový vlhkoměr

Po těžbě vybraných stromů byla kulatina rozmanipulována na 6 m výřezy. Každý výřez byl očíslován od 1 do 22. Písmena S a V značila spodní a vrchní část rozmanipulovaného stromu (viz obr. 4.9). Točitost byla měřena na obou koncích čel 6 m výřezů.



Obrázek 4.9 – číslování 6 m výřezů kulatiny

Na výřezech byla měřena skutečná točitost pomocí črtáku. Měření skutečné točitosti bylo provedeno dle následujících kroků:

- **Odkornění měřeného místa** – Měřené místo bylo odkorněno pomocí pořizu vždy blízko čel nařezaných kulatin v místech bez suků. Plocha odkorněného místa byla nejméně 300 mm dlouhá a 100 mm široká.
- **Označení osy kmene pomocí latě** – Lat' s vyznačeným úsekem 200 mm byla položena na odkorněné místo ve směru podél osy kmene (viz obr. 4.10). Pomocí šablony byly vyznačeny pomocné čáry na koncích 200 mm dlouhého úseku (body X a Y ve schématu měření). Podél přiložené šablony byla vyznačena osa kmene pomocí tužky.
- **Měření odklonu vláken** – Odklon vláken od podélné osy kmene byl měřen črtákem. Hrot črtáku byl zaražen do průsečíku horní pomocné čáry a čáry osy kmene (bod X) (viz obr. 4.11). Tažením črtáku podél vláken až do úrovně spodního pomocného bodu vznikla rýha (viz obr. 4.12). Skutečný odklon vláken byl určen jako horizontální vzdálenost mezi spodním koncem vzniklé rýhy od črtáku a průsečíkem spodní pomocné čáry a čáry osy kmene (bod Y). Znaménkové hodnoty odklonu byly vyznačeny na schématu měření (viz obr. 4.13).



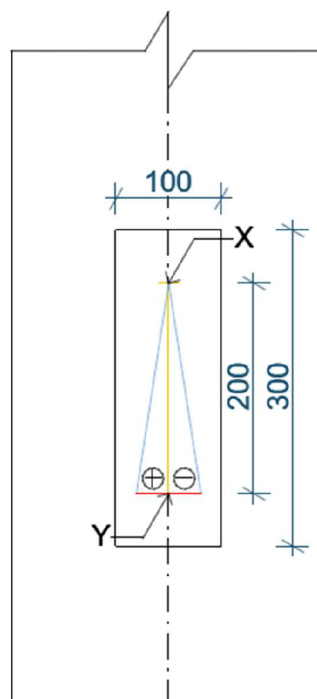
Obrázek 4.10 – lať pro značení osy kulatiny s vyznačeným délkovým úsekem 200 mm



Obrázek 4.11 – počáteční stav při měření točitosti na kulatině pomocí črtáku (zaražení hrotu črtáku do výchozího místa v ose kulatiny)



Obrázek 4.12 – tah črtákem ke spodní pomocné čáře



Obrázek 4.13 – schéma měření črtákem

- **Měření vlhkosti a průměrů 6 m výřezů** – U všech 6 m výřezů byl na obou koncích změřen průměr pomocí lesnické průměrky a u některých 6 m výřezů byla náhodně zjišťována vlhkost odporovým vlhkoměrem.

- **Zapisování hodnot** – Hodnoty měření točitosti a průměru všech nařezaných a hodnoty vlhkosti některých kulatin byly zapsány do záznamového archu.

4.2.3 Měření skutečné točitosti a kroucení trámů

Pomůcky potřebné k měření na živých stromech:

- Črták
- Tužka
- Lajnovací šňůra
- Svinovací metr, pravítko, tloušťkové destičky
- Odporový vlhkoměr

Kulatina byla nařezána na pásové pile na konstrukční trámy o profilu 200×250 mm a následně byla sušena přirozeným způsobem po dobu cca 1 roku. Měření skutečné točitosti a rotace konstrukčního trámu po vysušení bylo provedeno dle následujících kroků:

- **Označení osy kmene podle lajnovací šňůry** – Lajnovací šňůra tvořila pomyslnou osu kmene (viz obr. 4.14). Konce šňůry byly kladeny vždy kolmo na plochu směřující ke dřeni.



Obrázek 4.14 – přichycení lajnovací šňůry označující osu trámu

- **Měření odklonu vláken** – Odklon vláken byl měřen obdobným způsobem jako v kapitole 4.2.2., místo šablony z latě byl aplikován svinovací metr a pravítko k určení a zakreslení vzdálenosti 200 mm. V některých případech nebylo nutné užít k měření črták. K identifikaci odklonu vláken byly použity výsušné trhliny kopírující skutečný směr vláken (viz obr. 4.15).

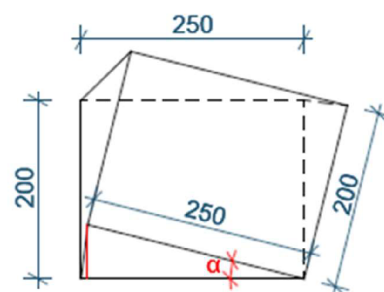


Obrázek 4.15 – měření odklonu vláken ze vztahu výsušné trhliny a čáry označující osu trámu

- **Měření kroucení** – Konstrukční trámy byly vždy při měření uloženy jedním koncem trámu ve vodorovné poloze a na druhém konci trámu byla měřena rotace pomocí svinovacího metru nebo tloušťkové destičky. Měření rotace se provedlo mezi vodorovným prokladem a zvedlou spodní podélnou hranou trámu (viz obr. 4.16). Úhel rotace byl vypočten na základě znalosti délky spodní příčné hrany trámu a naměřené vzdálenosti od prokladu k podélné spodní hraně (viz obr. 4.17).



Obrázek 4.16 – měření kroucení trámů svinovacím metrem



Obrázek 4.17 – schéma měření kroucení trámů

- **Měření vlhkosti** – Vlhkost byla měřena odporovým vlhkoměrem na náhodně vybraných prvcích.
- **Zapisování hodnot** – Hodnoty měření točitosti všech konstrukčních trámů a hodnoty vlhkosti některých trámů byly zapsány do záznamového archu.

4.2.4 Vyhodnocení naměřených dat

Data ze záznamových archů byla vyhodnocena pomocí programu Microsoft Excel. Při měření predikce točitosti na živých stromech byly naměřené časy převedeny na rychlost, výpočet byl proveden dle rovnice (3.4). Výsledný predikovaný směr točitosti byl určen rozdílem hodnot rychlostí šíření elastických vln. Vždy byla odečtena rychlost v levotočivém směru od směru pravotočivého. Záporné znaménko po odečtu rychlostí znamenalo predikovanou levotočivost kulatiny, kladné znaménko pak pravotočivost. Pokud byly hodnoty po odečtu téměř vyrovnané, strom byl podle predikce považován za netočivý.

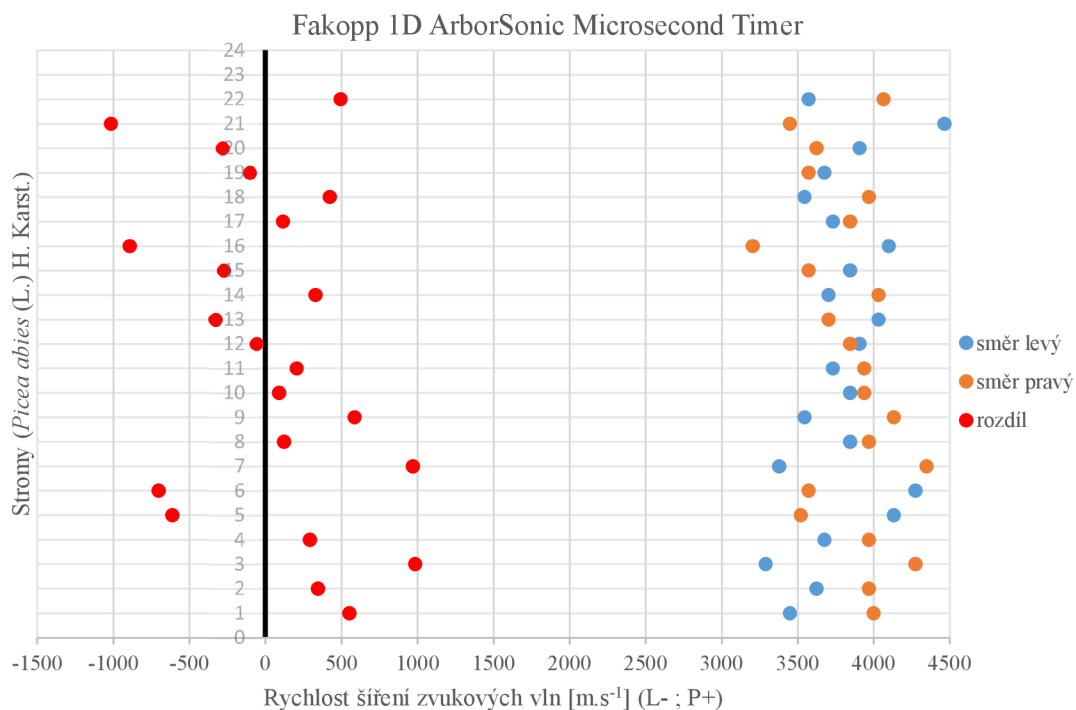
Naměřené hodnoty odklonu vláken při měření skutečné točitosti na kulatině a konstrukčních trámech byla zaznamenána na 200 mm dlouhém úseku. Bylo tedy nutné naměřenou hodnotu odklonu vláken převést na centimetry a vynásobit pěti, abychom dostali výsledný odklon v cm/m. Pro 6 m výřezy kulatin v úsecích 0–6, 6–12 a 0–12 m byly vypočteny průměrné hodnoty měření. Naměřená rotace v milimetrech byla převedena na úhly. Na základě naměřených dat byly vytvořeny grafy vzájemných závislostí s příslušnými koeficienty determinace. Hodnota koeficientu determinace rovna 0 má žádný význam závislosti a hodnota 1 má význam zcela funkční závislosti.

5. Výsledky a diskuze

5.1 Výsledky měření predikované točitosti na živých stromech

Měření na živých stromech bylo provedeno neinvazivním způsobem, na rozdíl od Kligera (2001), který pro měření točitosti na živých stromech odkornil plochu 100×150 mm a následně použil črták. Tato operace může značně snížit životnost stromu, oproti tomu při měření Fakoppem je zásah na povrchu stromu zanedbatelný.

Naměřené hodnoty z měření byly převedeny na rychlost šíření vln dle rovnice (3.4). V tomto případě byla vzdálenost mezi oběma senzory 500 mm a každý protilehlý senzor byl umístěn 50 mm od osy kmene v horizontální rovině v příslušných konfiguracích (viz obr. 4.6). Výsledné naměřené hodnoty byly vypočteny jako rozdíl hodnot dle následujících pravidel: směr pravotočivý (C–D) mínus směr levotočivý (A–B). Výsledný rozdíl hodnot měření byl určující pro vyhodnocení predikované točitosti. Kladný rozdíl byl určen pro směr pravotočivý, záporný pro směr levotočivý. Z celkového souboru všech 22 stromů (viz graf 5.1) byla u 9 stromů predikována levotočivost, z toho u 7 stromů (strom 5, 6, 13, 15, 16, 20, 21) byl naměřen rozdíl rychlostí pod hranicí (-250) m.s⁻¹. Nejvyšší hodnota rozdílů rychlostí byla naměřena u stromu 21, kde hodnoty dosahovaly rychlosti (-1016) m.s⁻¹. U 13 stromů byla predikována pravotočivost. Nejextrémnější hodnota pravotočivosti byla naměřena u stromu 3 (984 m.s⁻¹). Nejmenší hodnoty rozdílů rychlosti byly naměřeny u stromů 10 (91 m.s⁻¹) a 12 (-60 m.s⁻¹). Podrobné hodnoty měření přístrojem Fakopp ID ArborSonic Microsecond Timer jsou uvedeny v příloze 1.



Graf 5.1 – hodnoty měření přístrojem Fakopp ID ArborSonic Microsecond Timer na stromech

5.2 Výsledky měření skutečné točitosti na 6 m výřezech kulatiny

Mavrou (2007) měřil točitost na kulatině metodou štípání špalků. Výhodou této metody je možnost měřit točitost vláken v celém průměru kmene, na druhou stranu je však nutné kulatinu nařezat na malé špalky a následně je rozštípnout. Princip metody měření, která je použita v této práci, je použita i mnoha dalšími autory (Wellner, Lowery 1967; Kliger 2001; Säll 2002). Kligerova (2001) metoda měření byla o něco přesnější než v této práci, jelikož byl vytvořen průměr ze tří tahů črtákem, kdežto v této práci bylo črtákem při měření taženo pouze jednou.

Naměřené hodnoty byly zapsány v mm/200 mm. Převod na cm/m byl proveden vynásobením vzdálenosti pěti a celkovým vydělením deseti. Průměr smrkové kulatiny u paty stromu byl naměřen lesnickou průměrkou, v rozmezí od 350 do 620 mm. Z celého souboru 39 ks výřezů kulatiny byl u 13 výřezů kulatiny naměřen větší odklon vláken než 5 cm/m.

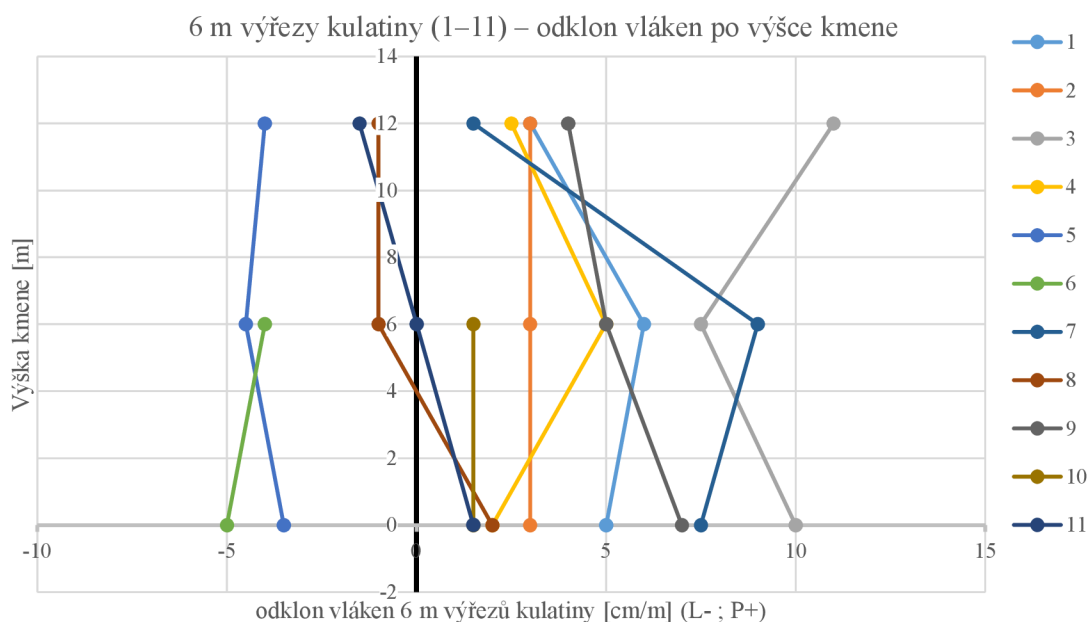
6 m výřezy kulatiny, u nichž byl naměřen odklon vláken větší než 5 cm/m na levý nebo pravý směr:

- 6 m výřezy kulatiny 1 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 5–6–3 cm/m. Celkový směr pravotočivý.
- 6 m výřezy kulatiny 3 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 10–7,5–11 cm/m. Celkový směr pravotočivý.
- 6 m výřezy kulatiny 7 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 7,5–9–1,5 cm/m. Celkový směr pravotočivý.
- 6 m výřezy kulatiny 9 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 7–5–4 cm/m. Celkový směr pravotočivý.
- 6 m výřezy kulatiny 15 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-2,5)–(-5)–(-6) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- 6 m výřezy kulatiny 21 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-7,5)–(-11,5)–(-15) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- 6 m výřez kulatiny 22 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (3,5)–(6) cm/m. Celkový směr pravotočivý.

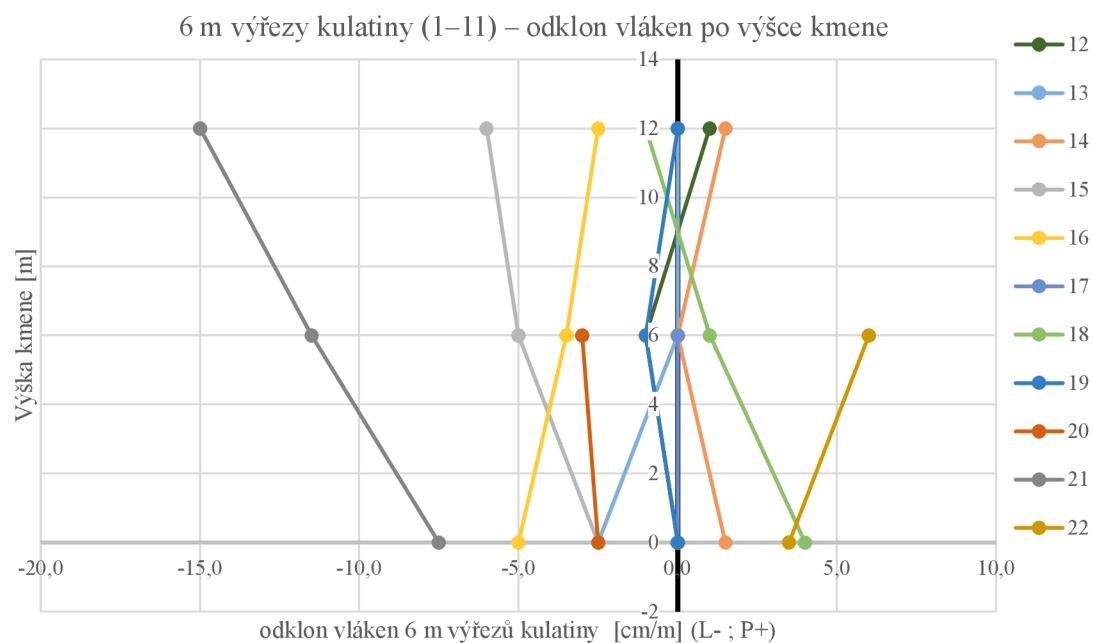
6 m výřezy kulatiny, u nichž byla predikována levotočivost na základě rozdílu rychlosti šíření zvukových vln (r.r.š.z.v.) s hodnotami pod (-250) m.s⁻¹:

- 6 m výřezy kulatiny 5 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-3,5)–(-4,5)–(-4) cm/m. Celkový směr levotočivý. Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-611) m.s⁻¹.
- 6 m výřez kulatiny 6 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-5)–(-4) cm/m. Celkový směr levotočivý. Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-702) m.s⁻¹.
- 6 m výřezy kulatiny 13 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-2,5)–0–0 cm/m. Celkový směr levotočivý. Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-329) m.s⁻¹.
- 6 m výřezy kulatiny 15 – Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-275) m.s⁻¹.
- 6 m výřezy kulatiny 16 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-5)–(-3,5)–(-2,5) cm/m. Celkový směr levotočivý. Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-893) m.s⁻¹.
- 6 m výřez kulatiny 20 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-2,5)–(-3) cm/m. Celkový směr levotočivý. Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-283) m.s⁻¹.
- 6 m výřezy kulatiny 21 – Odpovídající hodnota r.r.š.z.v. byla (-893) m.s⁻¹.

V grafu 5.2 je zobrazena distribuce odklonu vláken 6 m výřezů kulatiny po výšce kmene stromů 1–11, v grafu 5.3 pak stromů 12–22. 6 m výřezy kulatiny byly rozděleny do grafů na 2 skupiny z důvodu lepší přehlednosti. Podrobné výsledky naměřených hodnot pro délky 6 m výřezů kulatiny jsou zobrazeny v příloze 2–4.



Graf 5.2 – distribuce odklonu vláken 6 m výřezů kulatiny po výšce kmene (1–11)



Graf 5.3 – distribuce odklonu vláken 6 m výřezů kulatiny po výšce kmene (12–22)

5.3 Výsledky měření skutečné točitosti na trámech

Skutečná točitost trámů byla měřena pomocí črtáku. Naměřené hodnoty byly zapsány stejně jako v kapitole 5.2. Trámy byly nařezány na finální rozměry 200×250×6000 mm, následně byly vysušeny přirozeným způsobem po dobu cca 1 roku. Po celou dobu byly chráněny před deštěm provizorní stříškou nebo byly uloženy ve skladu. Při skladování byly proloženy rovnoměrnými proklady. Vlhkost trámů se pohybovala okolo 16 % a byla měřena odporovým zarážecím vlhkoměrem u náhodně vybraných prvků.

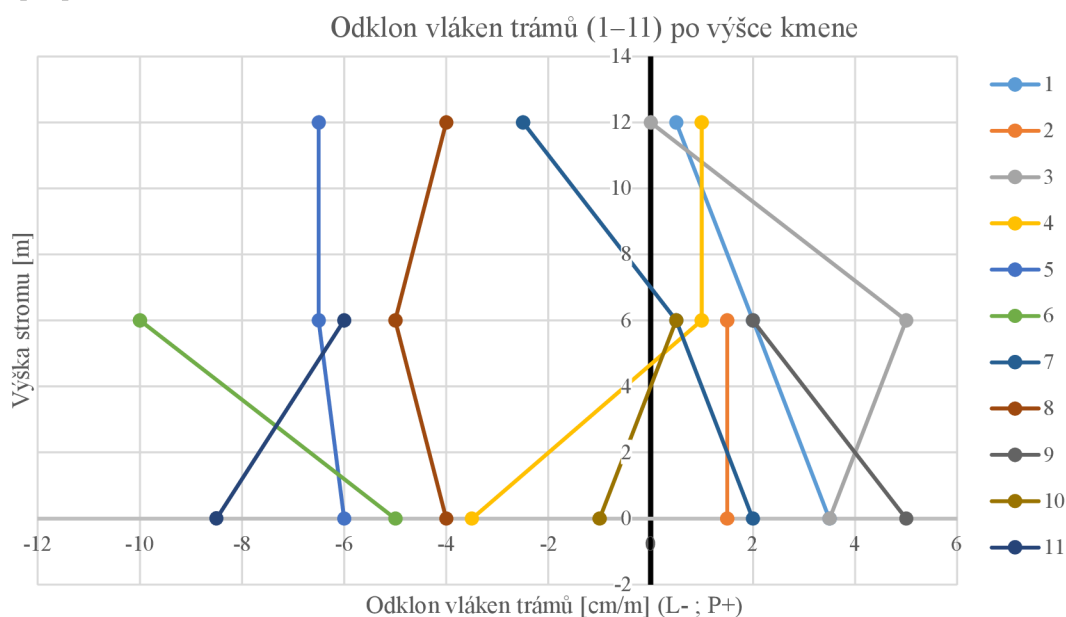
Trámy, u nichž byl naměřen odklon vláken větší než 5 cm/m na levý nebo pravý směr:

- Trámy 5 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-6)–(-6,5)–(-6,5) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- Trám 6 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-5)–(-10) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- Trám 11 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-8,5)–(-6) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- Trám 20 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-5,5)–(-5) cm/m. Celkový směr levotočivý.
- Trámy 21 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken (-10)–(-12,5)–(-15) cm/m. Celkový směr levotočivý.

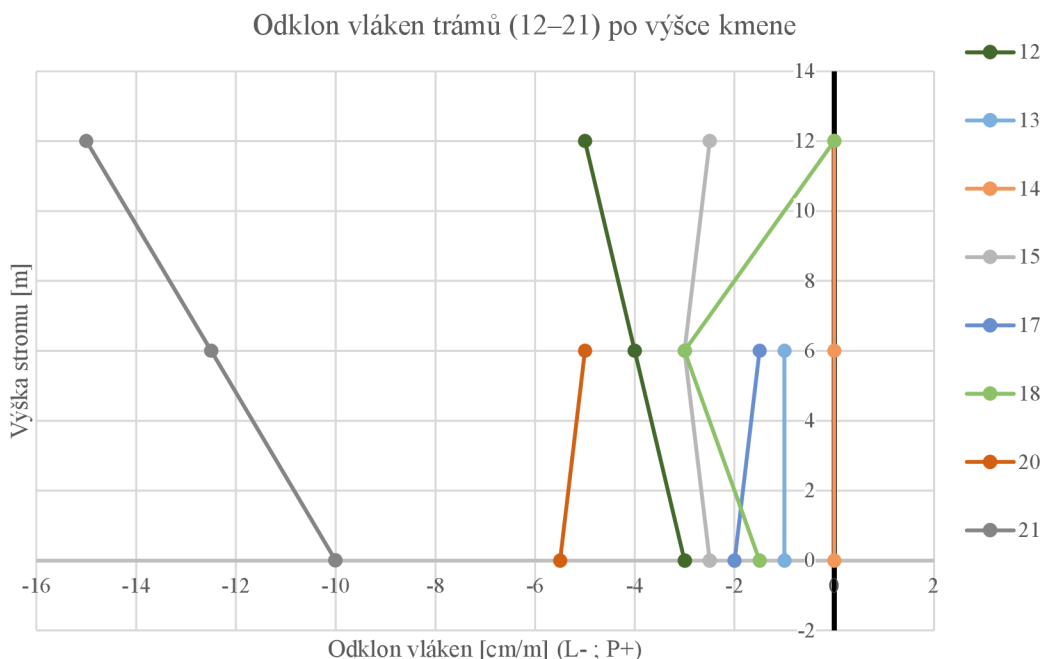
Trámy, u nichž došlo téměř k dokonalému narovnání vláken:

- Trámy 7 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 2–0,5–(-2,5) cm/m. Celkový směr téměř netočivý.
- Trám 10 – V úseku 0–6 m byl odklon vláken (-1)–0,5 cm/m. Celkový směr téměř netočivý.
- Trámy 14 – V úseku 0–6–12 m byl odklon vláken 0–0–0 cm/m. Celkový směr netočivý.

V grafu 5.4 je zobrazena distribuce odklonu vláken po výšce kmene trámů 1–11, v grafu 5.5 pak trámů 12–21. Konstrukční trámy byly rozděleny do grafů na 2 skupiny z důvodu lepší přehlednosti.



Graf 5.4 – distribuce odklonu vláken trámů po výšce kmene (1–11)



Graf 5.5 – distribuce odklonu vláken trámů po výšce kmene (12–21)

5.3.1 Výsledky měření kroucení trámů

Kroucení trámů bylo měřeno pomocí svinovacího metru nebo tloušťkové destičky. Z celého souboru všech trámů bylo naměřeno kroucení vyšší než $5^\circ/6$ m délky u 7 trámů:

- Trámy 5 – Spodní hrany čel byly vůči sobě pootočený o $5,5^\circ$ v úseku 0–6 m (5–S) a $7,79^\circ$ v úseku 6–12 m (5–V).
- Trám 6 – Spodní hrany čel byly vůči sobě pootočený o $6,42^\circ$ v úseku 0–6 m (6–S).
- Trám 15 – Spodní hrany čel byly vůči sobě pootočený o $5,73^\circ$ v úseku 6–12 m (15–V).
- Trám 20 – Spodní hrany čel byly vůči sobě pootočený o $5,73^\circ$ v úseku 0–6 m (20–S).
- Trámy 21 – Spodní hrany čel byly vůči sobě pootočený o $14,21^\circ$ v úseku 0–6 m (21–S) a $14,21^\circ$ v úseku 6–12 m (21–V).

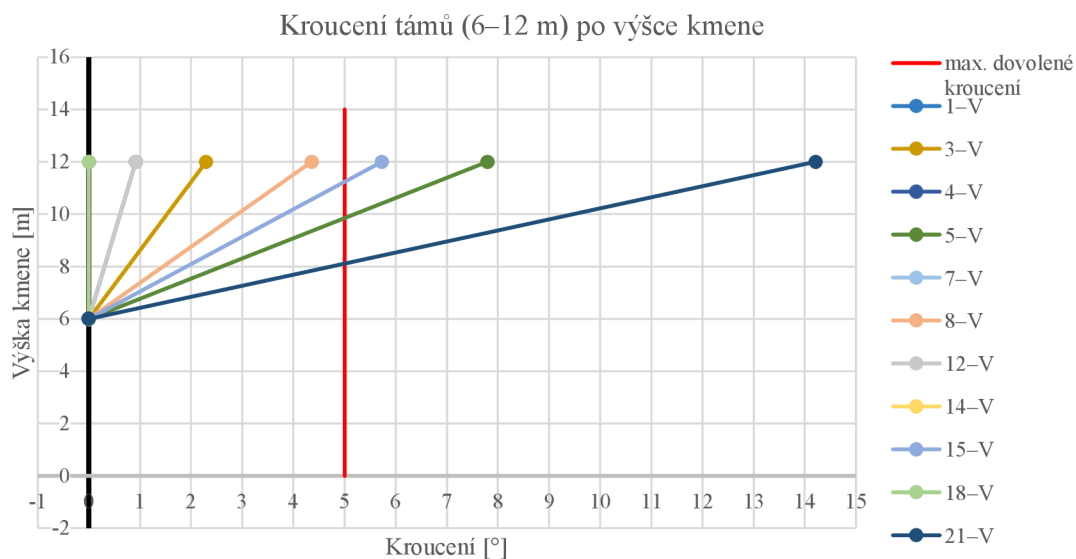
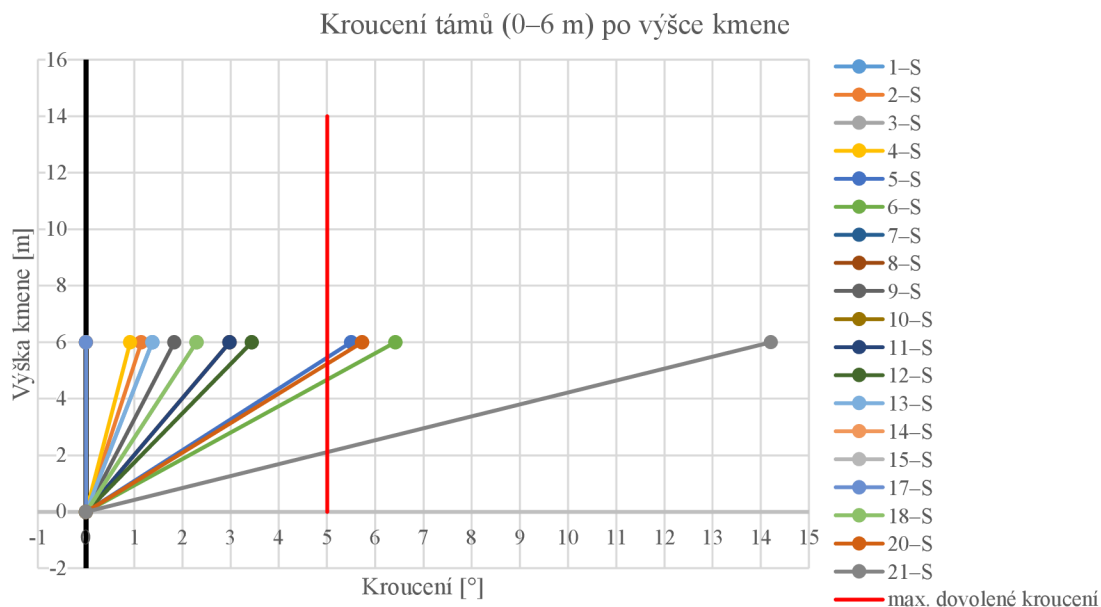
Trámy, u kterých bylo naměřeno nulové kroucení:

- Trám 4 – Měřeno v úseku 6–12 m (4–V).
- Trám 7 – Měřeno v úseku 0–6 m (7–S).
- Trám 10 – Měřeno v úseku 0–6 m (10–S).
- Trám 14 – Měřeny v úseku 0–6 m (14–S) a 6–12 m (14–V).

Z naměřených hodnot je patrné, že po vysušení došlo k největšímu odklonu vláken a zároveň i kroucení (viz obr. 5.1) u trámu 21. Naopak za netočité lze považovat trám 14, u kterého byl určen nulový odklon vláken i nulové kroucení (viz obr. 5.2). Ze všech naměřených dat lze usoudit, že většina trámů měla po vysušení tendenci měnit svůj odklon vláken z pravotočivého na levotočivý a z levotočivého na levotočivý směr. Na nepřijatelnou

pravotočivost (více než 5 cm/m) se nepřetočil žádný ze všech vysušených trámů. Vzájemné závislosti a rozbor problematiky budou uvedeny v následujících kapitolách.

V grafu 5.6 je zobrazeno kroucení po výšce kmene trámů 1–11, v grafu 5.7 pak trámů 12–21. V příloze 5–7 jsou uvedeny všechny průměrné hodnoty měření točitosti a kroucení trámů.





Obrázek 5.1 – extrémně levotočivý trám 21–S



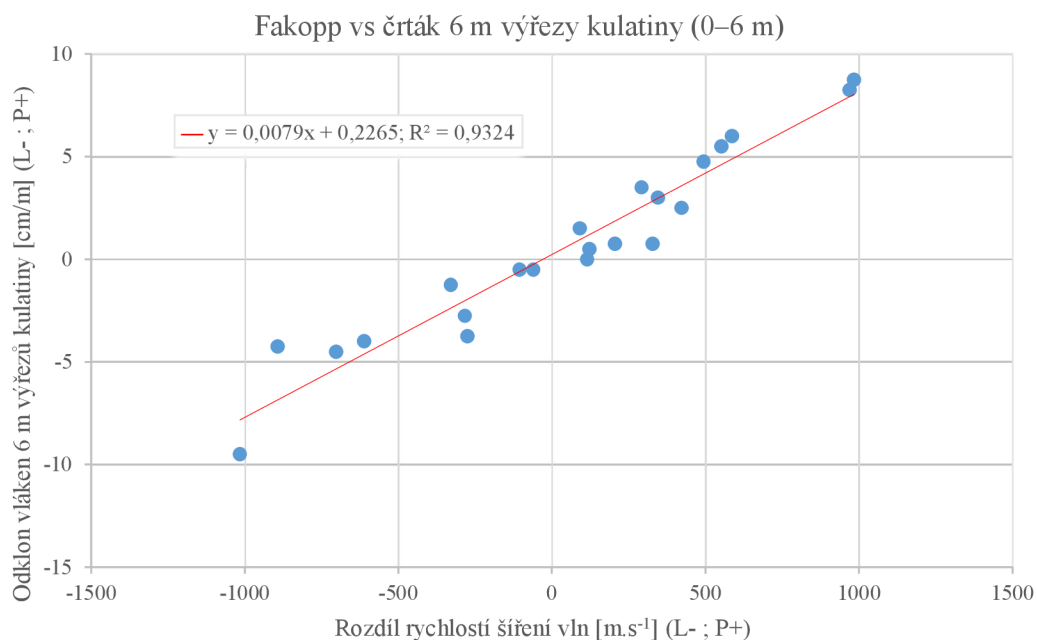
Obrázek 5.2 – netočivý trám 14–S

5.4 Predikce točitosti a kroucení

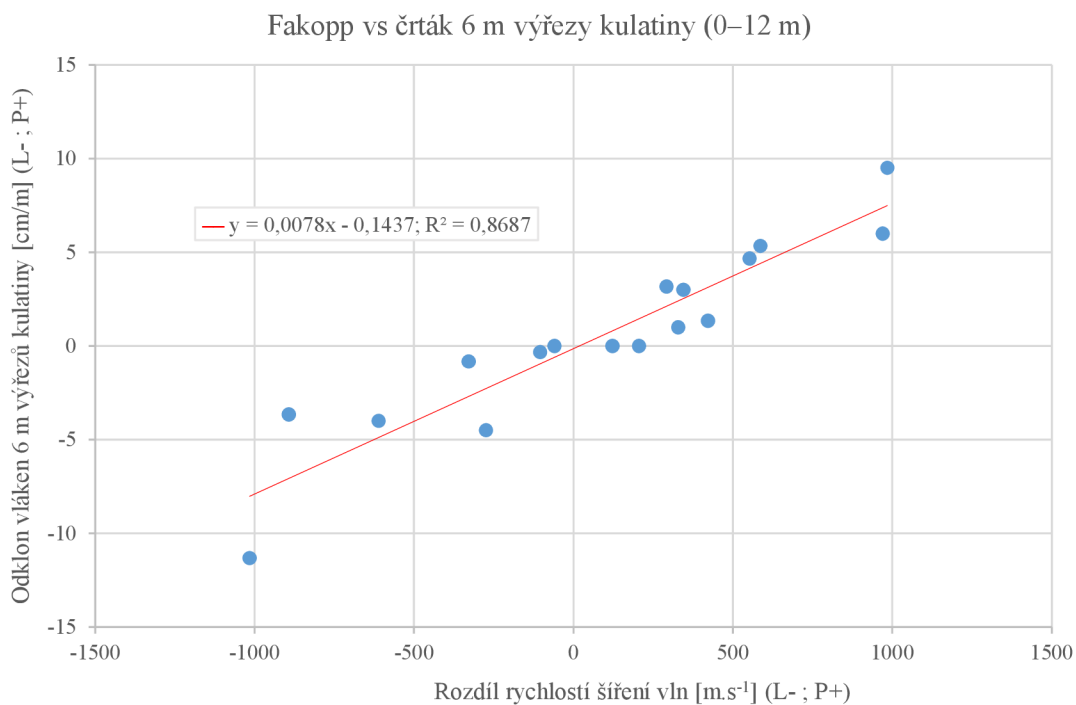
5.4.1 Predikce točitosti 6 m výřezů kulatiny na základě měření Fakoppem

Poslední dobou jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu dřeva, která závisí na pochopení točitosti vláken a jejího vlivu na dřevěné produkty (Johansson 1994). Je nezbytně nutné vybrat vhodnou kulatinu s určením točitosti a její předpovědi pro následné opracování na pilařské výřezy. Jako vhodným způsobem měření se ukázalo použití neinvazivního přístupu k detekci predikované točitosti přímo na stromech v prsní výšce pomocí zařízení Fakopp ArborSonic 1D Microsecond Timer. Díky rozdílům rychlostí šíření elastických vln v obou směrech točitosti je možné predikovat výsledný směr točitosti, a v první řadě i míru točitosti 6 m výřezů kulatiny s přesností $R^2=0,93$, což potvrzují výsledky vyobrazené v grafu 5.8. Kliger (2001) porovnával vzájemné závislosti mezi měřením točitosti črtákem na stromě a následně na výřezu kulatiny u paty stromu u 26 stromů. Došel k hodnotě $R^2=0,66$, která je o poznání nižší než hodnota predikované točitosti výřezu kulatiny v této práci. Tato nízká hodnota však mohla být způsobena porovnáváním hodnot z odlišných stanovišť. Z výsledku měření točitosti 6 m výřezů kulatiny v této práci tedy vyplývá, že pro výřez kulatiny 0–6 m od paty stromu byla určena vysoká přesnost predikce. Při predikci točitosti dvou 6 m výřezů kulatiny (0–12 m výšky stromu) se koeficient determinace nepatrně snížil na hodnotu $R^2=0,87$ (viz graf 5.9). Pro druhý výřez od paty stromu (6–12 m výšky stromu) byla predikce točitosti pouze $R^2=0,78$ (viz graf 5.10). Z výsledných hodnot koeficientů determinace lze usoudit, že mezi měřením pro dva 6 m výřezy kulatiny (po délce 0–12 m výšky stromu) lze predikovat odklon vláken neinvazivním způsobem se 78–93% pravděpodobností shody měření skutečné točitosti. Z uvedených dat vyplývá, že se

zvyšující se výškou umístění 6 m kulatiny v pozici stromu se míra predikce kroucení snižuje. Ve vyhodocení bylo započteno celkem 22 ks kulatiny 0–6 m a 17 ks kulatiny 6–12 m.

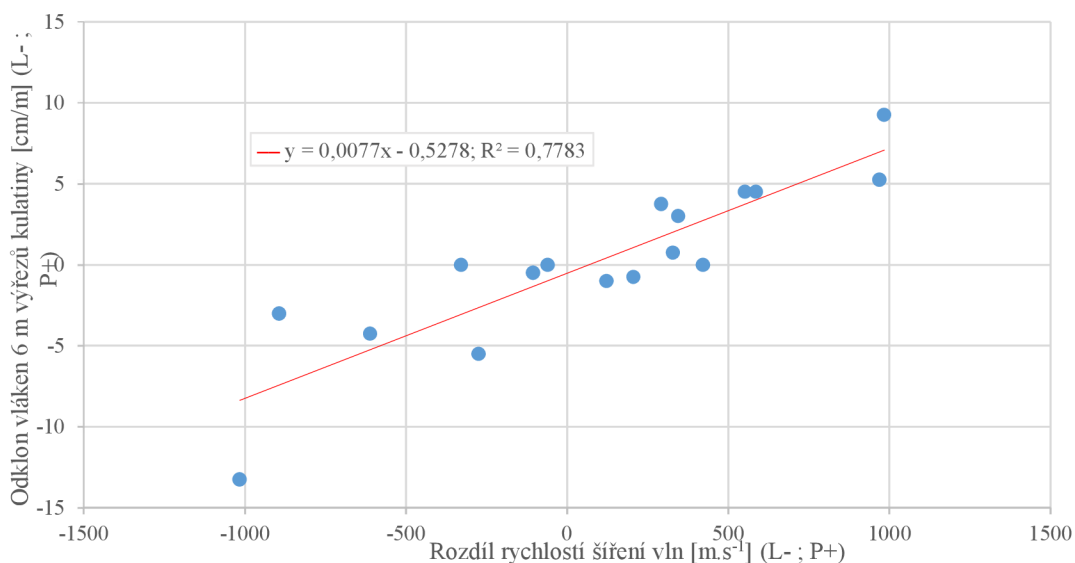


Graf 5.8 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 0–6 m od paty stromu



Graf 5.9 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 0–12 m od paty stromu

Fakopp vs črták 6 m výřezy kulatiny (6–12 m)



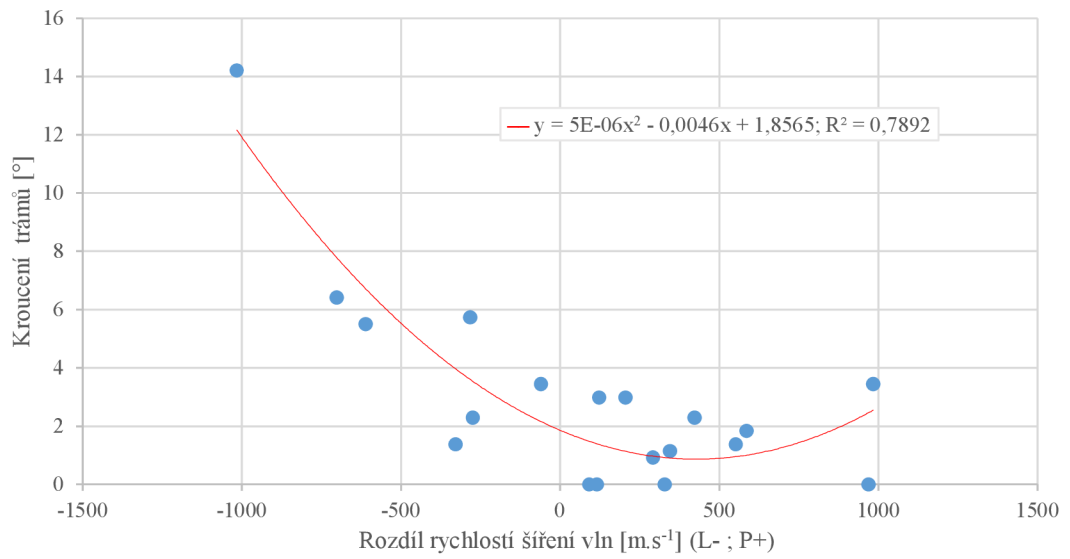
Graf 5.10 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs točitost z črtáku měřeno na 6 m výřezu kulatiny 6–12 m od paty stromu

5.4.2 Predikce kroucení trámů

Při snaze predikovat kroucení trámů (0–6 m od paty stromu), po přirozeném sušení, na základě rozdílu rychlosti šíření elastické vlny pro oba směry točitosti měřené přístrojem Fakopp ArborSonic 1D Microsecond Timer je koeficient determinace $R^2=0,79$ (viz graf 5.11). O něco lepší koeficient determinace je u trámů (6–12 m od paty stromu) $R^2=0,92$ (viz graf 5.12) a u trámů (0–12 m od paty stromu) dosahuje koeficient determinace velice příznivých hodnot $R^2=0,94$ (viz graf 5.13). Se zvyšující se výškou umístění trámu v pozici stromu se míra predikce kroucení zvyšuje. Tento jev může být způsoben neočekávanými odklony vláken u některých trámů, zejména u konstrukčního trámu 11, ve kterém byla naměřena hodnota rozdílu rychlosti šíření elastických vln 206 m.s^{-1} v prsní výšce. Při měření točitosti trámu črtákem u paty stromu však byly naměřeny hodnoty odklonu vláken $(-8,5) \text{ cm/m}$. Na stejném trámu byl v 6 metrech délky naměřen odklon vláken $(-6) \text{ cm/m}$, který se více přibližuje očekávané hodnotě a při málo početném souboru měřených prvků jsou i některé niance zásadní pro ovlivnění očekávaných výsledků. Dalším faktorem pro nízkou hodnotu R^2 v bodě 0 m bylo porovnávání rozdílného množství konstrukčních trámů. Pro určení R^2 v rozahu 0–6 m bylo zahrnuto 19 konstrukčních trámů, kdežto pro úsek 6–12 m pouze 11 konstrukčních trámů, v nichž nebyl započten např. konstrukční trám 11.

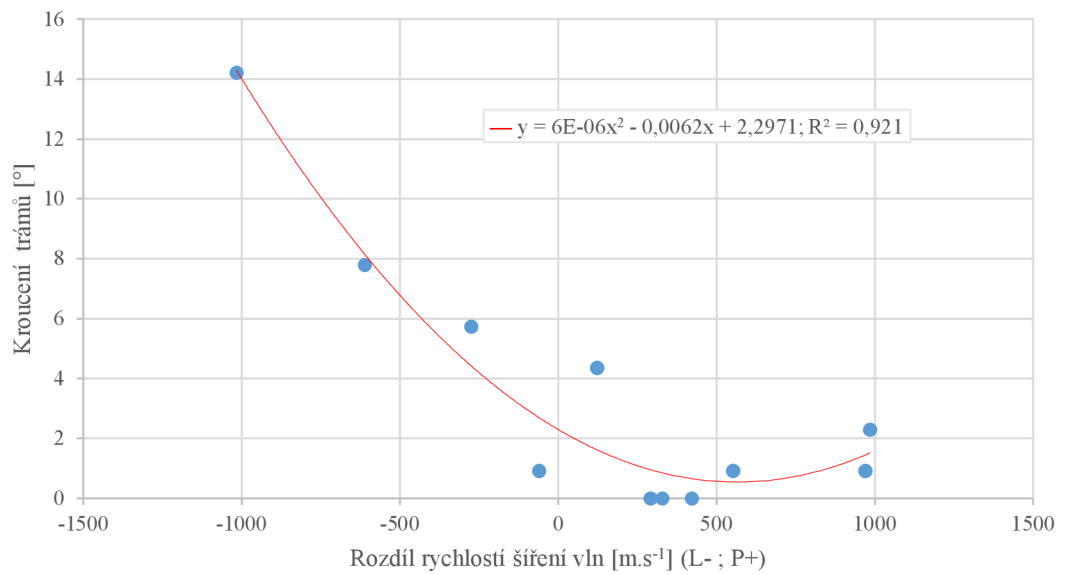
Z grafů je zřejmé, že u levotočivých stromů se můžeme při predikci točitosti z rozdílu rychlostí šíření elastických vln pohybovat do hodnoty $(-250) \text{ m.s}^{-1}$, při dodržování daného schématu měření, aby při sušení trámů nedocházelo k nežádoucímu kroucení (větší než 5° na trámu délky 6 m). Vyšší rozdíly rychlosti šíření elastických vln při levotočivosti než $(-250) \text{ m.s}^{-1}$ znamenají, že takovému dřevu je dobré se vyhýbat z důvodu značné ztráty při pořezu a nákladech na pořízení materiálu. Na druhou stranu rozdíly v rychlosti šíření elastické vlny při pravotočivosti naznačují, že kroucení pilařského výrobku bude minimální i při rozdílu naměřených rychlostí v hodnotě 1000 m.s^{-1} (viz graf 5.11–13).

Fakopp vs kroucení (0–6 m)



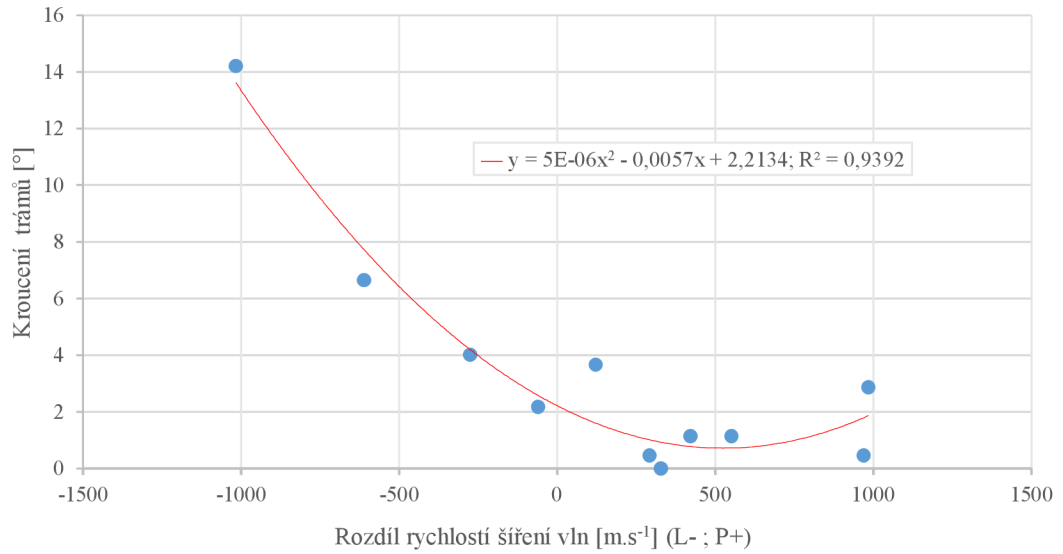
Graf 5.11 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 0–6 m od paty stromu

Fakopp vs kroucení (6–12 m)



Graf 5.12 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 6–12 m od paty stromu

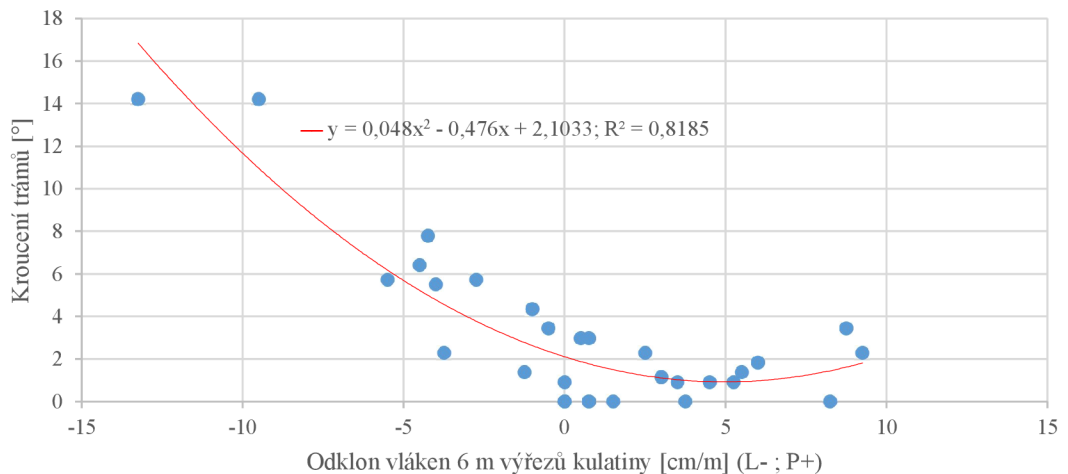
Fakopp vs kroucení (0–12 m)



Graf 5.13 – závislost rozdílu podélných rychlostí elastických vln z Fakoppu měřeno v prsní výšce stromu vs kroucení trámů nařezaných z kulatiny 0–12 m od paty stromu

Z výše uvedených závislostí mezi rozdíly rychlosti šíření elastických vln měřených na stromě pomocí přístroje Fakopp ArborSonic 1D Microsecond Timer a samotným kroucením trámů vyplývá, že se jedná o velmi přesnou predikci, kterou lze získat přímo v lese při zcela neinvazivním měření na stromě. To dokládají závislosti, kdy bylo kroucení trámů predikované přímo z točitosti měřené pomocí črtáku na všech 6 m výřezech kulatiny, kde koeficient determinace $R^2=0,82$ (viz graf 5.14). V tomto případě se jedná o predikci točitosti na výřezu kulatiny, obvykle přímo v lese v průběhu těžby nebo na manipulačním skladě.

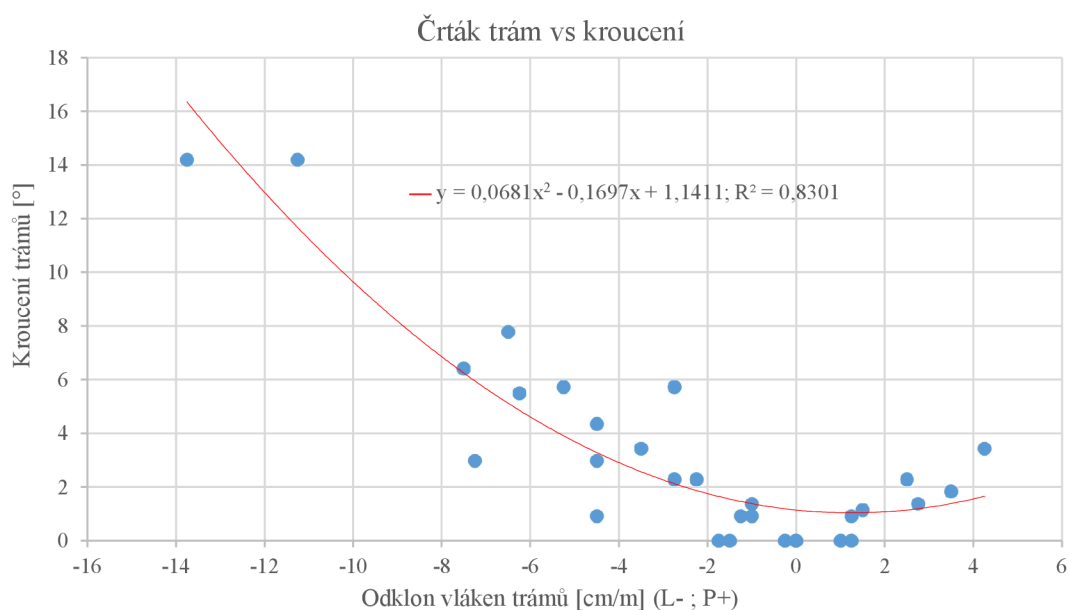
Črták kulatina vs kroucení



Graf 5.14 – závislost točitosti z črtáku měřeno na kulatině 6 m délky vs kroucení trámů

Koeficienty determinace dosahují podobných hodnot jako predikce rozdílů rychlostí pomocí elastických vln měřených přímo na stromě. Odklon vláken při levosměrné točitosti může být max. 2,5 cm/m, aby kroucení trámu bylo max. 5° na délku 6 m výřezu kulatiny (viz graf 5.14). Na rozdíl od levosměrné točitosti se při pravosměrné točitosti odklon vláken zjišťovaný pomocí črtáku může pohybovat až na hodnotě 7,5 cm/m, přičemž kroucení trámu zůstane na úrovni max. 5°/6 m délky výřezu kulatiny. Je tedy možné tvrdit, že točitost a z ní vyplývající problémy při zpracování dřeva pro konstrukční účely je možné eliminovat již přímo v lese při výběru dřeva na stojato nebo na manipulačním skladě. Samozřejmě jde pouze o malé objemy, např. při selekci vhodného dřeva pro rekonstrukce a sanace konstrukčních prvků krovu, stropů či jiných konstrukcí historických staveb. Výsledky této práce dokazují, že točitost vláken je důležitou proměnnou, jenž ovlivňuje kroucení trámů.

Dle analýzy dat lze tvrdit, že odklon točitosti a její směr má značný vliv na kroucení trámů. Zjištěné poznatky o točitosti ukazují, že spirálovitý vzor napříč kmenem vychází z počátečního levého směru, dále pak postupně klesá k obvodu kulatiny a přibližně v polovině případech přechází do pravotočivosti, na což poukázali již autoři (Perstorper a kol. 1995; Forsberg 1999; Kliger 2001; Chambers 2007). Uvedené tvrzení je možné dokázat závislostí točitosti zjišťované pomocí črtáku přímo na trámech ve vztahu k jejich kroucení při přirozeném sušení (graf 5.15).



Graf 5.15 – závislost točitosti z črtáku měřeno na trámu 6 m délky vs kroucení trámů

Rozptyl točitosti při stejném úhlu kroucení trámu je stejný jak na levotočivé, tak na pravotočivé straně (ideálně 0 cm/m). Je to posun vůči točitosti zjišťované na obvodu kulatiny, kde se ideální míra točitosti pohybovala okolo 4 cm/m směrem doprava. Předchozí pozorování naznačovala nedostatek netočitého smrkového dřeva (Säll 2002). Toto zjištění bylo potvrzeno i v této práci měřením na 6 m výřezích kulatiny. Větší torzní stabilitu má pravotočivá kulatina než levotočivá. Zřejmým důvodem větší torzní stability u trámů řezaných z kulatiny, které na povrchu vykazují pravotočivý průběh vláken, je vyvážení vlhkosti smršťovacích napětí (Harris 1989). Napětí ze smrštění měla tendenci působit proti sobě navzájem, pravotočivé dřevo na povrchu kulatiny proti levotočivému ve středové části kmene. Na druhou stranu kulatina, která na povrchu vykazovala levotočivé uspořádání vláken se po opracování na požadovaný trám

200×250×6000 mm bez omezení stáčí vlákna do leva. Dále se prokázalo, že stupeň točitosti má významný vliv na kroucení pilařských výřezů. Dále je z předchozích výzkumů zřejmé, že levotočivé dřevo má nižší pevnost (Lowery, Erickson 1967).

Wellner a Lowery (1967) ve svém výzkumu tvrdili, že dosud nebyl nalezen žádný spolehlivý způsob, jak zjistit přítomnost nebo nepřítomnost točitosti ve stromu nebo kůlu před odkorněním. Praktická metoda by tedy mohla přinést producentům kůlů značné úspory, protože kupující by mohli při nákupu kůlů postupovat selektivněji a vyhnout se nákladům na výrobu a zpracování nevhodného materiálu. Díky metodě měření v této práci však již bude možné predikovat točitost na neodkorněném stromu s vysokou mírou predikce neinvazivním způsobem. Toto tvrzení je založeno na výsledných koeficientech determinace pro všechny možné kombinace závislosti na měření točitosti pomocí přístroje Fakopp ArborSonic 1D Microsecond Timer (viz tab. 5.1), kdy je možné předpovídat točitost a kroucení s pravděpodobností 70–94 %, což vzhledem k organické podstatě a nehomogenitě dřeva lze považovat za velice dobré závislosti.

Tabulka 5.1 – přehled koeficientů determinace v závislosti na měření Fakoppem

| Koeficienty determinace v závislosti na měření přístrojem Fakopp | | | |
|---|--------------|---------------|---------------|
| Pozice ve stromu | 0–6 m | 6–12 m | 0–12 m |
| črták kulatina | 0,9324 | 0,7783 | 0,8687 |
| črták trám | 0,6979 | 0,7682 | 0,8304 |
| kroucení | 0,7892 | 0,921 | 0,9392 |

6. Závěr

Z celkového počtu 22 smrků ztepilých (*Picea abies* (L.) H. Karst.) bylo nařezáno 39 kusů kulatiny o délce 6 metrů. Z 39 kusů 6 m výřezů kulatiny bylo na pásové pile vyřezáno 30 kusů trámů o průřezu 200×250 mm. Cílem práce byla snaha ověřit předpoklad, že výběr dřeva na základě měření točitosti na povrchu kmene značným způsobem snižuje počet pilařských výřezů se sklony ke kroucení. Kvalitu pilařských výřezů významným způsobem ovlivňuje točitost dřeva, kterou je možné neinvazivně zjišťovat již při výběru vhodných stromů v lesním porostu. Jako vhodný nástroj pro určení míry točitosti se osvědčil přístroj pro měření rychlosti šíření elastické vlny Fakopp ArborSonic 1D Microsecond Timer. Měření skutečné točitosti 6 m výřezů kulatiny a vysušených trámů bylo provedeno črtákem na obou koncích těchto prvků.

Na základě výpočtu rozdílů rychlostí šíření zvukových vln dřevem v pravém a levém směru byla určena riziková hranice s hodnotou (-250) m.s⁻¹. S touto hodnotou byly v rizikové skupině stromy 5, 6, 13, 15, 16, 20, 21. Z celého souboru všech 22 stromů se po nařezání a vysušení kroutily nepříjemným způsobem, se vzájemným pootočením čel nad 5°/6 m délky, trámy 5-S, 5-V, 6-S, 15-S, 20-S, 21-S, 21-V. Úspěšná predikce kroucení na základě vytvoření této hranice hodnoty byla v tomto případě přesná u pěti stromů ze sedmi (71,43 %). Ze všech trámů došlo po vysušení k největšímu kroucení u trámů 21-S a 21-V, kde byla čela trámů navzájem pootočena o 14,21°. Naopak trám 14 se stal po vysušení netočitým a kroucení bylo tedy nulové.

Z celého souboru všech 22 stromů bylo na základě zhodnocení rozdílů rychlostí šíření vln predikována levotočivost u 9 stromů, pravotočivost u 13. Po vysušení bylo celkem 19 trámů levotočivých, 2 netočité a 9 pravotočivých, z čehož pod nepříjemnou hranicí odklonu vláken 5 cm/m bylo 6 levotočivých trámů, které byly přístrojem Fakopp predikovány správně. Jedním ze způsobů, jak lze zamezit škodám při zpracování kulatiny na konstrukční prvky, je snížení tolerance při třídění dřeva. Pro zamezení nežádoucího kroucení konstrukčních prvků by bylo vhodné při jejich výrobě omezit použití kulatiny s levosměrnou točitostí z 5 cm/m, uváděných v normách, na 2,5 cm/m. U pravotočivé kulatiny může zůstat točitost 5 cm/m, protože při vyřezání na konstrukční prvky se točitost výsledných prvků sníží na požadované odklony blízké se 0°. Většina konstrukčních trámů měla při sušení tendenci měnit svůj odklon vláken z pravotočivého na levotočivý a z levotočivého na více levotočivý směr. Na nepříjemnou pravotočivost (více než 5 cm/m) se nepřetočil žádný ze všech vysušených trámů. Pro srovnání: U stromu 3 byl naměřen rozdíl hodnot rychlostí šíření zvukových vln 984 m.s⁻¹, výsledný odklon vláken konstrukčních trámů byl u 3-S = 4,3 cm/m a u 3-V = 2,5 cm/m. U stromu 21 byl rozdíl rychlostí šíření zvukových vln (-1016) m.s⁻¹ s odpovídajícím odklonem vláken 21-S = (-11,3) cm/m a 21-V = (-13,8) cm/m.

Rozdíl rychlostí šíření elastických vln naměřených v prsní výšce stromu pro pravotočivý a levotočivý směr šíření dovolují určit míru točitosti 6 m výřezu kulatiny s přesností až 93 %. Při vysychání řeziva byl potvrzen značný vliv levotočivé kulatiny na kroucení pilařských výřezů. Za ideální točitost kulatiny lze považovat rozsah 0 až 7,5 cm/m směrem doprava, v tom případě pak kroucení při sušení konstrukčních trámů dosahuje max. 5° na 6 m délky trámů. Pokud se točitost kulatiny pohybuje v rozsahu 0 až 5 cm/m směrem doleva hrozí kroucení dosahující hodnot 7,5° na 6 m výřezech. Točitost kulatiny větší než 5 cm/m směrem doleva znamená vážné poškození pilařských výřezů, které nelze použít pro konstrukční účely.

Téměř všechny koeficienty determinace pro všechny závislosti na měření Fakoppem se pohybovaly v intervalu ($R^2=0,7-0,94$). Tento interval lze, vzhledem k nehomogenitě a organické podstatě dřeva, považovat za vysokou míru možnosti predikce točitosti výřezů kulatiny či trámů nebo jejich kroucení neinvazivním způsobem.

7. Literární zdroje

7.1 Odborné publikace

- BRAZIER, J. D.: An assessment of the incidence and significance of spiral grain in young conifer stems. *Forest Product Journal*. 1965, **15**, s. 308–312.
- BUES, C. T.: *Untersuchung der Holzqualität von Fichten aus unterschiedlich weit begründeten Beständen Süddeutschlands*. München, 1990. Doctoral Thesis. Ludwig Maximilian Universität München. 149 s.
- FORSBERG, D.: *Warp, in particular twist, of sawn wood of Norway spruce (Picea abies)*. Uppsala, 1999. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
- HARRIS, J. M.: Preliminary studies of spiral grain in radiata pine. *Proc IUFRO Melbourne*. 1965, **41(1)**, 23 s.
- HARRIS, J. M.: *Spiral Grain and Wave Phenomena in Wood Formation*. 1. Berlin: Springer – Verlag, 1989. ISBN 0-387-19382-0.
- CHATTAWAY, M. M.: Spiral grain in Pinus radiata. *CSIRO Forest Products Newsletter*. 1959, **250**, s. 3–4.
- JOHANSSON, M.: *Moisture-induced distortion in Norway spruce timber experiments and models*. Göteborg, 2002. Doctoral Thesis. Chalmers University of Technology Department of Structural Engineering steel and Timber Structures. ISBN 97-7291-148-4.
- KLIGER, R. a H. SÄLL.: *STUD: Improved Spruce Timber Utilizations : Prediction of Twist and Industrial Validation, Sub-task B9.1*. Final Report. Publ. S00.3 Div. of steel and Timber structure, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. 2000, 18 s.
- KLOIBER, M. a M. DRDÁČKÝ.: *Diagnostika dřevěných konstrukcí*. Praha: ČKAIT. Technická knihnice (ČKAIT), 2015. ISBN 978-80-87438-64-0.
- KREMPL, H.: Untersuchungen über den Drehwuchs bei Fichten. *Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt*. 1970, **89**, 117 s.
- OHKURA, S.: On the macroscopic features of twisted fibre in trees. *Journal of the Faculty of Agriculture, Shinshu University, Nagano*. 1958, **8**, s. 59–100.
- OJA, J., S. GRUNDBERG, P. BERG a P. A. FJELLSTRÖM.: *Equipment for measuring fiber angle and heartwood content in sawn wood during transverse feed in green sorting*. SP Report 2006: 16. Borås, Sweden: Swedis National Testing and Research Institute, 2006. ISBN 91-8533-01-7.
- POŽGAJ, A., D. CHOVANEC, S. KURJATKO a M. BABIAK.: *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- ROSS, R. J. a R. F. PELLERIN.: *Nondestructive Evaluation of Wood*. Forest Products Society, Madison. 2002, 210 s.

- SCHMUCKER, T.: Rechts-und Linkstendenz bei Pflanzen. *Beihefte zum botanischen Centralblatt*. 1924, **41**, s. 51–81.
- SMITH, W. J. a J. A. J. SMART.: Factors affecting wood quality in softwood plantations. *Australian T.I.S. Conference, Maryborough, Queensland, Department of Forestry*. 1972.
- STEVENS, W. C. a D. D. JOHNSTON.: Distortion caused by spiralled grain. *Timber Technology*. 1960, **68**(2252), s. 217–218.
- THÖRNQVIST, T.: *Juvenile wood in coniferous trees*. Uppsala, 1990. Report no. 10, Swedish University of Agricultural Sciences, department of Forest-Industry-Market Studies
- TRIBUTSCH, H.: *How life learned to live*. Cambridge: The MIT Press, 1982, 218 s. ISBN 9780262200455

7.2 Elektronické zdroje

- Asknature.org: *Trunk of pine tree withstands wind and snow via spiral growth* [online]. The Biomimicry Institute, 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://asknature.org/strategy/spiral-fibers-strengthen-tree-trunk/#section>
- BÄCKSTRÖM, M., M. JOHANSSON a R. KLIGER.: Properties of timber converted using novel techniques. *Göteborg: Chalmers University of Technology* [online]. 2004 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: https://scholar.google.com/scholar?hl=cs&as_sdt=0%2C5&q=PROPERTIES+OF+TIMBER+CONVERTED+USING+NOVEL+TECHNIQUES&btnG=
- BRAZIER, J. D.: Timber Improvement: I. A Study of the Variation in Wood Characteristics in Young Sitka spruce. *Forestry* [online]. 1967, **40**(2), s. 117–128 [cit. 2023-02-14]. ISSN 0015-752X, 1464-3626. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/40.2.117
- BUCUR, V.: *The Acoustics of Wood* [online]. 1. CRC Press, 1995 [cit. 2023-02-07]. ISBN 978-0-203-71012-8. Dostupné z: doi:10.1201/9780203710128
- BURDON, R. D. a C. B. LOW.: Genetic survey of *Pinus raiata*. 6: wood properties: variation, heritabilities, and interrelationships with other traits. *New Zealand Journal of Forestry Science* [online]. 1992, **22**(2–3), s. 228–245 [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3ce0af95ee6ac3606c8324dc98c72e392900f34d>
- COSTA e SILVA, J., N. BORRALHO a H. WELLENDORF.: Genetic parameter estimates for diameter growth, pilodyn penetration and spiral grain in *Picea abies* (L.) KARST. *Silvae Genetica* [online]. 2000, **49**(1), s. 29–36 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289952911_Genetic_parameter_estimates_for_diameter_growth_pilodyn_penetration_and_spiral_grain_in_Picea_abies_L_KARST

- COWN, D. J., G. D. YOUNG a M. O. KIMBERLEY.: Spiral grain patterns in plantation-grown *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* [online]. 1991, **21**, s. 206–216 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257409749_Spiral_grain_patterns_in_plantation-grown_Pinus_radiata
- COWN, D. J., J. HARRINGTON, D. BOURREAU, J. HAUG a J. LEE.: Spatial variation in spiral grain: A single stem of *Pinus radiata* D.Don. *New Zealand Journal of Forestry Science* [online]. 2010 **40**, s. 211–224 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287116083_Spatial_variation_in_spiral_grain_A_single_stem_of_Pinus_radiata_DDon
- DACKERMANN, U., K. CREWS, B. KASAL, J. LI, M. RIGGIO, F. RINN a T. TANNERT.: In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures* [online]. 2014, **47**(5), s. 787–803 [cit. 2023-02-06]. ISSN 1359-5997, 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-013-0095-4
- DAHLBLOM, O., H. PETERSSON a S. ORMARSSON.: Stiffness, strength and shape stability grading analysis of sawn timber based on experimentally found growth characteristics. *Proceedings of the World conference on timber engineering* [online]. 2000, **31** [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4d3dfc1b642f684858efc64e0e19f63cc692b2c6>
- DANBORG, F.: Spiral grain in plantation trees of *Picea abies*. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. 1994 **24**(8), s. 1662-1671 [cit. 2023-01-15]. ISSN 0045-5067. Dostupné z: doi:10.1139/x94-215
- DAVAL, V., G. POT, M. BELKACEMI, F. MERIAUDEAU a R. COLLET.: Automatic measurement of wood fiber orientation and knot detection using an optical system based on heating conduction. *Optics Express* [online]. 2015, **23**(26), s. 33529-33539 [cit. 2023-02-13]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.23.033529
- DINWOODIE, J. M.: *Timber: Its Nature and Behaviour* [online]. **2**. CRC Press, 2000 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-1-135-80810-5. Dostupné z: doi:10.4324/9780203477878
- EKLUND, L. a H. SÄLL.: The influence of wind on spiral grain formation in conifer trees. *Trees* [online]. 2000, **14**(6), s. 324–328 [cit. 2023-01-20]. ISSN 09311890. Dostupné z: doi:10.1007/s004680050225
- Fakopp Enterprise Bt.: *Microsecond Timer* [online]. Hungary, 2022 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://fakopp.com/en/product/mstimer/>
- FEIO, A. O.: *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour* [online]. Guimaraes, 2005. Doctoral Thesis. Universidade do Minho. 208 s. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/14697>
- FERNANDES, H. C. a X. MALDAGUE.: Fiber orientation assessment in complex shaped parts reinforced with carbon fiber using infrared thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2015, **12**(1), s. 64–79 [cit. 2023-02-04]. ISSN 1768-6733, 2116-7176. Dostupné z: doi:10.1080/17686733.2015.1022351

- FONWEBAN, J., I. MAVROU, B. GARDINER a E. MACDONALD.: Modelling the effect of spacing and site exposure on spiral grain angle on Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain. *Forestry* [online]. 2013, **86**(3), s. 331–342 [cit. 2023-01-26]. ISSN 0015-752X, 1464-3626. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/cpt002
- GAPARE, W., A. HATHORN, D. KAIN, C. MATHESON a H. WU.: Inheritance of spiral grain in the juvenile core of *Pinus radiata*. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. 2007, **37**(1), s. 116–127 [cit. 2023-01-15]. ISSN 0045-5067, 1208-6037. Dostupné z: doi:10.1139/x06-202
- HANSEN, J. K. a H. ROULUND.: Genetic parameters for spiral grain, stem form, pilodyn and growth in 13 years old clones of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). *Silvae Genetica (Germany)* [online]. 1997, **46**(2–3), s. 107–113 [cit. 2023-01-26]. ISSN 0037-5349. Dostupné z: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DE1999T30008>
- HEJNOWICZ, Z.: Tensional stress in the cambium and Its developmental significance. *American Journal of Botany* [online]. 1980, **67**(1), s. 1–5 [cit. 2023-01-18]. ISSN 0002-9122, 1537-2197. Dostupné z: doi:10.1002/j.1537-2197.1980.tb07617.x
- HEJNOWICZ, Z. a B. ZAGÓRSKA-MAREK.: Mechanism of changes in grain inclination in wood produced by storeyed cambium. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* [online]. 1974, **43**(3), s. 381–398 [cit. 2023-01-16]. ISSN 2083-9480. Dostupné z: doi:10.5586/asbp.1974.036
- CHAMBERS, R. W.: Spiral Grain–The Inside Story. *LogBuildingNews* [online]. 2007, **63**, s. 6–8 [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: <https://www.logbuilding.org/SpiralGrain.LBN63.pdf>
- JABLANCZY, A.: Spiral Growth in Juvenile Spruce Seedling. *The Forestry Chronicle* [online]. 1969, s. 44–46 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc45044-1>
- JOHANSSON, G., R. KLIGER a M. PERSTORPER.: Quality of structural timber-product specification system required by end-users. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 1994, **52**(1), s. 42–48 [cit. 2023-01-22]. ISSN 0018-3768, 1436-736X. Dostupné z: doi:10.1007/BF02615017
- JOHANSSON, M., M. PERSTORPER, R. KLIGER a G. JOHANSSON.: Distortion of Norway spruce timber Part 2: Modelling twist. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2001, **59**(3), s. 155–162 [cit. 2023-01-28]. ISSN 0018-3768, 1436-736X. Dostupné z: doi:10.1007/s001070100199
- KANG, H. a R. E. BOOKER.: Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology* [online]. 2002, **36**(1), s. 41–54 [cit. 2023-02-06]. ISSN 0043-7719, 1432-5225. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-001-0129-x
- KASAL, B., G. LEAR a T. TANNERT.: Stress Waves. In: B. KASAL a T. TANNERT, ed. *In Situ Assessment of Structural Timber* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, RILEM State of the Art Reports. 2011, **7**, s. 5–24 [cit. 2023-01-13]. ISBN 978-94-007-0559-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-0560-9_2

- KLIGER, R.: Spiral grain on logs under bark reveals twist-prone raw material. *Forest Products Journal* [online]. 2001, **51**(6), s. 67–73 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA76559709&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&inkaccess=abs&issn=00157473&p=AONE&sw=w&userGroupName=anon%7E9259b053>
- KLIGER, R., G. JOHANSSON, M. JOHANSSON a M. PERSTORPER.: Distortion of Norway spruce timber Part 3: Modelling bow and spring. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2003, **61**(4), s. 241–250 [cit. 2023-01-26]. ISSN 0018-3768, 1436-736X. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-003-0399-0
- KLIGER, R., N. NILSSON a M. JOHANSSON.: Pre-twisting during sawing results in straight studs. *Forest Products Journal* [online]. 2006, **56**(2) [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/255632516_Pre-twisting_during_sawing_results_in_straight_studs
- KLOIBER, M., P. RŮŽIČKA, J. TIPPNER a J. KUNECKÝ.: *Metodika tradičního opracování stavebního dřeva pro konstrukční opravy historických staveb* [online]. Certifikovaná metodika č. 218: Ministerstvo kultury ČR, 2021, 128 s. [cit. 2023-02-01]. ISBN 978-80-7509-777-4. Dostupné z: https://invenio.nusl.cz/record/433264/files/0534427_2020_Kloiber_et_al_Metodika_tradicniho_opracovani_stavebniho_dreva_pro_konstrukcni_opravy_historickyh_staveb.pdf
- KOEHLER, A.: *Guide to determining slope of grain in lumber and veneer* [online]. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1955 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Guide+to+determining+slope+of+grain+in+lumber+and+veneer&author=Koehler%2C+Arthur.&publication_year=1955
- KOLLMANN, F. F. P. a W. A. CÔTÉ.: *Principles of Wood Science and Technology* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968 [cit. 2023-01-26]. ISBN 978-3-642-87930-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-87928-9
- KUBLER, H.: Function of spiral grain in trees. *Trees* [online]. 1991, **5**(3), s. 125–135 [cit. 2023-01-07]. ISSN 0931-1890, 1432-2285. Dostupné z: doi:10.1007/BF00204333
- LEAR, G. Ch.: *Improving the Assessment of In Situ Timber Members with the Use of Nondestructive and Semi-Destructive Testing Techniques* [online]. Raleigh, 2005. MSc Thesis. North Carolina State University [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/941>
- LOWERY, D. P. a E. C. O. ERICKSON.: *Effect of spiral grain on pole twist and bending strength* [online]. Ogden, Utah: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. U.S. Forest Service research paper INT, 1967 [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=effect+of+spiral+grain+on+pole+twist+and+bending+strength&author=Lowery%2C+David+P.&publication_year=1967
- MAKU, T.: Studies on the Heat Conductin in Wood: The present study is a discussion on the results of investigations made hitherto by author on heat conduction in wood. *木材研究: 京都大學木材研究所報告* [online]. 1954, **13**, s. 1–80 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/52793/1/KJ00002615417.pdf>

- Mapy.cz: © Seznam.cz, a.s.: *Poloha smrkového porostu* [online]. ČR, 2023 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?vlastnibody&ut=Nov%C3%BD%20bod&ut=Nov%C3%BD%20bod&ut=Nov%C3%BD%20bod&uc=95SiUxUSBWgQnRsS8fRnfm00V&ud=49%C2%B027%2718.216%22N%2C%2014%C2%B053%2724.715%22E&ud=49%C2%B027%2719.120%22N%2C%2014%C2%B053%2731.127%22E&ud=49%C2%B027%2712.592%22N%2C%2014%C2%B053%2733.097%22E&ud=14%C2%B053%2727.844%22E%2049%C2%B027%2710.181%22N&x=14.8892868&y=49.4534279&z=15>
- MATTHECK, G. C.: *Trees: The Mechanical Design* [online]. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991 [cit. 2023-01-15]. ISBN 978-3-540-54276-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-58207-3
- MAVROU, I.: *Modelling spiral angle in Picea sitchensis* [online]. York, 2007. MSc Thesis. University of York, Department of Mathematics & Biology [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: https://cdn.forestresearch.gov.uk/2007/01/modelling_spiral_angle_in_sitka_spruce.pdf
- MEYER, K. A.: Sprachliche und Literarische Bemerkungen zum Problem „Drehwuchs“. *Mitt Schweiz Anst Forst Versuchswes* [online]. 1949, **26**, s. 331–347 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A24081/datastream/PDF/Meyer-1949-Sprachliche_und_literarische_Bemerkungen_zum-%28published_version%29.pdf
- MOORE, J. R., D. J. COWN a R. B. MCKINLEY.: Modelling spiral grain angle variation in New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science* [online]. 2015, **45**(1), 15 s. [cit. 2023-02-01]. ISSN 1179-5395. Dostupné z: doi:10.1186/s40490-015-0046-7
- NICHOLLS, J. W. P., H. E. DADSWELL a J. M. FIELDING.: The heritability of wood characteristics of *Pinus radiata*. *Silvae Genet* [online]. 1964, **13**(3), s. 68–71 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: http://www.sauerlaender-verlag.com/CMS/fileadmin/content/dokument/archiv/silvaegenetica/13_1964/13-3-68.pdf
- NORTHCOTT, P. L.: Is spiral grain the normal growth pattern? *The Forestry Chronicle* [online]. 1957, **33**(4), s. 335–352 [cit. 2023-01-11]. ISSN 0015-7546, 1499-9315. Dostupné z: doi:10.5558/tfc33335-4
- NYSTRÖM, J.: Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2003, **41**(1–3), s. 91–99 [cit. 2023-01-28]. ISSN 01681699. Dostupné z: doi:10.1016/S0168-1699(03)00045-0
- PAPE, R.: Influence of thinning on spiral grain in Norway spruce grown on highly productive sites in southern Sweden. *Silva Fennica* [online]. 1999, **33**(1) s. 3–12 [cit. 2023-01-10]. ISSN 22424075. Dostupné z: doi:10.14214/sf.666
- PERSTORPER, M., P. J. PELLICANE, I. R. KLIGER a G. JOHANSSON.: Quality of timber products from Norway spruce: Part 1. Optimization, key variables and experimental study. *Wood Science and Technology* [online]. 1995, **29**(3) [cit. 2023-03-30]. ISSN 0043-7719, 1432-5225. Dostupné z: doi:10.1007/BF00204581

- PERSTORPER, M., M. JOHANSSON, R. KLIGER a G. JOHANSSON.: Distortion of Norway spruce timber Part 1: Variation of relevant wood properties. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2001, **59**(1–2), s. 94–103 [cit. 2023-01-24]. ISSN 0018-3768, 1436-736X. Dostupné z: doi:10.1007/s001070050481
- PYSZYŃSKI, W., 1977. Mechanism of formation of spiral grain in Aesculus stems: dissymmetry of deformation of stems caused by cyclic torsion. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* [online]. 1977, **46**(3), s. 501–522 [cit. 2023-01-08]. ISSN 2083-9480. Dostupné z: doi:10.5586/asbp.1977.040
- RAYMOND, C. A.: Genetics of Eucalyptus wood properties. *Annals of Forest Science* [online]. 2002, **59**(5-6), s. 525–531 [cit. 2023-01-08]. ISSN 1286-4560. Dostupné z: doi:10.1051/forest:2002037
- SÄLL, H.: *Spiral grain in Norway spruce* [online]. Växjö, 2002. Doctoral Thesis. Växjö University, Växjö University Press [cit. 2023-01-10]. ISSN 1404-4307. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:206846/FULLTEXT01.pdf>
- SANDOZ, J. L.: Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology* [online]. 1989, **23**(1), s. 95–108 [cit. 2023-02-06]. ISSN 0043-7719, 1432-5225. Dostupné z: doi:10.1007/BF00350611
- SAVIDGE, R. A. a J. L. FARRAR.: Cellular adjustments in the vascular cambium leading to spiral grain formation in conifers. *Canadian Journal of Botany* [online]. 1984, **62**(12), s. 2872–2879 [cit. 2023-01-22]. ISSN 0008-4026. Dostupné z: doi:10.1139/b84-383
- THOMAS, J. a D. A. COLLINGS.: Imaging Spiral Grain in *Pinus radiata* with X-ray Microtomography. In: K. K. PANDEY, V. RAMAKANTHA, S. S. CHAUHAN a A.N. ARUN KUMAR, ed. *Wood is Good* [online]. Singapore: Springer Singapore. 2017, s. 29–36 [cit. 2023-01-24]. ISBN 978-981-10-3113-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-3115-1_3
- THOMAS, J., S. M. DIJKSTRA, J. J. HARRINGTON a D. A. COLLINGS.: Induction of compression wood inhibits development of spiral grain in radiata pine. *IAWA Journal* [online]. 2022, **44**(1), s. 36–62 [cit. 2023-01-28]. ISSN 0928-1541, 2294-1932. Dostupné z: doi:10.1163/22941932-bja10088
- WELLNER, C.A. a D.P. LOWERY.: *Spiral grain: a cause of pole twisting* [online]. Ogden, Utah: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. U.S. Forest Service research paper INT, 1967 [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: doi:10.5962/bhl.title.68904
- WŁOCH, W., E. MAZUR a M. BELTOWSKI.: Formation of spiral grain in the wood of *Pinus sylvestris* L. *Trees* [online]. 2002, **16**(4), s. 306–312 [cit. 2023-01-19]. ISSN 09311890. Dostupné z: doi:10.1007/s00468-002-0174-6
- ZAGÓRSKA-MAREK, B. a C. H. A. LITTLE.: Control of fusiform initial orientation in the vascular cambium of *Abies balsamea* stems by indol-3-ylacetic acid. *Journal canadien de botanique* [online]. 1986, **64**, s. 1120–1128 [cit. 2023-01-16]. ISSN 0008-4026. Dostupné z: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/b86-154>

ZOBEL, B., R. W. STONECYPHER a C. BROWNE.: Inheritance of Spiral Grain in Young Loblolly Pine. *Forest Science* [online]. 1968, **14(4)**, s. 376–379 [cit. 2023-01-29]. ISSN 0015-749X. Dostupné z: doi:10.1093/forestscience/14.4.37

7.3 Legislativní zdroje

ČSN 48 0205.: *Surové dříví. Kulatina. Názvy a definice vad*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1983. 16 s. Třídící znak 480205.

ČSN EN 844.: *Kulatina a řezivo – Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. 104 s. Třídící znak 490016

EN 1310.: *Round and sawn timber - Method of measurement of features*. 1997. 18 s.

8. Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka s naměřenými hodnotami – Fakopp 1D Microsecond Timer

Příloha 2: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 0 m

Příloha 3: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 6 m

Příloha 4: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 12 m

Příloha 5: Tabulka s průměrnými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 0–6 m

Příloha 6: Tabulka s průměrnými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 6–12 m

Příloha 7: Tabulka s průměrnými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 0–12 m

| ČÍSLO PRVKU | FAKOPP | | | | |
|----------------|---------------|------------------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| | SMĚR LEVÝ A-B | | SMĚR PRAVÝ C-D | | ROZDÍL |
| | μs | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | μs | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| 1 | 145 | 3448 | 125 | 4000 | 552 |
| 2 | 138 | 3623 | 126 | 3968 | 345 |
| 3 | 152 | 3289 | 117 | 4274 | 984 |
| 4 | 136 | 3676 | 126 | 3968 | 292 |
| 5 | 121 | 4132 | 142 | 3521 | -611 |
| 6 | 117 | 4274 | 140 | 3571 | -702 |
| 7 | 148 | 3378 | 115 | 4348 | 969 |
| 8 | 130 | 3846 | 126 | 3968 | 122 |
| 9 | 141 | 3546 | 121 | 4132 | 586 |
| 10 | 130 | 3846 | 127 | 3937 | 91 |
| 11 | 134 | 3731 | 127 | 3937 | 206 |
| 12 | 128 | 3906 | 130 | 3846 | -60 |
| 13 | 124 | 4032 | 135 | 3704 | -329 |
| 14 | 135 | 3704 | 124 | 4032 | 329 |
| 15 | 130 | 3846 | 140 | 3571 | -275 |
| 16 | 122 | 4098 | 156 | 3205 | -893 |
| 17 | 134 | 3731 | 130 | 3846 | 115 |
| 18 | 141 | 3546 | 126 | 3968 | 422 |
| 19 | 136 | 3676 | 140 | 3571 | -105 |
| 20 | 128 | 3906 | 138 | 3623 | -283 |
| 21 | 112 | 4464 | 145 | 3448 | -1016 |
| 22 | 140 | 3571 | 123 | 4065 | 494 |

Příloha 1: Tabulka s naměřenými hodnotami – Fakopp 1D ArborSonic Microsecond Timer

| ČÍSLO PRVKU | 0 m | | | | | | | |
|----------------|-------------|-----|----------------|-----|------|------------|-----|-------|
| | PRŮMĚR KUL. | | ČRTÁK KULATINA | | | ČRTÁK TRÁM | | |
| | mm | mm | směr | mm | cm/m | směr | mm | cm/m |
| 1 | 410 | 440 | P | 10 | 5,0 | P | 7 | 3,5 |
| 2 | 450 | 480 | P | 6 | 3,0 | P | 3 | 1,5 |
| 3 | 430 | 440 | P | 20 | 10,0 | P | 7 | 3,5 |
| 4 | 440 | 460 | P | 4 | 2,0 | L | -7 | -3,5 |
| 5 | 360 | 370 | L | -7 | -3,5 | L | -12 | -6,0 |
| 6 | 420 | 410 | L | -10 | -5,0 | L | -10 | -5,0 |
| 7 | 620 | 620 | P | 15 | 7,5 | P | 4 | 2,0 |
| 8 | 580 | 600 | P | 4 | 2,0 | L | -8 | -4,0 |
| 9 | 480 | 500 | P | 14 | 7,0 | P | 10 | 5,0 |
| 10 | 360 | 370 | P | 3 | 1,5 | L | -2 | -1,0 |
| 11 | 360 | 380 | P | 3 | 1,5 | L | -17 | -8,5 |
| 12 | 420 | 420 | 0 | 0 | 0,0 | L | -6 | -3,0 |
| 13 | 390 | 410 | L | -5 | -2,5 | L | -2 | -1,0 |
| 14 | 600 | 570 | P | 3 | 1,5 | 0 | 0 | 0,0 |
| 15 | 430 | 430 | L | -5 | -2,5 | L | -5 | -2,5 |
| 16 | 540 | 540 | L | -10 | -5,0 | / | / | / |
| 17 | 350 | 370 | 0 | 0 | 0,0 | L | -4 | -2,0 |
| 18 | 510 | 530 | P | 8 | 4,0 | L | -3 | -1,5 |
| 19 | 420 | 440 | 0 | 0 | 0,0 | / | / | / |
| 20 | 390 | 400 | L | -5 | -2,5 | L | -11 | -5,5 |
| 21 | 420 | 420 | L | -15 | -7,5 | L | -20 | -10,0 |
| 22 | 450 | 480 | P | 7 | 3,5 | / | / | / |

Příloha 2: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 0 m

| ČÍSLO PRVKU | 6 m | | | | | | | |
|----------------|-------|-----|----------------|-----|-------|------------|-----|-------|
| | PRŮM. | | ČRTÁK KULATINA | | | ČRTÁK TRÁM | | |
| | mm | mm | směr | mm | cm/m | směr | mm | cm/m |
| 1 | 370 | 430 | P | 12 | 6,0 | P | 4 | 2,0 |
| 2 | 390 | 440 | P | 6 | 3,0 | P | 3 | 1,5 |
| 3 | 380 | 400 | P | 15 | 7,5 | P | 10 | 5,0 |
| 4 | 400 | 430 | P | 10 | 5,0 | P | 2 | 1,0 |
| 5 | 330 | 340 | L | -9 | -4,5 | L | -13 | -6,5 |
| 6 | 360 | 370 | L | -8 | -4,0 | L | -20 | -10,0 |
| 7 | 390 | 400 | P | 18 | 9,0 | P | 1 | 0,5 |
| 8 | 370 | 380 | L | -2 | -1,0 | L | -10 | -5,0 |
| 9 | 350 | 350 | P | 10 | 5,0 | P | 4 | 2,0 |
| 10 | 330 | 330 | P | 3 | 1,5 | P | 1 | 0,5 |
| 11 | 330 | 340 | P | 0 | 0,0 | L | -12 | -6,0 |
| 12 | 360 | 400 | L | -2 | -1,0 | L | -8 | -4,0 |
| 13 | 340 | 350 | 0 | 0 | 0,0 | L | -2 | -1,0 |
| 14 | 390 | 410 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 15 | 390 | 400 | L | -10 | -5,0 | L | -6 | -3,0 |
| 16 | 370 | 390 | L | -7 | -3,5 | / | / | / |
| 17 | 330 | 340 | 0 | 0 | 0,0 | L | -3 | -1,5 |
| 18 | 330 | 340 | P | 2 | 1,0 | L | -6 | -3,0 |
| 19 | 370 | 380 | L | -2 | -1,0 | / | / | / |
| 20 | 360 | 360 | L | -6 | -3,0 | L | -10 | -5,0 |
| 21 | 390 | 400 | L | -23 | -11,5 | L | -25 | -12,5 |
| 22 | 420 | 430 | P | 12 | 6,0 | / | / | / |

Příloha 3: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 6 m

| ČÍSLO PRVKU | 12 m | | | | | | | |
|----------------|-------|-----|----------------|-----|-------|------------|-----|-------|
| | PRŮM. | | ČRTÁK KULATINA | | | ČRTÁK TRÁM | | |
| | mm | mm | směr | mm | cm/m | směr | mm | cm/m |
| 1 | 340 | 350 | P | 6 | 3 | P | 1 | 0,5 |
| 2 | 350 | 390 | P | 6 | 3 | / | / | / |
| 3 | 350 | 350 | P | 22 | 11 | 0 | 0 | 0,0 |
| 4 | 370 | 380 | P | 5 | 3 | P | 2 | 1,0 |
| 5 | 300 | 300 | L | -8 | -4 | L | -13 | -6,5 |
| 6 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 7 | 360 | 370 | P | 3 | 1,5 | L | -5 | -2,5 |
| 8 | 330 | 340 | L | -2 | -1,0 | L | -8 | -4,0 |
| 9 | 300 | 320 | P | 8 | 4,0 | / | / | / |
| 10 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 11 | 290 | 300 | L | -3 | -1,5 | / | / | / |
| 12 | 320 | 330 | P | 2 | 1,0 | L | -10 | -5,0 |
| 13 | 300 | 320 | 0 | 0 | 0,0 | / | / | / |
| 14 | 370 | 350 | P | 3 | 1,5 | 0 | 0 | 0,0 |
| 15 | 340 | 360 | L | -12 | -6,0 | L | -5 | -2,5 |
| 16 | 320 | 340 | L | -5 | -2,5 | / | / | / |
| 17 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 18 | 310 | 330 | L | -2 | -1,0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 19 | 330 | 340 | 0 | 0 | 0,0 | / | / | / |
| 20 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| 21 | 370 | 370 | L | -30 | -15,0 | L | -30 | -15,0 |
| 22 | / | / | / | / | / | / | / | / |

Příloha 4: Tabulka s naměřenými hodnotami – črták kulatina + trám; 12 m

| ČÍSLO PRVKU | 0-6 m (spodní kulatina; trám) | | | | | |
|-------------|-------------------------------|------|------------|-------|----------|-------|
| | ČRTÁK KULATINA | | ČRTÁK TRÁM | | KROUCENÍ | |
| | směr | cm/m | směr | cm/m | mm | ° |
| 1 | P | 5,5 | P | 2,8 | 6 | 1,38 |
| 2 | P | 3,0 | P | 1,5 | 5 | 1,15 |
| 3 | P | 8,8 | P | 4,3 | 15 | 3,44 |
| 4 | P | 3,5 | L | -1,3 | 4 | 0,92 |
| 5 | L | -4,0 | L | -6,3 | 24 | 5,50 |
| 6 | L | -4,5 | L | -7,5 | 28 | 6,42 |
| 7 | P | 8,3 | P | 1,3 | 0 | 0,00 |
| 8 | P | 0,5 | L | -4,5 | 13 | 2,98 |
| 9 | P | 6,0 | P | 3,5 | 8 | 1,83 |
| 10 | P | 1,5 | L | -0,3 | 0 | 0,00 |
| 11 | P | 0,8 | L | -7,3 | 13 | 2,98 |
| 12 | L | -0,5 | L | -3,5 | 15 | 3,44 |
| 13 | L | -1,3 | L | -1,0 | 6 | 1,38 |
| 14 | P | 0,8 | 0 | 0,0 | 0 | 0,00 |
| 15 | L | -3,8 | L | -2,8 | 10 | 2,29 |
| 16 | L | -4,3 | | | | |
| 17 | 0 | 0,0 | L | -1,8 | 0 | 0,00 |
| 18 | P | 2,5 | L | -2,3 | 10 | 2,29 |
| 19 | L | -0,5 | | | | |
| 20 | L | -2,8 | L | -5,3 | 25 | 5,73 |
| 21 | L | -9,5 | L | -11,3 | 62 | 14,21 |
| 22 | P | 4,8 | | | | |

Příloha 5: Tabulka se zprůměrovanými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 0–6 m

| ČÍSLO PRVKU | 6-12 m (vrchní kulatina; trám) | | | | | |
|-------------|--------------------------------|-------|------------|-------|----------|-------|
| | ČRTÁK KULATINA | | ČRTÁK TRÁM | | KROUCENÍ | |
| | směr | cm/m | směr | cm/m | mm | ° |
| 1 | P | 4,5 | P | 1,3 | 4 | 0,92 |
| 2 | P | 3,0 | | | | |
| 3 | P | 9,3 | P | 2,5 | 10 | 2,29 |
| 4 | P | 3,8 | P | 1,0 | 0 | 0,00 |
| 5 | L | -4,3 | L | -6,5 | 34 | 7,79 |
| 6 | | | | | | |
| 7 | P | 5,3 | L | -1,0 | 4 | 0,92 |
| 8 | L | -1,0 | L | -4,5 | 19 | 4,35 |
| 9 | P | 4,5 | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | L | -0,8 | | | | |
| 12 | 0 | 0,0 | L | -4,5 | 4 | 0,92 |
| 13 | 0 | 0,0 | | | | |
| 14 | P | 0,8 | 0 | 0,0 | 0 | 0,00 |
| 15 | L | -5,5 | L | -2,8 | 25 | 5,73 |
| 16 | L | -3,0 | | | | |
| 17 | | | | | | |
| 18 | 0 | 0,0 | L | -1,5 | 0 | 0,00 |
| 19 | L | -0,5 | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 21 | L | -13,3 | P | -13,8 | 62 | 14,21 |
| 22 | | | | | | |

Příloha 6: Tabulka se zprůměrovanými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 6–12 m

| ČÍSLO PRVKU | 0-12 m (celá délka kulatiny; trámu) | | | | | |
|----------------|-------------------------------------|-------|------------|-------|----------|-------|
| | ČRTÁK KULATINA | | ČRTÁK TRÁM | | KROUCENÍ | |
| | směr | cm/m | směr | cm/m | mm | ° |
| 1 | P | 4,7 | P | 2,0 | 5,0 | 1,15 |
| 2 | P | 3,0 | / | / | / | / |
| 3 | P | 9,5 | P | 2,8 | 12,5 | 2,86 |
| 4 | P | 3,2 | L | -0,5 | 2,0 | 0,46 |
| 5 | L | -4,0 | L | -6,3 | 29,0 | 6,65 |
| 6 | / | / | / | / | / | / |
| 7 | P | 6,0 | 0 | 0,0 | 2,0 | 0,46 |
| 8 | 0 | 0,0 | L | -4,3 | 16,0 | 3,67 |
| 9 | P | 5,3 | / | / | / | / |
| 10 | / | / | / | / | / | / |
| 11 | 0 | 0,0 | / | / | / | / |
| 12 | 0 | 0,0 | L | -4,0 | 9,5 | 2,18 |
| 13 | L | -0,8 | / | / | / | / |
| 14 | P | 1,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| 15 | L | -4,5 | L | -2,7 | 17,5 | 4,01 |
| 16 | L | -3,7 | / | / | / | / |
| 17 | / | / | / | / | / | / |
| 18 | P | 1,3 | L | -1,5 | 5,0 | 1,15 |
| 19 | L | -0,3 | / | / | / | / |
| 20 | / | / | / | / | / | / |
| 21 | L | -11,3 | L | -12,5 | 62,0 | 14,21 |
| 22 | / | / | / | / | / | / |

Příloha 7: Tabulka se zprůměrovanými hodnotami – črták kulatina + trám + kroucení; 0–12 m