

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA

ÚSTAV NAUKY O DŘEVĚ

ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOLÍČNÍKŮ PIANA

Bakalářská práce

Zadávací list

*Prohlašuji, že jsem práci **analýza mechanických vlastností kličníků piana** zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

Petr Zatloukal

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat především rodičům a prarodičům za všestrannou podporu při studiu. Dále Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a cenné rady při tvorbě této práce. Chci poděkovat také firmě Petrof s.r.o., díky které tato práce mohla vzniknout.

Zvláštní poděkování patří učitelskému sboru SŠ stavební a dřevozpracující v Ostravě, a to především Miroslavu Hanzlíkovi za kvalitní odborný výcvik a Ing. Mgr. Petru Kovalovi, díky kterému jsem pokračoval dále ve studiu.

Poděkovat bych chtěl také: Bc. Tadeáši Doskočilovi, firmě Rotana, Miloslavu Sýkorovi a dalším.

Jméno autora: Petr Zatloukal

Název bakalářské práce: Analýza mechanických vlastností kolíčnicků piana.

Abstrakt:

Tato práce se zaměřuje na analýzu mechanických vlastností různých druhů kolíčnicků piana. Byly použity tři typy kolíčnicků z vícevrstvé bukové překližky tří odlišných výrobců. Kolíčnický byly rozčleněny na osm úseků, odvrtny a osazeny ladícími kolíky. Pomocí momentového klíče byl měřen moment dotažení ladících kolíků v závislosti na průměru vrtání. Pomocí odporové mikrovrtáčky Resistograph byl měřen mechanický odpor materiálu. Gravimetricky byla stanovena vlhkost materiálu a distribuce hustoty v kolíčnicích. Na univerzálním zkušebním stroji byly stanoveny: tvrdosti dle Janky a Brinella, mechanické vlastnosti při zkoušce v tlaku v rovině desky. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí statistických metod a mezi sebou korelovány. Dále byl sestaven konečně-prvkový model ve výpočetním programu ANSYS, s cílem objasnit míru namáhání okolí otvoru. Byly zjištěny statisticky významné rozdíly vlastností u jednotlivých typů kolíčnicků (především hustota, tvrdost a pevnost v tlaku a moment dotažení). Tvrdost se významně liší při zkoušce kolmo na vlákna v ploše a podél vláken v hraně. Měření v jednotlivých úsecích kolíčnicků přinesla nestejněměrné výsledky a neukázaly se statisticky významné rozdíly. Významná závislost byla zjištěna pouze mezi těmito vlastnostmi: typ A – distribuce hustoty a mechanické vlastnosti v ploše, distribuce hustoty a moment dotažení po rozvolnění. Typ B – odpor mikrovrtáčky a moment dotažení po 14 dnech, distribuce hustoty a mechanické vlastnosti v ploše. Typ C – distribuce hustoty a moment dotažení kolíků po naražení a po rozvolnění. Přesnějších výsledků by bylo dosaženo při větším počtu měření a na více kusech kolíčnicků.

Klíčová slova: kolíčnick, vícevrstvá překližka, hustota, mez pevnosti, modul pružnosti, moment dotažení, ladící kolík, piano, MKP

The author name: Petr Zatloukal

Title of the thesis: Analysis of mechanical properties of piano pin blocks.

Abstract:

This work focuses on the analysis of the mechanical properties of piano pin blocks. Three pin block types were used, all made from multi-layered beech-plywood. Pin block were divided to eight sections, drilled and fitted by tuning pins. Tightening torque of tuning pins was measured using a torque wrench, depending on the diameter of the hole. Mechanical resistance of the material was measured by microdrill Resistograph. Density distribution in pin blocks and moisture content were determined with gravimetric method. The universal testing machine was used for determination of Janky's and Brinell's hardness, the mechanical properties in compression in plane of the board. Results of tests were evaluated using statistical methods and cross-correlated. A finite-element model in ANSYS software was built, in order to clarify the degree and distribution of stress around the hole for tuning pin. Statistically significant differences were found for properties of individual types of pin blocks (especially the density, hardness and compressive strength and tightening torque). Hardness differs significantly when tested perpendicular to the fibers in the plane and along the fibers in the edge. Measurements in individual sections of pin block brought uneven results and did not show statistically significant differences. Significant correlation was found only between the following characteristic: type A – the density distribution and the mechanical properties of the plane, density distribution and tightening torque after loosening. Type B – Resistograph resistance and tightening torque after 14 days, the density distribution and mechanical properties of the plane. Type C – density distribution and tightening torque after driving and loosening. Accurate results would be achieved by multiple measurements on multiple pieces of the pin blocks.

Keywords: pin block, multi-layered plywood, density, breaking strength, modulus of elasticity, tightening torque, tuning pin, grand piano, FEM

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Schéma vrtání.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 2: Vrtání količnicku.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3: Výkres stupňovitého vrtáku.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4: Nabíjení kolíků.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5: Měření rezistografem.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 6: Sušení vzorků.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 7: Způsob měření tvrdosti.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 8: Měření tvrdosti v hraně.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 9: Znázornění tuhosti a práce v pracovním diagramu.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 10: Způsob měření pevnosti v tlaku.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 11: Měření pevnosti v tlaku.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 12: Síťování objektu.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 13: Definování posunutí.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 14: Průběh momentu dotažení v úsecích po naražení – typ A.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 15: Průměrný odpor jednotlivých typů vrtáků u typu A.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 16: Rozložení odporu podle rezistografu – typ A.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 17: Pracovní diagramy tvrdosti v hraně – typ A.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 18: Pracovní diagramy měření v ploše – typ A.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 19: Distribuce hustoty v količnicku typu A.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 20: Pracovní diagramy měření – typ A.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 21: Průběh momentů v jednotlivých úsecích - typ B.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 22: Průběh odporu podle rezistografu – typ B.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 23: Pracovní diagramy měření tvrdosti v hraně – typ B.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 24: Pracovní diagramy tvrdosti v ploše – typ B.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 25: Distribuce hustoty u typu B.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 26: Pracovní diagramy pevnosti v tlaku – typ B.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 27: Průběh momentů dotažení po naražení v úsecích – typ C.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 28: Průběh odporu v úsecích podle rezistografu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 29: Pracovní diagramy tvrdosti v hraně – typ C.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 30: Pracovní diagramy tvrdosti v ploše – typ C.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 31: Distribuce hustoty v količnicku – typ C.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 32: Pracovní diagramy pevnosti v tlaku – typ C.....</i>	<i>61</i>

<i>Obrázek 33: Deformace u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 34: Napětí v ose x u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 35: Napětí v ose y u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 36: Ekvivalentní napětí u typu C a vrtáku 6,5 mm</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 37: Přehled napětí u vrtáku – typ A</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 38: Přehled napětí u vrtáků – typ B</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 39: Přehled napětí u vrtáků – typ C</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 40: Průměrné momenty dotažení u všech typů.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 41: Momenty dotažení všech měření – typ A.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 42: Momenty dotažení všech měření – typ B.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 43: Momenty dotažení všech měření – typ C.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 44: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ A.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 45: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ B.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 46: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ C</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 47: Grafické zobrazení průběhu.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 48: Jankova tvrdost u všech typů</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 49: Průběh práce do meze pevnosti</i>	<i>72</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ A</i>	35
<i>Tabulka 2: Moment dotažení po naražení u vrtáků – typ A</i>	35
<i>Tabulka 3: Celkový přehled hodnot po naražení – typ A</i>	36
<i>Tabulka 4: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ A</i>	37
<i>Tabulka 5: Celkový přehled hodnot po rozvolnění u typu A</i>	38
<i>Tabulka 6: Moment dotažení po 14 dnech v úsecích – typ A</i>	38
<i>Tabulka 7: Celkový přehled hodnot po 14 dnech – typ A</i>	38
<i>Tabulka 8: Korelace mezi momenty po naražení a odporem u rezistografu</i>	40
<i>Tabulka 9: Statistika měření v hraně – typ A</i>	41
<i>Tabulka 10: Statistika měření v ploše – typ A</i>	42
<i>Tabulka 11: Měření pevnosti v tlaku – typ A</i>	44
<i>Tabulka 12: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ B</i>	45
<i>Tabulka 13: Moment dotažení po naražení u vrtáků – typ B</i>	45
<i>Tabulka 14: Celkový přehled momentů – typ B</i>	45
<i>Tabulka 15: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ B</i>	47
<i>Tabulka 16: Celkový přehled hodnot po rozvolnění u typu B</i>	47
<i>Tabulka 17: Moment dotažení v úsecích po 14 dnech – typ B</i>	47
<i>Tabulka 18: Celkový přehled momentu dotažení po 14 dnech u typu B</i>	47
<i>Tabulka 19: Korelace s odporem po 14 dnech u typu B</i>	49
<i>Tabulka 20: Měření tvrdosti v hraně – typ B</i>	49
<i>Tabulka 21: Tvrdost z plochy – typ B</i>	50
<i>Tabulka 22: Pevnost v tlaku – typ B</i>	52
<i>Tabulka 23: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ C</i>	53
<i>Tabulka 24: Moment dotažení v závislosti na vrtácích – typ C</i>	53
<i>Tabulka 25: Celkový přehled hodnot po naražení u typu C</i>	54
<i>Tabulka 26: Scheffeho test mezi úseky po naražení pro typ C</i>	54
<i>Tabulka 27: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ C</i>	55
<i>Tabulka 28: Celkový přehled momentů po rozvolnění u typu C</i>	56
<i>Tabulka 29: Moment dotažení po 14 dnech v úsecích – typ C</i>	56
<i>Tabulka 30: Celkový přehled hodnot momentu po 14 dnech pro typ C</i>	56
<i>Tabulka 31: Korelace mezi momenty po naražení a odporem z rezistografu</i>	57
<i>Tabulka 32: Tvrdost v hraně – typ C</i>	58

<i>Tabulka 33: Tvrdost v ploše – typ C</i>	59
<i>Tabulka 34: Hodnoty pevnosti v tlaku – typ C</i>	61
<i>Tabulka 35: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu A</i>	64
<i>Tabulka 36: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu B</i>	64
<i>Tabulka 37: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu C</i>	64
<i>Tabulka 38: Přehled průměrných odporů rezistografu v úsecích</i>	71

Obsah

1	Úvod	13
2	Cíl práce.....	15
3	Literární přehled	16
3.1	Historie, konstrukce a vývoj piana.....	16
3.2	Kolíčnick, ostrunění a litinový rám, řešení výrobců.....	18
3.3	Výzkum v oblasti akustiky hudebních nástrojů	21
4	Metodika.....	24
4.1	Odvrtání kolíčnicku	24
4.2	Nabíjení kolíků.....	26
4.3	Měření momentu	26
4.4	Měření odporu rezistografem.....	27
4.5	Měření hustoty a vlhkosti.....	28
4.6	Měření distribuce hustoty.....	29
4.7	Měření tvrdosti a pevnosti v tlaku.....	29
4.8	Sestavení konečně-prvkového modelu.....	32
5	Výsledky.....	35
5.1	Měření momentu dotažení u typu A.....	35
5.1.1	Měření po naražení	35
5.1.2	Měření po rozvolnění a 14 dnech	37
5.2	Měření odporu rezistografem.....	39
5.3	Měření hustoty a dalších mechanických vlastností	40
5.4	Měření momentu dotažení u typu B.....	45
5.4.1	Měření po naražení	45
5.4.2	Měření po rozvolnění a po 14 dnech	47
5.5	Měření rezistografem	48
5.6	Měření hustoty a dalších mechanických vlastností	49
5.7	Měření momentu dotažení u typu C.....	53
5.7.1	Měření po naražení	53
5.7.2	Měření po rozvolnění a po 14 dnech	55
5.8	Měření rezistografem	57
5.9	Měření hustoty a ostatních mechanických vlastností.....	58

5.10	Konečně-prvkový model	61
5.11	Dodatečná diskuze	66
6	Závěr	74
7	Summary	76
8	Seznam použité literatury	77
8.1	Literatura	77
8.2	Patenty	80
8.3	Online zdroje	81
	Seznam příloh	82
9	Přílohy	83

1 Úvod

Můžeme se pouze domnívat, kdy poprvé člověk poklepal dřevem o nějaký předmět či dvěma kusy dřev o sebe a zjistil tím, že dřevo vede perfektně zvuk. Tím zcela jistě položil základy pro výrobu hudebních nástrojů. Od této doby se hudební nástroje vyvíjely až prakticky do dnešní doby a dá se očekávat, že vývoj bude dále pokračovat.

Piano lze považovat za jeden z nejsložitějších a nejsložitějších nástrojů vůbec. Hovoří o tom pouze počet součástí klavírní mechaniky pohybující se kolem 5000 a to ještě vyjma vrutů, spojek, os, oplstění apod. (Bonhard, Prach 1958). Často je tedy považován za vrchol vývoje strunných nástrojů.

Klavír dospěl do své finální podoby ve 20. letech 20. století. Od této doby se již, až na drobné rozdíly, uchovala jeho podoba až dodnes. Nejmarkantnější je v dnešní době nejspíš vývoj skříně klavíru jakožto nejviditelnější části nástroje. Klavír je totiž bezesporu významným prvkem interiéru a právě s jeho skříní přichází jak hráč, tak posluchač nejčastěji do styku. Nicméně je lidskou přirozeností neustále věci zdokonalovat a proto i klavír a jeho části je častým tématem výzkumů.

Nejčastěji zkoumaným prvkem je rezonanční deska. Bezesporu proto, že tvoří jakési „srdce“ klavíru, které zesiluje kmitání strun a má velký vliv na výsledný zvuk. Je často přirovnávána k membráně u reproduktoru. Nicméně v nástroji se nachází další prvky, kterým je potřeba taktéž věnovat pozornost. Jsou to především struny, kobylka, mechanika nebo kolíčník. Předložená práce se bude věnovat právě kolíčníku, který má vliv na stabilitu a trvanlivost ladění.

Dnes je známo, že piano je třeba ladit před každým koncertem a při velmi dlouhých koncertech dokonce doladovat i v jeho průběhu. Když vlastníme klavír nebo pianino, doporučuje se návštěva ladiče alespoň jednou ročně a nebo vždy po stěhování klavíru, což majitelé často nerespektují nejspíš z důvodu jisté časové a finanční náročnosti tohoto úkonu. Často hráči argumentují tím, že nástroj není potřeba ladit a že zní stále dobře, ale to je z toho důvodu, že si přivykli na zvuk pomalu se rozladujícího nástroje. Při naladění nástroje je ihned znát rozdíl a to především v diskantech, kde je tah strun, díky jejich počtu, největší.

Z předešlých důvodů je zřejmé, že výzkumu stabilitě ladění je třeba věnovat zvýšenou pozornost, aby bylo ladění co možná nejtrvanlivější. Ono rozladění piana je způsobeno

snížením tenze strun. Tento pokles se děje z důvodu, že kolíky, uchycené v kolíčnicku se mírně pootočí a tím povolí tah struny. Míra pootočení je dána především mechanicko-fyzikálními vlastnostmi kolíčnicku a také v neposlední řadě způsobem výroby – tedy vrtáním.

Tato práce se tedy pokusí objasnit jaký vliv má způsob vrtání společně s mechanickými vlastnostmi kolíčnicku na moment dotažení kolíku.

2 Cíl práce

Cílem této práce je stanovit mechanické vlastnosti jako je tvrdost, modul pružnosti, mez pevnosti v tlaku, práce do meze pevnosti a dále odpor proti otočení ladícího kolíku v závislosti na výrobci překližky, ze které je kolíčník vyroben. Dále pak určit vliv vrtání pomocí různých průměrů vrtáku na odpor proti otočení kolíku a také zjistit distribuci hustoty v samotném kolíčníku.

V práci jsou porovnávány tři druhy kolíčníků, popsány jako typ A, typ B a typ C. Odpor proti otočení bude měřen pomocí momentového klíče s číselníkovým úchylkoměrem a tento bude měřen ihned po naražení kolíku, poté po rozvolnění pomocí ladícího klíče a nakonec po dvou týdnech. Bude provedeno rovněž doplňující měření odporu pomocí rezistografu a to průběžně po celé délce kolíčníku.

Naměřené hodnoty budou statisticky vyhodnoceny a bude mezi nimi hledána případná korelace. Nakonec bude sestaven konečně-prvkový model, který bude simulovat tlak, způsobený zaraženým kolíkem.

3 Literární přehled

3.1 Historie, konstrukce a vývoj piana

Piano, jak jej známe v dnešní podobě, se řadí mezi nástroje strunné-úderné (Modr 1977). Tato skupina má ještě dvě podskupiny a to podle způsobu rozechvívání strun – pomocí klaviatury a pomocí paliček. Struny rozechvíváné pomocí paliček nalezneme u cimbálu a rozechvíváné pomocí klaviatury u klavíru či pianina.

Všeobecně se má za to, že první primitivní nástroj, který předcházal vývoji strunných nástrojů, byl hudební luk či hudební tyč (Jílek 1996, Bonhard, Prach 1958). Hudební luk je podobný střeleckému a výška tónu se mění spolu s napětím luku pomocí ladící smyčky nebo flažoletovými hmaty (Michels 2000). Hudební tyč byla dutá, často bambusová tyč, opatřená strunou, která byla oddálena od tyče pomocí kobylinky (Michels 2000). Tato tyč je také často nazývána monochord. Z monochordu se mimochodem vyvinul nástroj zvaný trumsajt – něm. *Trumscheit*, který byl rozšířen v 17. stol a měl místo tyče podlouhlou rezonanční skříň opatřenou jednou, dvěma či více strunami (Jílek 1996, cs.wikipedia.org).

Modr navíc dodává, že monochord nebyl hudebním nástrojem, ale sloužil spíše pro studium intervalů. Později přibyla další struna, která sloužila pro kontrolu tónu a tím vznikl helikon, zvaný taktéž polychord. Další příbuzné historické nástroje jsou například harfa, tympanon, takzvaný crwth (česky zvaný kobza) nebo psaltérium ala bohemika (české křídlo). (Jílek 1996, Bonhard, Prach 1958). Toto byl výčet nástrojů drnkacích tedy rozechvíváných prsty či trsátkem.

Williams (2002) dělí předchůdce moderního klavíru do dvou skupin: hraný prsty a hraný kladívky. Psaltérium byl drnkací nástroj, který měl struny nataženy přes rezonanční desku a stal se později vzorem pro cembalo, zatímco bicí verze – dulcimer, se stal inspirací pro klavír a cimbál.

První zmínka o ovládnání kladívek pomocí kláves byla roku 1425 n.l. Inspirací se staly varhany, které byly ovládány klávesami již roku 221 n.l. (Williams 2002, Modr 1977). Nejčastěji zmiňovaný, klávesami ovládaný předchůdce klavíru byl clavichord [klavikord]. Clavichord má tangentovou mechaniku – klávesa se dotkne kovovým jazýčkem (tangentou) struny a rozezní ji. Přitom se dá tón modulovat v průběhu znění tzv. vibrato (Michels 2000). Clavichord byl vybaven 20 – 23 strunami (později i více), které se tlumily levou rukou (Jílek 1996).

Další nástroj, který se používá často dodnes, se nazývá klavicemballo – neboli zkráceně cemballo či harpsichord. Vyvinul se údajně z psaltéria (Modr 1977, Williams 2000). Na rozdíl od clavichordu měl již struny různých délek, které se rozeznávaly trsacím sloupkem z kovu, kůže nebo havraního brku (Modr 1977). Zde se již objevuje poprvé křížení strun, které umožňuje zkrácení nástroje.

Nástroje založené na stejném principu, ale s ostruněním vedeným příčně od hráče se nazývají spinet a podobný nástroj se strunami taktéž příčně má název virginal (Jílek 1996). Již v tehdejší době se řešily problémy s prostorem, a proto začaly vznikat varianty s vertikálně uloženou rezonanční deskou a ostruněním. Byly to tzv. clavicitheria (Bonhard, Prach 1958). Clavicitherium se později stalo vzorem pro pianino, které je jakožto vynález připisován Robertu Wornumovi. Jeho pianinová mechanika, zvaná chytačová, je až na drobné změny používána v pianinách dodnes (Williams 2000).

Cemballu ovšem chyběla jedna podstatná věc a tou byla možnost regulovat dynamiku hry. Proto byl roku 1708 sestrojen první model klavíru vynálezcem jménem Bartolomeo Cristofori. Nezávisle na sobě pracovali na stejném projektu další dvě osobnosti a to Jean Maurius a Christoph Gottlieb Schröter. Prvenství je ovšem připisováno právě Cristoforimu (Modr 1977).

Dalším významným milníkem bylo zavedení dvou typů křídel roku 1780 a to vídeňské a anglické. Mimo rozdílných ozvučných desek a ostrunění (anglické používaly o 50% silnější struny) byl zásadní rozdíl v mechanice. Kladívka vídeňské jsou potažena kůží a mechanika je „těžší“ pro hraní a méně reaguje na jemnou hru. Oproti tomu anglická mechanika je osazena kladívkami z plsti, které jsou vymršťována důmyslným mechanismem ke struně, a proto se na ní snáze hraje (Jílek 1996).

Anglická mechanika prošla největší inovací zavedením dvojité repetiční mechaniky tzv. double échappement. Vynálezce je Jean-Baptiste Erard (Michels 2000). Při stisku klávesy spočívá kladívko těsně pod strunou, což umožní případnou rychlou repetici tónu. Až při uvolnění klávesy se vrátí kladívko do původní pozice. Anglická mechanika se v různých obměnách používá dodnes (Jílek 1996).

Od počátku 20. stol. je již podoba klavíru víceméně kompletní a bez zásadních změn. Vrcholem výroby pian byly 20. léta 20. století. Bylo vyrobeno přibližně 600 000 pian (Williams 2000). Příchodem ekonomické krize a následnou druhou světovou válkou

výroba značně poklesla a renesanci zažil klavír až v 80. letech. Touto dobou se začaly objevovat první elektronické nástroje (Williams 2000).

Tyto nástroje zažívají v poslední době velký rozmach. Výhodou těchto nástrojů je samozřejmě řádově nižší cena, žádná potřeba ladění a možnost tiché hry se sluchátky. Neustále pokračuje jejich vývoj a to k tomu, aby dosahovaly co nejrealističtější podání zvuku. S touto skutečností ovšem přichází nový problém a to jakýsi „strojový“ zvuk piana, který postrádá drobné intonační a ladící chyby, které dělají právě nástroj nástrojem. Takový nástroj zní pořád jednotvárně, a proto mnoho hudebníků odmítá na tyto nástroje hrát a dávají přednost raději klasickým akustickým nástrojům (klavirmictvi.cz).

S přihlédnutím k těmto vlastnostem se jeví jako nejvhodnější hybridní nástroje, které spojují výhody akustických a elektronických nástrojů. Jako příklad lze uvést systém CEUS výrobce Bösendorfer, který dokáže zaznamenat stisky kláves včetně dynamiky a později je kdykoli přehrát. Nutno podotknout, že nástroj nepřehrává pomocí reproduktorů, ale je vybaven zařízením, které generuje úhoz přesně takový, jaký byl zahrán hráčem (boesendorfer.com). Nástroj se tedy jeví, jakoby hrál „sám“.

Další inovací je tzv. Silent piano, které je vybaveno brzdami kladívka (viz např. patent US 6683242 B2). Při jejich aktivaci znemožní brzda nárazu kladívka do struny a navíc aktivuje klávesový senzor, který zaznamenává úhoz klávesy. Tyto informace se převádějí do procesoru a ten generuje zvuk, který je možno slyšet v připojených sluchátkách (cz.yamaha.com).

3.2 Kolíčník, ostrunění a litinový rám, řešení výrobců

Kolíčník je kus dřeva, do kterého jsou uchyceny ladící kolíky. V minulosti byl používán dub (*Quercus* sp.), ořešák (*Juglans* sp.) nebo buk (*Fagus* sp.). Dnes nejčastěji překližka z javoru (*Acer* sp.) nebo buku (*Fagus* sp.) (Sadie 2001).

Ladící kolíky jsou kovové kolíčky, ve kterých jsou uchyceny konce strun, a které umožňují napínání struny a tím i ladění (Sadie 2001). Moderní kolík je vyroben z tvrzené oceli, hlavu má tvarovanou do čtyřhranu pro nasazení ladícího klíče a je vybaven otvorem pro navlečení struny.

Struna je prvek nástroje, sloužící k rozechvívání vzduchu a produkci zvuku. První materiál pro výrobu strun bylo střevo, později mosaz a dnes již uhlíkatá ocel, která má vysokou pevnost v tahu (Jílek 1996, Sadie 2001).

Na výšku tónu má vliv délka, průměr a míra napnutí struny. V klavíru se používá víc než dvacet průměrů strun – od 0,7 mm v horních diskantech až po 1,6 mm pod středním C (Williams 2000). Basové struny jsou vybaveny navíc tzv. přádlem což je měděný drát navinutý na základní struně, který slouží pro zvětšení průměru. Nejnižší tóny jsou vybaveny ještě jedním vinutím – tzv. podpřádem (Bonhard, Prach 1958).

Kdybychom totiž v basech struny pouze prodlužovali, musely by být struny pro nejnižší tóny dlouhé až 9 m (Williams 2000). Pro zlepšení akustiky a taky pro úsporu místa vynalezla firma Steinway roku 1855 dvojí křížení strun, které se používá dodnes. Počátek křížení bývá v malé oktávě. Existovaly i modely s trojím křížením, vyráběné firmou Kaps, ale toto provedení se příliš neujalo (Modr 1977).

Williams udává, že napětí jedné struny se pohybuje mezi 75-100 kg, standardní klavír je vybaven 220 strunami. Napětí všech strun se tedy pohybuje mezi 16-17 tunami. Toto zatížení musí být schopen klavír permanentně přenášet, proto je vybaven litinovým rámem. Litinovému rámu předcházely kovové výztuže v podobě tyčí. V této době se totiž věřilo, že kov bude mít neblahý vliv na zvuk, a proto se tento materiál používal jen velmi zřídka (Williams 2000). Později, se vzrůstajícím tahem strun, byli nuceni výrobci přistoupit na použití kovového rámu.

První přichází na řadu tzv. polopancěře. U nich jsou plochy kolíčníků bez pancéřového obložení, takže rám končí před kolíčníkem. Druhé provedení používané dodnes se nazývá celopancěř, u kterého jsou otvory pro ladící kolíky vyvrtány přímo do pancéřové plotny, která překrývá celý kolíčník (Jílek 1996). Do otvorů v rámu se vsazují dřevěné vložky vyrobené nejčastěji z habru (*Carpinus* sp.), aby byl kolík co nejlépe utěsněn (Bonhard, Prach 1958). Některé modely (např. Bösendorfer) mají v místech kolíků okénka, takže rám nepřekrývá celý kolíčník, nejsou tedy plnopancéřové.

Jak bylo řečeno kolíčník slouží pro uchycení ladících kolíků, na které jsou navinuty struny. Celý tento systém zabezpečuje stálost ladění neboli „držení“ konstantní frekvence strun. U klavíru hovoříme o rovnoměrně temperovaném ladění. Ta ponechává jediný čistý interval – oktávu, kterou dělí na 12 stejných půltónů (Syrový 2008). V praxi se ladí klavír buď absolutně, kdy je stanovena pro každý tón přesná frekvence v Hz nebo relativně, kdy se ladí jednotlivé tóny na výšku, vztaženou k ostatním tónům (Zenkl 2003).

Pro stabilitu ladění je klíčový především kolíčník, jeho provedení, způsob výroby apod. Vývoj kolíčníku probíhal od masivních až po překližované materiály. Jak uvádí Sadie, první se používaly dřeviny dub, buk, nebo ořech. Bonhard a Prach uvádí kolíčník již jako překližovaný materiál, konkrétně jako javorové či bukové jádro, na nějž navazuje kombinace bukových prkének cca 9 mm tenkých a to vždy napříč vlákny.

Williams uvádí, že záleží na výrobcí, kolik vrstev bude mít kolíčník. Mohou být tři nebo i čtyřicet. Za optimální považuje pět až sedm vrstev. Například známý výrobce Steinway & Sons má mimo jiné patentovány dva typy kolíčníků s obchodními názvy Hexagrip a Octagrip. Octagrip je vyroben z 11 vrstev javorového dřeva, které jsou na sebe lepeny v různých úhlech. Toto má zajišťovat lepší stabilitu ladění a nižší odpor při ladění. Podobné vlastnosti má i starší patent zvaný Hexagrip ovšem ten obsahuje jen 6 vrstev (US 7759565, US 3091149).

Materiál bývá nejčastěji již zmíněný javor nebo taky buk. Právě bukové dýhy impregnované syntetickými pryskyřicemi a lepené speciální fenolovou pryskyřicí používá firma Dehonit pro výrobu materiálu, který se často používá jako kolíčník (dehonit.cz). Javor ze Severní Ameriky udává jako materiál pro výrobu kolíčníku firma Pianos Bolduc. Jejich kolíčník se skládá z pěti vrstev lisovaných za studena po dobu 24 hodin (pianosbolduc.com). Další často používaný materiál je Delignit což je překližka německé výroby vyrobena typicky z 21 bukových vrstev, lepených fenolickým lepidlem (delignit.de).

Ovšem lze nalézt také zcela odlišné provedení kolíčníků. Například Mason & Hamlin u některých modelů používal až do roku 1905 místo kolíčníku kovové elementy, které jsou uchyceny pomocí matice v trámci a v těchto elementech jsou uchyceny struny. Napětí se regulovalo povolováním či dotahováním matic (US 281794). Od nápadu se upustilo, protože bylo potřeba hodně otáčení a navíc ladiči museli otáčet maticí v opačných směrech, než byli zvyklí u klasického ladění (Williams 2000). Podobný princip uvádí i patent US 160600.

Další varianta, u které odpadá potřeba kolíčníku je použití šroubovacího kolíku uchyceného maticemi jen k rámu klavíru. Tento způsob si klade za cíl zjednodušit ladění a zvýšit jeho trvanlivost (US 4920847). Tento způsob byl použit na některých pianech August Förster.

Zajímavé řešení uvádí patent US2588440. Zde je konec struny přichycen na konci duté závitové tyče. Tato tyč se nachází uvnitř trubičky, ke které je shora dotažen maticí. Tento mechanismus je zaražen v količnicku. Účelem je opět snadnější ladění a vyšší trvanlivost ladění.

Patent US 3332309 řeší uchycení kolíků v kovovém količnicku. V količnicku jsou navrtány kónické otvory, do kterých se vloží taktéž kónické objímky. Tyto objímky jsou vybaveny ve spodní části závitem, do kterého náleží rozevírací šroub. Dotahováním tohoto šroubu docílíme pevný úchyt kolíků. Tento patent byl zaveden především z důvodu případné, rychlé demontáže ladících kolíků.

Existují rovněž různé vynálezy sloužící k aretaci klasických kolíků. Jedná se například o patenty US 982425 a US 3754494. Tyto metody nejsou ovšem příliš účinné, a proto nejsou využívány. Nalezneme taktéž návrhy různých neobvyklých systémů pro napínání strun a tím i ladění. Například US 550366 kde jsou struny uchyceny napevno v kónických kolicích a od nichž pokračují dále pod trámcem, ve kterém jsou umístěny napínací šrouby. Pod každým šroubem je struna vybavena kovovým válečkem, do kterého zapadá spodní část šroubu vybavená příslušným vybráním. Povolováním či dotahováním napínacích šroubů lze měnit frekvenci. Podobnou myšlenku uvádí taky patent US 883285.

Toto byl jen stručný výčet vynálezů, které se týkají systému struna-kolík-količnick. Přes nepřehledné množství patentů je stále nejčastěji používán systém uchycení pomocí ocelového kolíku a dřevěného (překližovaného) količnicku. Je to nejspíš proto, že jakákoli inovace se jen obtížně zavádí do praxe, z důvodu zažitých výrobních postupů a strojního vybavení. Proto výzkum směřuje spíše ke zlepšení stability ladění a přeladování nástrojů, ke zlepšování jednoznačnosti intonace, zušlechťování a egalizaci zvuku nástrojů téhož typu (Kurfürst 2002).

3.3 Výzkum v oblasti akustiky hudebních nástrojů

Mezi autory věnující se fyzikálně-mechanickým vlastnostem dřeva, včetně akustiky patří například Požgaj et al. (1997), Gandelová, Horáček, Šlezingerová (2009), Bodig, Jayne (1982), či konkrétně jen akustice dřeva Bucur (2006). Téma hudební akustiky zpracoval rozsáhle (Srový 2003) nebo taky (Sundberg 1991). Autoři zabývající se převážně výzkumem akustických vlastností dřeva jsou například Rajčan (1998), Rajčan, Danihelová, Urgela (1999), Ille (1974).

Tématu akustické vlastnosti nástrojů všeobecně se věnoval (Rossing 2010). Nejčastěji jsou voleny housle, jakožto předmět výzkumu, například práce (Marshall, Kenneth 1985, Knott, Shin, Chargin 1989), kteří se zabývají modální analýzou houslí. Modální analýza má za cíl určit vlastní frekvence předmětů, při jejichž působení předmět rezonuje – tj. zvyšuje hodnotu amplitudy (Srový 2008, Štětina et al. 2003). Provádí se buď experimentálně nebo teoreticky (Štětina et al. 2003).

Akustice piana se potom věnuje Burred (2004), Fletcher, Rossing (1998), Askenfeld (1990), Lehtonen (2005, 2010), Suzuki a Nakamura (1990). Obecně nejčastějším tématem je analýza rezonanční desky. Numerickou simulací rezonanční desky piana se zabýval Berthaut (2003), Chaigne et al. (2013) a ti podotkli, že na rezonanci desky má vliv i nerovnost žeber, na kterých je uchycena. Podobným tématem se zabýval již i Mueller (1980).

Giordano a Jiang v řadě svých prací modelovali piano nebo jeho části jen pomocí Newtonových zákonů – například fyzikální modelace piana (Giordano, Jiang 2004) nebo jednoduchý, konečně-prvkový model rezonanční desky, který zahrnuje také vliv žeber a usuzuje, že mají hlavní vliv na impedanci, kterou zde experimentálně zkoumal (Giordano 1997). Metoda konečných prvků slouží pro simulaci průběhu napětí, přenosu tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin apod. Princip spočívá v rozložení (diskretizaci) tělesa do určitého počtu bodů a v těchto bodech zjišťujeme dané parametry (Moaveni 2008).

Konečně-prvkový model použili také Berthaut et al. (2003) při analýze kmitů rezonanční desky o nízké frekvenci. Suzuki (1985) zkoumal pomocí metody konečných prvků rezonanci desky klavíru délky 1,8 m a zjistil, že vyzařuje nejlépe frekvence nad 1,4 kHz. Rozsáhlou disertační práci na téma numerické simulace rezonanční desky zpracoval Tippner (2010).

Mnoho autorů se věnuje rovněž simulaci chování klavírních strun. Rozsáhlý výzkum provedl Chaigne, Askenfeld (1994a, 1994b). Zkoumali interakci kladívka a struny a tvar kmitání strun pomocí základních rovnic popisujících tento jev. V druhé části práce porovnávali naměřené a vypočítané tóny a sestavili model, který objasňuje vliv tuhosti struny, relativní pozice úderu kladívka a hmotnostní poměr kladívka a struny na tvar kmitu struny.

Celou řadu výzkumů provedl Hall. Například týkající se vybuzení klavírní struny těžkými a lehkými kladívky Hall (1987a, 1987b). Pomocí mikropočítače zkoumal vliv hmotnostního poměru kladívka a struny na její kmitání.

Giordano, Korty (1996) vyšetřovali podélné vibrace strun a taky jejich přenos přes kobylku na rezonanční desku. Udávají, že amplituda podélných kmitů je nelineární funkcí amplitudy příčných kmitů.

Bank, Lehtonen (2010) analyzovali slyšitelnost podélných kmitů struny pomocí poslechových ABX testů. Zaznamenali tóny ze dvou klavírů a jednoho pianina a zjistili, že podélné kmity jsou slyšitelné i v nejvyšších frekvencích nicméně v rozmezí $A_3 - C_5$ jen nepatrně.

Rowell (1993) zkoumal vliv acetylce kličníku z překližované desky na stabilitu ladění při změnách vlhkosti. Použil acetylovanou překližovanou desku coby kličník v klavíru o 72 tónech a periodicky měnil vlhkost. Měřil změny vlhkosti dřeva a dospěl k závěru, že vlivem omezení sorpce u acetylovaného dřeva se sníží bobtnání a sesychání oproti neošetřenému dřevu, a tím se ilepší stabilita ladění.

Problematikou acetylce dřeva a tím i zlepšení stability ladění se zabývali i Yano et al. (1993).

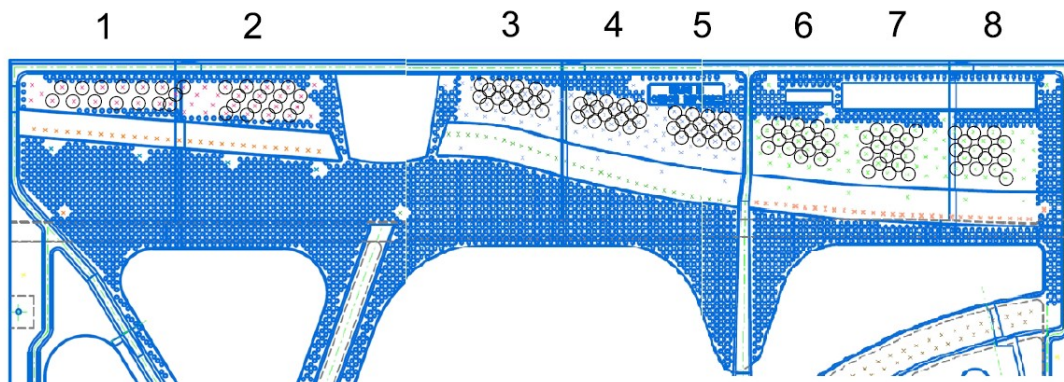
4 Metodika

4.1 Odvrtání kolíčníku

Jednotlivé kolíčníky byly postupně odvrtány na speciální stojanové vrtačce. Tato vrtačka má vrtací jednotku upevněnou na pohyblivém rámu, který umožňuje její pohyb ve dvou osách – x,y. Třetí osa je ovládána pomocí tlačítek a slouží pro nastavení výšky vrtací hlavy nad litinovým rámem. Samotný chod vrtačky (hloubka vrtu) je 64 mm.

Kolíky je nutno vrtat pod určitým úhlem. Úhel se pohybuje u klavírů i pianin přibližně kolem 5°. Daného úhlu dosáhneme tak, že rám vypoďložíme na pracovním stole danou podložkou.

V této práci byl kolíčník osazen na pianinový rám z důvodu snadnější manipulace. Kolíčník byl rozdělen na 8 částí, které byly očíslovány od 1 do 8 a to vzestupně od basů k diskantům. Na obr. 1 můžeme vidět schéma, na kterém je zobrazen pianinový litinový rám, kde kroužky znamenají odvrtávané otvory s habrovou vložkou. Důvod tohoto rozdělení je postřehnutí měřených vlastností v různých částech kolíčníku.



Obrázek 1: Schéma vrtání

V každé části bylo provedeno 18 vrtů a to průměry vrtáků od 6,1 do 6,7 mm, dále pak stupňovitým vrtákem 5,5-6,5 mm a poslední vrt byl proveden vrtákem o průměru 6,5 mm, ale bez použití habrové vložky. Každý vrt byl proveden dvakrát. Celkem tedy 144 otvorů v jednom kolíčníku.

Vrtáky jsou vyrobeny z rychlořezné oceli z 5 % příměsí kobaltu vyjma stupňovitého vrtáku, který byl vyroben ze slinutých karbidů firmou Rotana speciálně pro tuto práci.

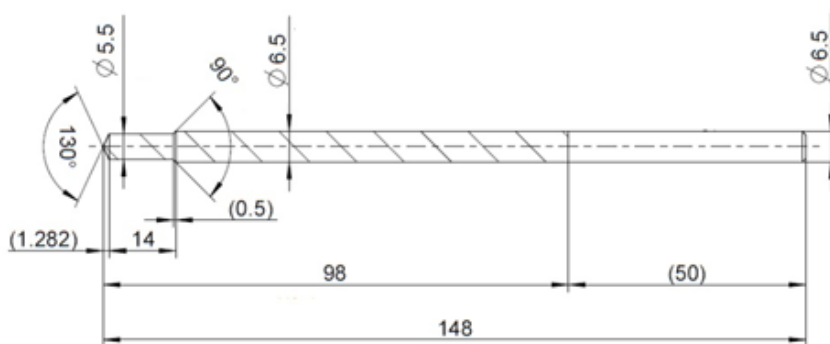
Habrové vložky se nabíjejí do otvorů v litinovém rámu a zabezpečují ideální kontakt kolíku s rámem. Vyrábějí se o různých tloušťkách (obvykle 6-12 mm). Vrtání se

provádí přes tyto vložky. Účelem vrtání bez této vložky bylo zjistit, jaký vliv má vložka na výsledný odpor proti otočení.

Vrtání bylo prováděno postupně jednotlivými vrtáky a v každém sektoru kolíčníku náhodně. Po odvrtání byl každý typ otvoru označen fixem. Kolíčníky jsou vyrobeny z bukové překližky a co se týče tloušťky, tak typ A a B má tloušťku 32 mm a typ C 25 mm.



Obrázek 2: Vrtání kolíčníku



Obrázek 3: Výkres stupňovitého vrtáku

4.2 Nabíjení kolíků

Po odvrtání všech otvorů následovalo nabití kolíků. Byl použit standardní kolík o délce přibližně 64 mm a průměru 7 mm. K nabíjení se používá gumová palička a klíč, který umožní přesné nasazení na kolík a vrchní část má přizpůsobenou pro bezpečný úder paličkou. Přesné doražení kolíku se provádí po nabití speciálním pneumatickým kladivem, které značně zjednoduší a zpřesní práci.

Kolíky byly nabity do takové hloubky, aby zesponu kolíčnicku vyčnívaly a to z důvodu dodržení konstantní plochy styku kolíčnicku s kolíkem.



Obrázek 4: Nabíjení kolíků

4.3 Měření momentu

Moment utažení byl měřen pomocí momentového klíče s číselníkovým úchylkoměrem a jednotlivé hodnoty byly zapisovány k příslušným sektorům kolíčnicku. Jednotkou momentu dotažení je Nm. Tímto způsobem byly naměřeny všechny typy a poté následovalo měření po rozvolnění kolíku. To bylo provedeno tak, že se pomocí ladícího klíče nejprve všechny kolíky pootočily o půl otáčky tam i zpět a to celkem 3× a poté byl změřen znova moment dotažení. V tomto případě byly naměřeny i hodnoty velmi nízké (pod 10 Nm). Tyto hodnoty jsou obecně nevyhovující, a proto s nimi nebylo dále počítáno. Také několikrát došlo ke zlomení kolíku, takže hodnot je v součtu méně než v předchozím měření.

Posledním krokem bylo měření momentu po uplynutí 14 dnů. Kolíčnický i s rámem byly ponechány ve stojanu dva týdny a poté byl změřen opět moment dotažení.

4.4 Měření odporu rezistografem

V každé z osmi částí všech druhů kolíčnicků bylo provedeno měření odporu pomocí odporové mikrovrtáčky resistograph. Tento přístroj pracuje na principu měření elektrického příkonu při vrtání. Do dřeva proniká tenký vrták a jeho odpor je dán hustotou materiálu. Resistograph tyto hodnoty zaznamená a ihned vytiskne. Je možné je taky později přenést do počítače a podrobně vyhodnotit.

Export dat byl samozřejmě proveden a po zpracování můžeme výsledek z každého vrtu vidět v příloze. Data byla zprůměrována a poté byla hledána korelace mezi momenty dotažení. Pro tuto operaci byl použit Pearsonův korelační koeficient. Jeho úplné znění je následující (zdroj: cit.vfu.cz):

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Čitatel se nazývá normovaná kovariance a jmenovatel není nic jiného než násobek směrodatných odchylek obou souborů. Jeho hodnota vychází v intervalu <-1;1>. Záporná čísla značí negativní závislost a kladná čísla pozitivní. Jedná se o lineární závislost. Abychom mohli tvrdit, že závislost existuje, je potřeba určit kritickou hodnotu. Tu lze nalézt ve statistických tabulkách podle známé hladiny alfa a počtu dat. Stejný typ koeficientu byl použit pro korelaci i ve všech ostatních případech.



Obrázek 5: Měření rezistografem

4.5 Měření hustoty a vlhkosti

U každého kolíčníku byla předem vypočítána celková hustota a to pomocí známého vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m – hmotnost, V – objem

Hustota byla měřena při vlhkosti, která byla zjištěna pomocí gravimetrické metody. Tato metoda je obecně nejpřesnější. Vlhkost byla naměřena rozdílná a je vždy uvedena u každého kolíčníku. Vzorky byly zváženy a poté vysušeny v sušárně při teplotě 103 °C. Po vysušení byly opět zváženy a vlhkost byla zjištěna pomocí následujícího vzorce:

$$W_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100$$

W_{abs} – absolutní vlhkost dřeva [%] m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g], m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

Jestli je již dřevo absolutně suché, zjistíme tak, že jeho hmotnost se již nemění o více než 0,02 g, resp. 1% (Gandelová et al. 2009).



Obrázek 6: Sušení vzorků

4.6 Měření distribuce hustoty

Z každého typu kolíčnicku byl vyřezán podélný pás, který byl rozdělen na 16 částí – tzn. pro každý úsek celkem 2 vzorky o rozměrech 87×38 mm. Tloušťka je již daná a to u typu A, B 32 mm a u typu C 25 mm. Důvod tohoto rozměru je ten, že kolíčnicky byly již navrtány a zbývalo jen málo místa pro vymanipulování vzorků. Tento rozměr se ukázal ovšem jako plně dostačující.

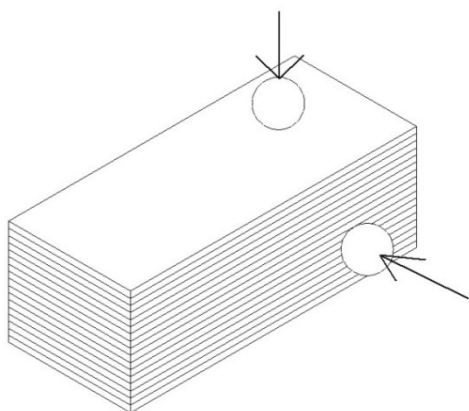
U vzorků byl změřen objem a hmotnost a dle již uvedeného vzorce vypočítána hustota u každého vzorku. Tímto můžeme postihnout distribuci hustoty v celém kolíčnicku.

4.7 Měření tvrdosti a pevnosti v tlaku

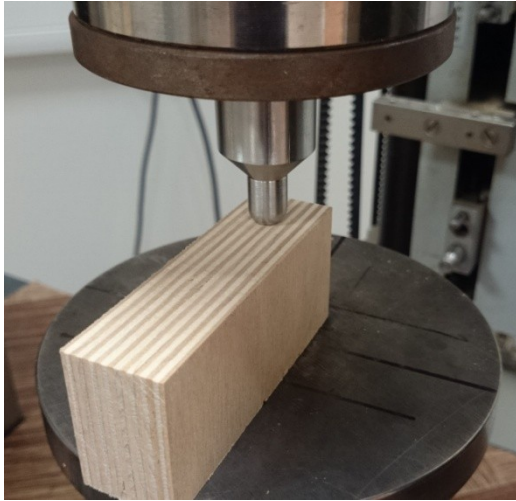
Vzorky, které jsme získali rozřezáním kolíčnicků, byly použity k měření tvrdosti a pevnosti v tlaku. Nejprve byla změřena tvrdost kolmo na plochu a poté kolmo na hranu tak, jak je uvedeno na obr. 7.

Toto měření bylo provedeno na zkušebním stroji Zwick Z050. Přístroj umožňuje měřit tvrdost dle Janka i Brinella současně v jednom chodu. Principiálně tyto metody spočívají v tom, že do dřeva se vtlačuje kulička o určitém průměru. U tvrdosti dle Brinella se vtlačuje kulička o průměru 10 mm již stanovenou silou (měkké dřeviny 100 N, středně tvrdé 500 N, tvrdé 1000 N) a následně se měří plocha otláčení a dle ní tvrdost. Jankova tvrdost spočívá ve vtlačení kuličky o průměru 11,28 mm do hloubky 5,64 mm a měří se síla potřebná k zatlačení (Gandelová et al. 2003).

Použitý zkušební stroj ovšem měří hloubku vtisku kuličky při 500 N a 1000 N. Z těchto hodnot lze samozřejmě dopočítat průměr vtisku, nicméně i hodnota hloubky vtisku se jeví jako plně dostačující při porovnávání.



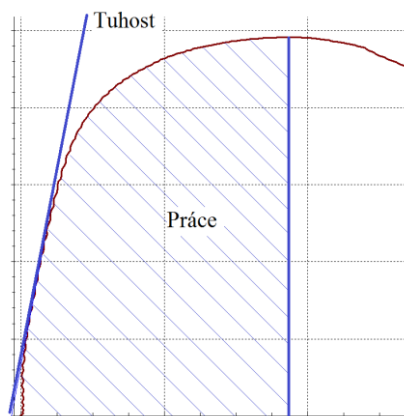
Obrázek 7: Způsob měření tvrdosti



Obrázek 8: Měření tvrdosti v hraně

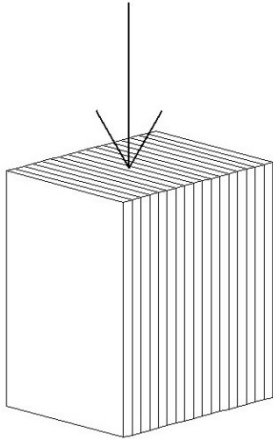
Společně s těmito hodnotami byla měřena tuhost, což je modul pružnosti, ve kterém je zahrnuta i geometrie materiálu. Tuhost byla měřena v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$. V pracovním diagramu je to směrnice přímky v lineární oblasti.

Další veličina je práce. Principiálně tato veličina spočívá ve výpočtu plochy pod křivkou až do meze pevnosti a říká nám, kolik síly je potřeba vynaložit po určité dráze (zde v $\text{N}\cdot\text{mm}$, možno měřit i v J). Tato vlastnost souvisí s houževnatostí materiálu a říká nám kolik energie je potřeba pro porušení tělesa.



Obrázek 9: Znázornění tuhosti a práce v pracovním diagramu

Dále byl ze vzorků odřezán vzorek určený pro zkoušku v tlaku. Tlak byl vyvozován rovnoběžně s rovinou dýhy, jak je uvedeno na obr. 10 a to z toho důvodu, že převážně v tomto směru způsobuje zaražený kolík napětí.



Obrázek 10: Způsob měření pevnosti v tlaku

Ke zkušebnímu stroji byl v tomto případě připojen extenzometr. Vzdálenost hrotů byla nastavena na 20 mm. Extenzometr slouží pro přesnější určení poměrné deformace, která slouží k výpočtu modulu pružnosti. Ten je definován jako poměr napětí a poměrné pružné deformace (Požgaj et al. 1997).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Poměrná pružná deformace je vlastně rozdíl délek (před a po zatížení) dělená původní délkou. Po vynásobení stem, dostaneme poměrnou deformaci v procentech.



Obrázek 11: Měření pevnosti v tlaku

Výsledkem těchto měření je vždy jistý pracovní diagram. Tento diagram zobrazuje vztah mezi napětím a deformací při zatížení a můžeme z něj vyčíst různé informace. Pro tuto práci je podstatný modul pružnosti, což je směrnice grafu v lineární části a mez pevnosti, což je bod, kdy dojde k poklesu napětí a k výraznému porušení tělesa.

4.8 Sestavení konečně-prvkového modelu

V konečně-prvkovém modelu byla zpracována problematika chování materiálu při zaražení kolíku. Byl zde vyhodnocován tlak, který vyvodí kolík o průměru 7 mm zaražený do otvoru, vrtaného různými průměry vrtáků.

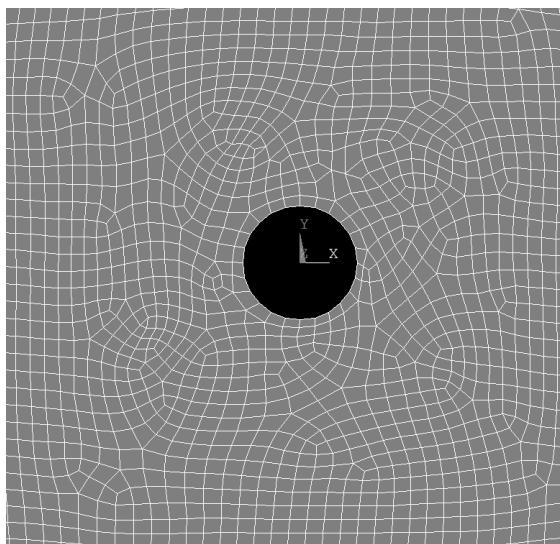
Metoda konečných prvků spočívá v sestrojení modelu (*preprocessing*), dále v řešení daného problému (*solution*) a nakonec ve vyhodnocení (*postprocessing*).

Konečně prvková metoda spočívá v rozložení (tzv. diskretizaci) objektu na daný počet prvků, jejichž typ a velikost lze nastavit. Obecně čím více těchto prvků máme k dispozici, tím přesnější, ale také déle trávající výpočet je.

Velkou výhodou tohoto programu je, že pomocí skriptovacího jazyka APDL což je zkratka pro *Ansys Parametric Design Language*, lze celou úlohu takzvaně parametrizovat a uložit do souboru s příponou *.mac, což značně zjednoduší změnu parametrů. Celé znění tohoto skriptu se nachází v příloze.

V našem případě byl sestrojen výřez z kolíčníku o rozměrech 50×50 mm, ve kterém byl postupně vytvářen otvor dle průměru vrtáků (6,1 – 6,7 mm) a do něj „narážen“ kolík o průměru 7 mm. Narážení je v uvozovkách, protože tento problém byl zjednodušen tak, že bylo nadefinováno roztažení otvoru o rozdíl 7 mm minus průměr vrtáku a byl měřen tlak, který vznikne při tomto roztažení materiálu. Tato úloha byla nakonec zjednodušena na dvojrozměrný objekt, protože při výpočtu s trojrozměrným tělesem bylo dospěno ke stejným hodnotám.

Samotný postup spočívá v již uvedeném vytvoření objektu o rozměrech 50×50 mm, poté byl vytvořen kruh o průměru vrtáku. Pomocí booleovských operací byl vytvořen v prvním objektu rozdíl o průměru daného vrtáku. Dále byl nadefinován typ elementu na *plane183*, což je prvek s 6 nebo 8 uzly o dvou stupních volnosti v ose *x* a *y*. Dále bylo aplikováno síťování (také *meshování* neboli diskretizace), což znamená rozložení tělesa na konečný počet prvků. Tvar segmentu byl zvolen na čtyřhran o velikosti strany 1 mm. Výsledek síťování zobrazuje obr. 12.

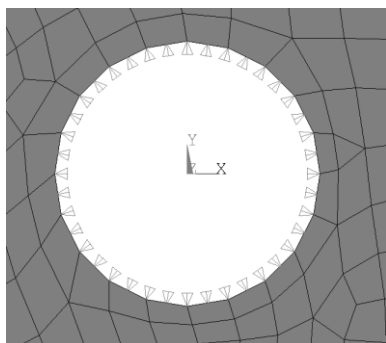


Obrázek 12: Síťování objektu

Nyní bylo potřeba nastavit cylindrický souřadnicový systém, který umožňuje provést tuto úlohu. Dále následovalo nastavení Poissonova čísla a modulu pružnosti. Modul pružnosti definuje typ kolíčníku a byl vypočítán jako průměrná hodnota modulů pružnosti z měření pevnosti v tlaku. Hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Typ kolíčníku	Modul pružnosti (MPa)
Typ A	7858
Typ B	9136
Typ C	6334

Poissonovo číslo označuje poměrnou deformaci a bylo nastaveno na 0,3. Nyní bylo potřeba definovat stupně volnosti neboli místa, kde může dojít k posunu a kde naopak ne. Okraje prvku byly nadefinovány jako pevné, tzn. bez posunu, protože celý kolíčník je napevno uchycen na litinovém rámu. V otvoru byla nadefinována volnost, aby bylo docíleno daného posunu. Nyní byl definován posun o velikosti rozdílu kolíku a vrtáku.



Obrázek 13: Definování posunutí

Tímto je ukončena část *preprocessing* a následuje část řešení – *solution*. Program provedl výpočet, jehož výsledky přinese poslední část a to *postprocessing*.

V této části bylo zobrazeno napětí a deformace, které se vyskytují při zaražení kolíku. Napětí bylo zobrazeno v ose x , v ose y a ekvivalentní napětí tzv. Von Misesovo, které zobrazí v barevném spektru součet všech složek napětí a deformace. Dále byla zobrazena pomocí barevné škály míra deformace v okolí otvoru.

5 Výsledky

5.1 Měření momentu dotažení u typu A

Jedná se o překližku vyrobenou z celkem 19 vrstev bukových dých o celkové tloušťce 32 mm a hustotě 761 kg.m^{-3} . Vlhkost byla propočtena pomocí gravimetrické metody na 5,8 %.

5.1.1 Měření po naražení

Následuje popisná statistika hodnot odporu v Nm ihned po naražení.

Tabulka 1: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ A

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	21,00	20,12	21,53	22,88	23,71	23,41	21,28	20,78
Medián	21	21,5	21	21	25	23	22	20
Směr. odchylka	2,66	3,63	3,39	4,31	4,44	3,55	3,58	3,42
Rozptyl výběru	7,06	13,17	11,51	18,61	19,72	12,63	12,80	11,71
Variační koeficient	12,7	14,5	15,8	18,9	18,7	15,2	16,8	16,5
Minimum	16	12	16	15	17	18	14	16
Maximum	25	26,5	28	30	31	31	28	26

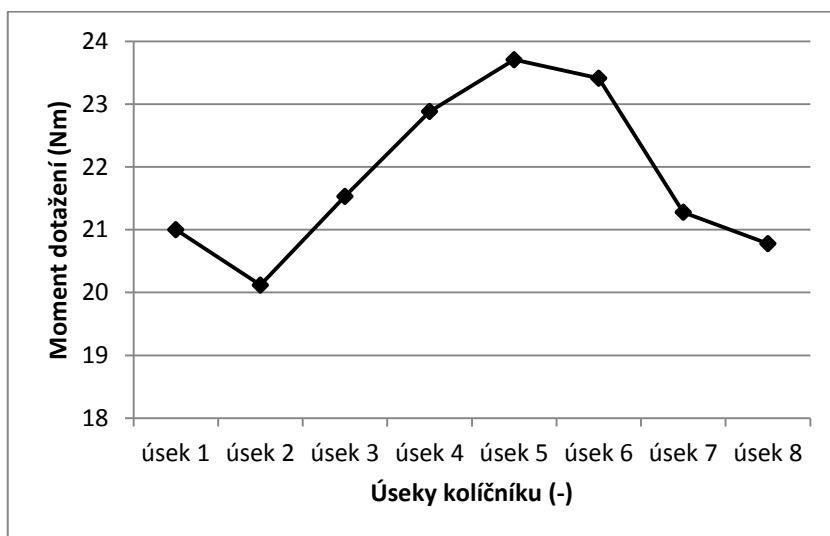
Tabulka 2: Moment dotažení po naražení u vrtáků – typ A

	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	St. Vrták	Bez vložky - 6,5
Stř. hodnota	25,19	24,20	24,90	22,06	20,47	21,10	18,53	22,78	16,93
Medián	25,5	24	25	22	20,5	20,5	18	22,5	17
Směr. odchylka	3,38	3,45	2,87	1,99	2,29	2,39	2,47	3,17	2,09
Rozptyl výběru	11,40	11,89	8,26	3,96	5,25	5,72	6,12	10,07	4,35
Var. koef.	13,4	14,3	11,5	9	11,2	11,3	13,4	13,9	12,3
Minimum	19	20	21	19	16	18	15	17	12
Maximum	31	30	30	25	23,5	26	23	28	20

Tabulka 3: Celkový přehled hodnot po naražení – typ A

celkově	
Stř. hodnota	21,83
Medián	22
Směr. odchylka	3,77
Rozptyl výběru	14,23
Variační koeficient	17,3
Minimum	12
Maximum	31

Tabulka 1 znázorňuje odpory z jednotlivých úseků měřeno od basů (úsek 1) po diskanty (úsek 8). Tyto údaje jsou použity pro analýzu rozptylu. Na vyhodnocení byla použita jednofaktorová analýza rozptylu při hladině významnosti 0,05. Byla zkoumána shoda středních hodnot z jednotlivých úseků kolíčnicku. Metodou mnohonásobného porovnávání byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi úseky 2, 5 a 6. V úseku 5 a 6 byly naměřeny průměrně nejvyšší hodnoty a v úseku 2 nejnižší. Pro ilustraci poslouží graf na obr. 14.



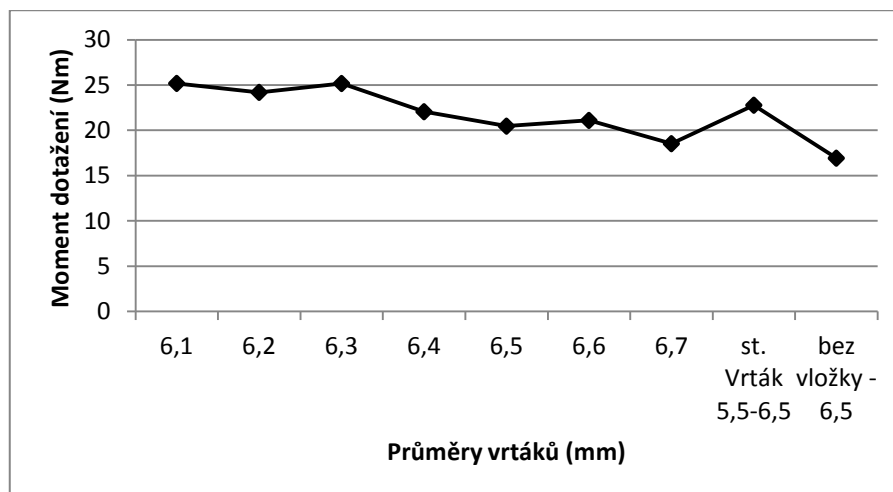
Obrázek 14: Průběh momentu dotažení v úsecích po naražení – typ A

V úseku 2 jsou tedy naměřeny průměrně nejnižší hodnoty. To poukazuje na možnou sníženou hustotu v této části. Měření neobsahuje příliš extrémní hodnoty při porovnání mediánu se střední hodnotou. Hodnoty rozptylu poukazují na střední míru heterogenity.

Při pohledu na tabulku 2 vidíme změnu odporu při zvětšování průměru vrtáku a následně vliv stupňovitého vrtáku a otvoru bez habrové vložky. Důležitý poznatek je rozdíl mezi vrtáním vrtákem o průměru 6,5 mm a stupňovitým vrtákem 5,5 – 6,5 mm.

Průměrný odpor je o cca 2,3 Nm vyšší u stupňovitého vrtáku. To se dá vysvětlit určitým zhuštěním dřevní hmoty při předvrtávání stupněm o 1 mm tenčím.

Otvor bez habrové vložky byl vrtán průměrem 6,5 mm. Oproti otvoru s vložkou má v průměru o 3,53 Nm nižší odpor. Habrová vložka tedy zvyšuje u tohoto typu moment o zhruba tuto hodnotu. Pro ilustraci je opět uveden graf.



Obrázek 15: Průměrný odpor jednotlivých typů vrtáků u typu A

5.1.2 Měření po rozvolnění a 14 dnech

Nyní bude u tohoto typu následovat měření po rozvolnění kolíků a po 14 dnech. Měření i vyhodnocení probíhalo dle postupu, uvedeném v metodice. Následuje přehled naměřených hodnot.

Tabulka 4: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ A

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	18,39	17,72	15,00	16,06	16,89	16,39	15,78	15,06
Medián	19	18,5	14	15	17	15,5	16,5	14,5
Směr. odchylka	3,24	2,80	3,09	3,49	3,46	2,75	3,64	3,33
Rozptyl výběru	10,49	7,86	9,53	12,20	11,99	7,55	13,24	11,11
Var. koef.	17,6	15,8	20,6	21,7	20,5	16,8	23	22,1
Minimum	14	13	11	11	10	13	9	10
Maximum	24	24	21	22	22	21	21	21

Tabulka 5: Celkový přehled hodnot po rozvolnění u typu A

celkově	
Stř. hodnota	16,42
Medián	16
Směr. odchylka	3,35
Rozptyl výběru	11,25
Variační koeficient	20,4
Minimum	9
Maximum	24

Tabulka 6: Moment dotažení po 14 dnech v úsecích – typ A

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	13,94	12,33	14,33	14,44	16,06	15,72	14,78	14,50
Medián	14	12,5	14,5	14	16,5	15,5	15,5	14
Směr. odchylka	2,94	2,54	2,54	3,24	2,82	2,61	3,23	3,01
Rozptyl výběru	8,64	6,47	6,47	10,53	7,94	6,80	10,42	9,09
Var. koef.	21	20,6	17,8	22,5	17,6	16,6	21,8	20,8
Minimum	10	9	10	10	11	11	10	10
Maximum	19	18	20	20	20	20	20	21

Tabulka 7: Celkový přehled hodnot po 14 dnech – typ A

Celkově	
Stř. hodnota	14,51
Medián	15
Směr. odchylka	3,00
Rozptyl výběru	9,00
Variační koeficient	20,7
Minimum	9
Maximum	21

Při pohledu na střední hodnoty v tabulce 5 vidíme, že průměrný pokles hodnot odporu po rozvolnění kolíků je 5,43 Nm oproti prvnímu měření. Nejsou zde uvedeny záměrně tabulky pro jednotlivé typy vrtáků, protože zde nedochází prakticky k žádným změnám průběhu, pouze ke snížení hodnot odporu celkově. Platí zde přibližně stejné vztahy, co se týče poklesu odporu při zvyšujícím se průměru vrtáku a taky vztah stupňovitého vrtáku a vrtání bez habrové vložky k vrtáku průměru 6,5 mm. Porovnání těchto hodnot přináší kapitola dodatečná diskuze.

Při porovnání středních hodnot odporů po rozvolnění a po 14 dnech vidíme průměrný pokles zhruba o 1,9 Nm. Tato skutečnost se dá zdůvodnit jevem zvaným tečení dřeva. Při trvalém namáhání dřeva vznikají mimo pružných deformací také deformace pružné v čase a deformace plastické. Krátkodobá pevnost dřeva je vždy vyšší, než při dlouhodobém zatížení (Požgaj et al. 1997).

Při dlouhodobém zatížení dochází k přeskupování vazeb molekul a k postupnému uvolňování napětí kolem kolíku. Z tohoto důvodu dojde vždy k poklesu napětí kolem kolíku a tím pádem i ke snížení momentu dotažení. Z těchto měření je tedy zřejmé, že rozvolnění sníží hodnotu momentu v průměru o 5,43 Nm a veličina času (v tomto případě 14 dní) má za následek pokles hodnot o 1,9 Nm.

Stupňovitý vrták dosahuje vždy vyšších hodnot (v průměru o 2 Nm) než vrták 6,5 mm. Habrová vložka má za následek průměrné zvýšení hodnot odporu u všech měření o 2,11 Nm. Rozptyl je u každého dalšího měření nižší, což vypovídá o vyrovnávání rozdílů mezi měřeními v průběhu času.

5.2 Měření odporu rezistografem

U kolíčnicku typu A byl změřen odpor v každé z osmi částí. Hodnoty byly staženy do PC, ořezány a zprůměrovány pro jednotlivé části a pro celý kolíčnick. V příloze jsou uvedeny křivky pro každé měření.

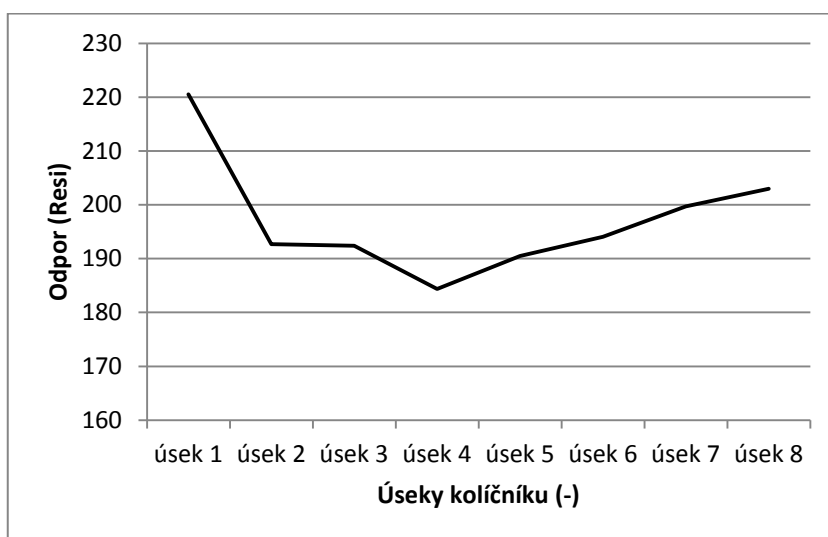
Hodnoty jsou v jednotkách „Resi“. Je to umělá jednotka, která se používá jen u tohoto zařízení, nicméně pro porovnání je vhodná. Byla provedena i korelace mezi průměrnými momenty dotažení a průměrným odporem z rezistografu, ale statisticky významná korelace se neprokázala. Pearsonův korelační koeficient je zhruba 0,48. Ovšem, abychom mohli tvrdit, že je korelace statisticky významná, je potřeba při $\alpha = 0,05$ a $n = 8$ alespoň hodnota 0,70.

Uvedená tabulka se týká hodnot ihned po naražení kolíků. Korelace mezi hodnotami po rozvolnění a po 14 dnech není uvedena, protože vychází mnohem nižší.

Tabulka 8: Korelace mezi momenty po naražení a odporem u rezistografu

Odpor z rezistografu (Resi)	Průměrné odpory (Nm)	Úseky
220,5418831	21,000	1
192,6651451	20,118	2
192,4029557	21,529	3
184,3842428	22,882	4
190,4596413	23,706	5
194,0607326	23,412	6
199,7046784	21,278	7
202,9731028	20,778	8

R = 0,48



Obrázek 16: Rozložení odporu podle rezistografu – typ A

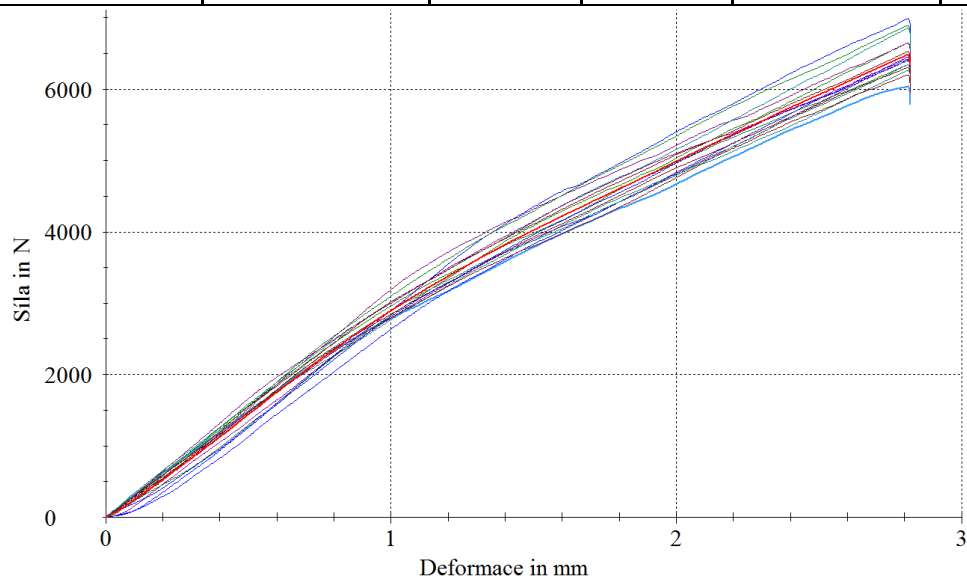
Při porovnání grafu z obrázku 16, který zobrazuje průběh hodnot odporu měřených rezistografem s průběhem uvedeným na obr. 14 je zřejmé, že korelace nemůže existovat. Je to tím, že vrtání probíhalo jen jedno v každém úseku a samotný vrt má průměr zhruba 3 mm. V některé z dých mohla být v tomto místě nějaká anomálie jako je řídký nebo naopak hustý letokruh, suk, prasklina apod. a to mohlo měření negativně ovlivnit a přinést tím pádem zcela jiné výsledky.

5.3 Měření hustoty a dalších mechanických vlastností

Na zkušební stroji bylo provedeno nejprve měření tvrdosti v ploše a v hraně. Společně s touto zkouškou byly naměřeny i hodnoty distribuce hustoty, práce do meze pevnosti a tuhost. Byla provedena statistika těchto hodnot. Zde jsou výsledky:

Tabulka 9: Statistika měření v hraně – typ A

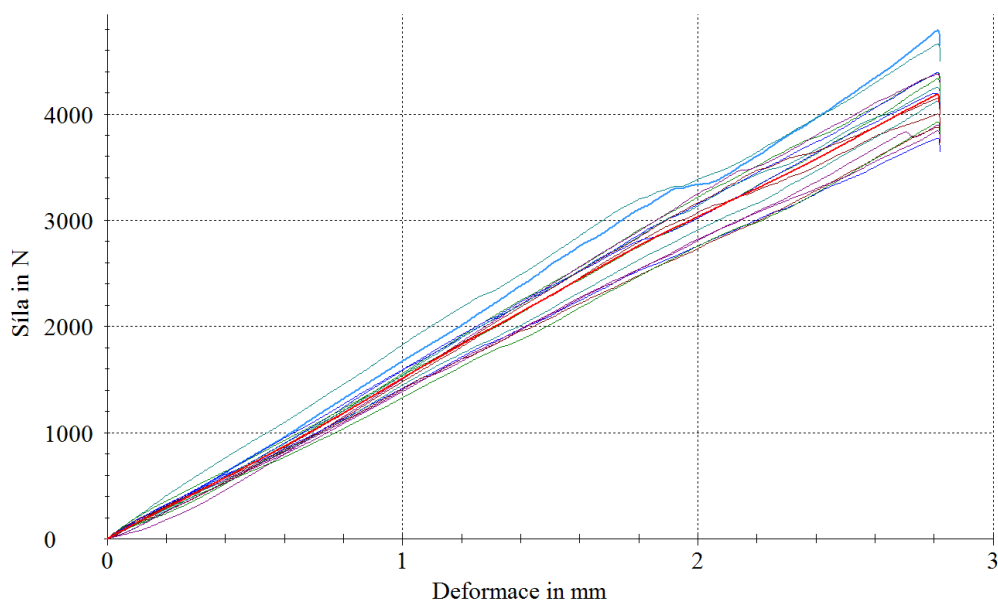
	Jankova tvrdost	Práce	Tuhost	Vtisk 1000 N	Vtisk 500 N
	<i>N</i>	<i>N.mm</i>	<i>N.mm⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	6481,99	10095,31	2975,61	0,36	0,19
Medián	6414,51	10004,90	2952,68	0,345	0,18
Směr. odchylka	262,46	405,58	185,76	0,04	0,04
Rozptyl	68885,63	164498,03	34506,93	0,00	0,00
Var.koef.	4	4	6,2	12,2	19,3
Minimum	6033,5	9541,8	2682,6	0,31	0,15
Maximum	6988,5	10827,1	3342	0,46	0,28



Obrázek 17: Pracovní diagramy tvrdosti v hraně – typ A

Tabulka 10: Statistika měření v ploše – typ A

	Jankova tvrdost	Práce	Tuhost	Vtisk 1000 N	Vtisk 500 N
	<i>N</i>	<i>N.mm</i>	<i>N.mm⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	4186,20	5948,49	1489,66	0,69	0,35
Medián	4172,16	6051,50	1454,83	0,7	0,35
Směr. odchylka	295,39	422,03	169,61	0,06	0,04
Rozptyl výběru	87254,8	178109,9	28767,5	0,00	0,00
Var. koef.	7	7,1	11,4	8,2	11,4
Minimum	3772,5	5372,4	1255	0,54	0,25
Maximum	4787,8	6833,4	1734,7	0,77	0,42

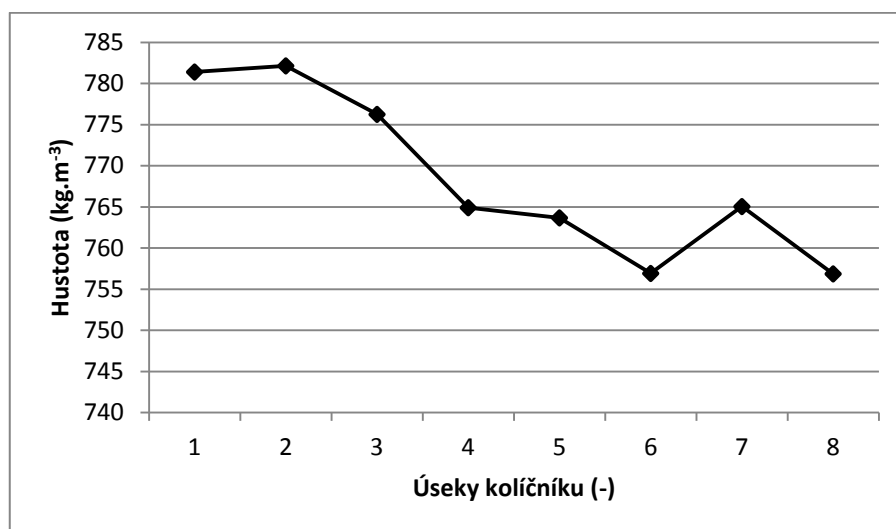


Obrázek 18: Pracovní diagramy měření v ploše – typ A

Prvotní poznatek je, že Jankova tvrdost je průměrně vyšší v hraně a to o 2295 N. Je to způsobeno tím, že dřevo obecně dosahuje obecně vyšších hodnot pevnosti při tlaku rovnoběžně s vlákny než při tlaku kolmo na vlákna díky rozdílnému způsobu namáhání fibril. Při měření tvrdosti v hraně byl tlak vyvozován na střídavé vrstvy dých a při měření v ploše, působil tlak jen kolmo na vlákna.

Další měřený parametr byl práce do meze pevnosti. Je to povrch plochy pod křivkou až do meze pevnosti. Zde nebylo dosaženo meze pevnosti jako takové, ale hloubka vtisku 2,82 mm. Přesto rozdíl hodnot je 4147 N.mm ku prospěchu měření v hraně. Zbylé hodnoty tuhosti a hloubky vtisku při tlaku 500 N a 1000 N jen dokazují tvrzení o vyšších hodnotách v hraně.

Provedená analýza rozptylu mezi jednotlivými úseky neukázala žádný statisticky významný rozdíl, ovšem vyjma hustoty. Hustota se významně liší mezi úseky kolíčníku. Její průběh je zobrazen na následujícím grafu:



Obrázek 19: Distribuce hustoty v kolíčníku typu A

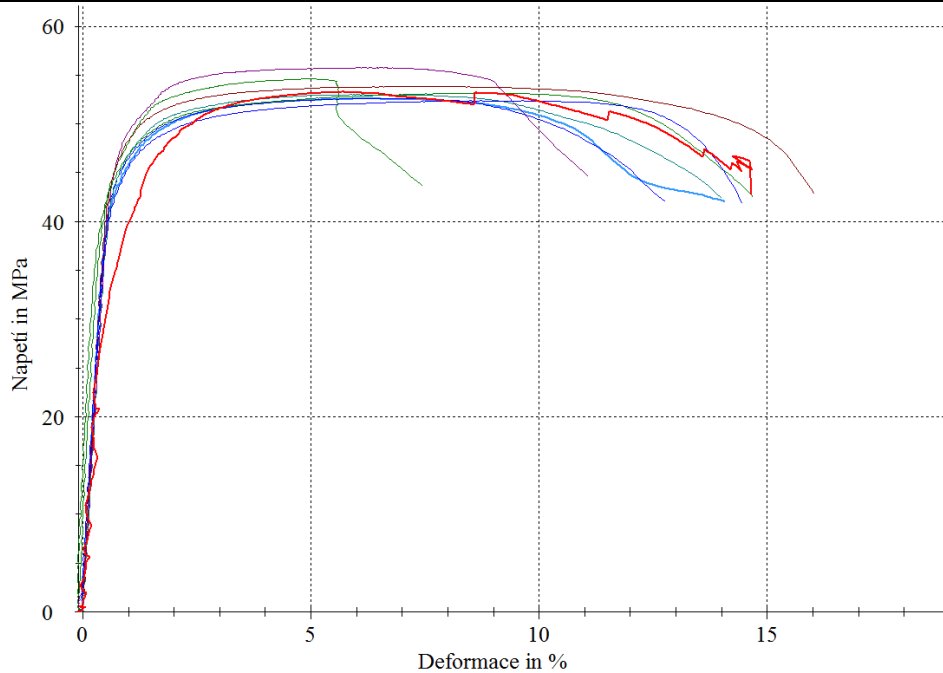
U tohoto typu se ukázala silná závislost mezi průběhem hustoty a Jankovou tvrdostí měřené v ploše (0,81), také s prací (0,81) a s tuhostí (0,81). Byla provedena korelace mezi momentem dotažení a distribucí hustoty ovšem, podobně jako u rezistografu, se neukázala žádná významná korelace. Pouze mezi měřením po rozvolnění a distribucí hustoty byl vypočítán korelační koeficient 0,57, což už by mohlo být považováno za jistou závislost u heterogenních materiálů. Je možné, že při větším počtu měření by se závislost ukázala, ale k přihlédnutí k tomu, že máme v každém úseku provedeny pouze 2 měření hustoty a 18 měření odporů, se tuto skutečnost můžeme pouze domnívat. Tuto domněnku potvrzují i korelace mezi hustotou a naměřenými veličinami, které taktéž nevycházejí uspokojivě.

Například hustota a tvrdost vykazují kladnou korelaci o hodnotě 0,47, což by mohlo být u více měření považováno za závislost, protože jak známo, se zvyšující se hustotou obecně tvrdost narůstá.

Dále byla provedena zkouška v tlaku. Zde bylo provedeno v každém úseku 8 měření. Výsledek uvádí tabulka 11.

Tabulka 11: Měření pevnosti v tlaku – typ A

	Mez pevnosti	Deformace na mezi pevnosti	Modul pružnosti	Práce
	MPa	%	Mpa	N.mm
Stř. hodnota	53,49	6,82	7857,93	54626,81
Medián	53,08	6,165	8002,93	49365,94
Směr. odchylka	1,18	1,42	511,11	11606,69
Rozptyl výběru	1,39	2,01	261236,24	134715232,63
Variační koeficient	2,2	20,8	6,5	21,3
Minimum	52,37	4,98	6861,37	40251,42
Maximum	55,76	8,73	8415,85	71022,08



Obrázek 20: Pracovní diagramy měření – typ A

5.4 Měření momentu dotažení u typu B

5.4.1 Měření po naražení

Druhý typ kuličnicku je rovněž vyroben z překližky z bukových dřív, tentokrát ze 17 vrstev, o celkové tloušťce 32 mm. Hustota této překližky je 880 kg.m^{-3} , což z ní činí typ s největší hustotou. Vypočítaná vlhkost je 5,1 %. Pracovní postup nabíjení kuliček je identický s prvním typem. První bude uvedena popisná statistika momentů dotažení po naražení. Úsek 1 znamená basová část kuličnicku a úsek 8 diskantová část.

Tabulka 12: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ B

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	29,24	26,59	24,59	25,06	26,50	26,88	28,25	26,17
Medián	30	28	24,75	25	25	27	28,25	26,5
Směr. odchylka	5,04	4,33	4,03	3,17	3,94	3,39	4,00	3,97
Rozptyl výběru	25,44	18,76	16,24	10,06	15,50	11,49	16,03	15,76
Var. koef.	17,3	16,3	16,4	12,7	14,9	12,6	14,2	15,2
Minimum	20	18	17	19	21	20	22	19
Maximum	39	33	32	30	34	35	35	32,5

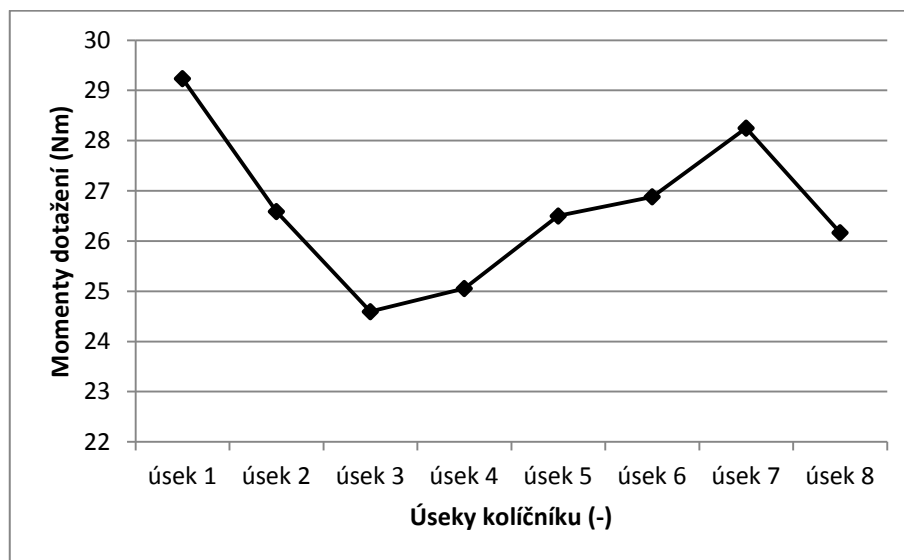
Tabulka 13: Moment dotažení po naražení u vrtáků – typ B

	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	Stup. Vrták 5,5-6,5	Bez vločky - 6,5
Stř. hodnota	31,29	30,88	29,09	27,43	26,59	24,93	21,63	27,41	21,47
Medián	32	30,5	29	28	26	25,5	22	27,5	22
Směr. odchylka	2,49	3,59	2,97	2,01	3,26	1,69	2,39	2,35	1,68
Rozptyl výběru	6,18	12,92	8,81	4,03	10,63	2,84	5,72	5,51	2,84
Variační koeficient	8	11,6	10,2	7,3	12,3	6,8	11,1	8,6	7,9
Minimum	26	27	22,5	24	22	22	17	24	19
Maximum	35	39	35	31	34	27	25	31	25

Tabulka 14: Celkový přehled momentů – typ B

celkově	
Stř. hodnota	26,65
Medián	27
Směr. odchylka	4,16
Rozptyl výběru	17,3
Variační koeficient	15,6
Minimum	17
Maximum	39

Byla opět provedena analýza rozptylu pro zjištění, které střední hodnoty se statisticky významně liší od ostatních. Pomocí Scheffeho testu bylo zjištěno, že rozdíl je mezi úsekem 1, 3 a 4 a dále pak mezi 3 a 7. Graf na obr. 21 zobrazuje průběh momentů dotažení v rámci celého količnicku. Úsek 1 dosahuje nejvyšších hodnot, úsek 3 hodnot nejnižších. Rozdíl mezi těmito dvěma je poměrně vysoký – 4,64 Nm. To by mohlo poukazovat na vysoké rozdíly v hustotě. Oproti typu A dosahuje v průměru o 4,82 Nm vyšších hodnot, což je dáno vyšší hustotou.



Obrázek 21: Průběh momentů v jednotlivých úsecích - typ B

Úsek č. 2 obsahuje jisté extrémní hodnoty, které ovlivňují střední hodnotu ve smyslu dekrementace. Rozptyl je poměrně vysoký a to může poukazovat na vyšší heterogenitu materiálu než u ostatních typů. Charakter hodnot momentu dotažení mezi jednotlivými typy vrtáků je zde obdobný jako u prvního typu. Opět můžeme vidět náhlý vzestup odporu u stupňovitého vrtáku, už ovšem ne tak vysoký jako u količnicku typu A. Jde o hodnotu 0,82 Nm. Vliv habrové vložky je zde ovšem větší. Rozdíl odporů mezi vrtákem o průměru 6,5 mm vrtaným s vložkou a bez ní je 5,12 Nm.

5.4.2 Měření po rozvolnění a po 14 dnech

Tabulka 15: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ B

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	22,71	23,39	22,28	21,17	23,11	22,22	23,65	22,94
Medián	22	23,5	22	21	22,5	22,5	24	23
Směr. odchylka	4,14	3,81	3,54	3,09	2,61	3,78	3,69	3,46
Rozptyl výběru	17,14	14,49	12,57	9,56	6,81	14,30	13,62	11,94
Variační koeficient	18,2	16,3	15,9	14,6	11,3	17	15,6	15,1
Minimum	15	15	17	15	19	15	17	18
Maximum	29	30	29	26	28	28	31	29

Tabulka 16: Celkový přehled hodnot po rozvolnění u typu B

celkově	
Stř. hodnota	22,68
Medián	23
Směr. odchylka	3,51
Rozptyl výběru	12,34
Variační koeficient	15,5
Minimum	15
Maximum	31

Tabulka 17: Moment dotažení v úsecích po 14 dnech – typ B

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	20,33	20,11	19,22	18,44	19,22	18,56	18,94	18,06
Medián	20	20,5	19	18	19	19	19	17,5
Směr. odchylka	3,46	3,45	3,26	2,66	2,41	2,97	3,03	3,24
Rozptyl výběru	11,95	11,87	10,65	7,08	5,83	8,85	9,18	10,53
Var. koef.	17	17,1	17	14,4	12,6	16	16	18
Minimum	14	13	15	14	15	12	13	13
Maximum	26	26	26	22	25	23	25	23

Tabulka 18: Celkový přehled momentu dotažení po 14 dnech u typu B

Celkově	
Stř. hodnota	19,09
Medián	19
Směr. odchylka	3,08
Rozptyl výběru	9,50
Variační koeficient	16,2
Minimum	12
Maximum	26

Po provedení jednofaktorové analýzy rozptylu u měření po rozvolnění bylo zjištěno, že v tomto případě neexistuje statisticky významný rozdíl (při $\alpha=0,05$) mezi středními hodnotami jednotlivých úseků. Rozdíly jsou tedy minimální, dřevo tímto rozvolněním zrelaxovalo a rozdíly mezi úseky se snížily.

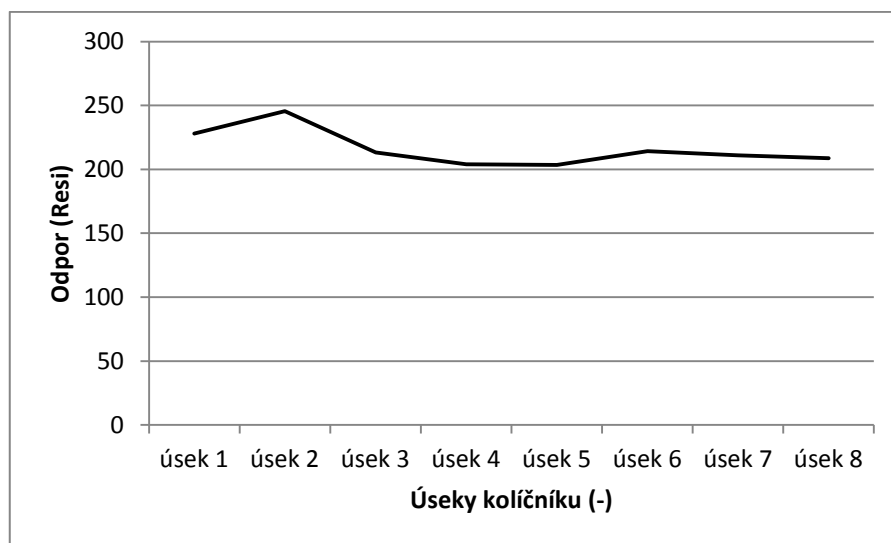
Průměrný odpor po rozvolnění je nižší o 3,97 Nm oproti odporu po naražení. Rozdíl mezi úsekem 4 (s nejnižší hodnotou) a úsekem 7 s hodnotou nejvyšší je 2,48 Nm. Což je oproti předchozím případům skutečně zatím nejméně. Rozvolněním se tedy odpory víceméně egalizovaly. Toto dokazují i menší rozdíly mezi střední hodnotou a mediánem a také snížení průměrného rozptylu ve všech úsecích.

Hodnoty a graf závislosti momentu dotažení a typů vrtáků zde není záměrně zobrazen, protože charakter je stále stejný, pouze došlo k průměrnému poklesu hodnot. Co se týče hodnot pro měření, které proběhlo po 14 dnech, tak uvedené měření vykazuje o 2,78 Nm nižší hodnoty odporu ve srovnání s druhým měřením. To je oproti typu A větší pokles. Analýza rozptylu opět neukázala významné rozdíly mezi jednotlivými úseky.

Zde byl zaznamenán ještě větší pokles rozptylu oproti předchozímu měření, což znamená, že odpor se ještě více egalizoval díky tečení dřeva.

5.5 Měření rezistografem

Na tomto typu kolíčnicku bylo taktéž provedeno měření rezistografem na 8 místech. Jednotlivé křivky měření jsou uvedeny v příloze. Tento kolíčnick vykazuje nejvyšší průměrné hodnoty odporu, což se dá připsat nejvyšší hustotě. Křivka na obr. 22 zobrazuje průběh.



Obrázek 22: Průběh odporu podle rezistografu – typ B

Byla provedena korelace mezi hodnotami odporu (Resi) a momenty dotažení. Nejvyšší hodnota Pearsonova korelačního koeficientu vyšla v tomto případě u měření po 14 dnech a to vyšší než u typu A – 0,76. Zde by se již dalo hovořit o závislosti. Ovšem tento případ je spíše ojedinělý, protože ostatní hodnoty vycházejí výrazně nižší. Ukazuje se tedy, že toto měření nemá příliš vypovídající hodnotu o hustotě, protože zobrazuje distribuci hustoty pouze na základě několika málo měření, které mohou být ovlivněny již výše uvedenými anomáliemi dřeva.

Tabulka 19: Korelace s odporem po 14 dnech u typu B

Úseky	Průměrné odpory (Nm)	Odpor z rezistografu (Resi)
1	20,33	228,04
2	20,11	245,60
3	19,22	213,18
4	18,44	204,00
5	19,22	203,54
6	18,56	214,27
7	18,94	210,90
8	18,06	208,60

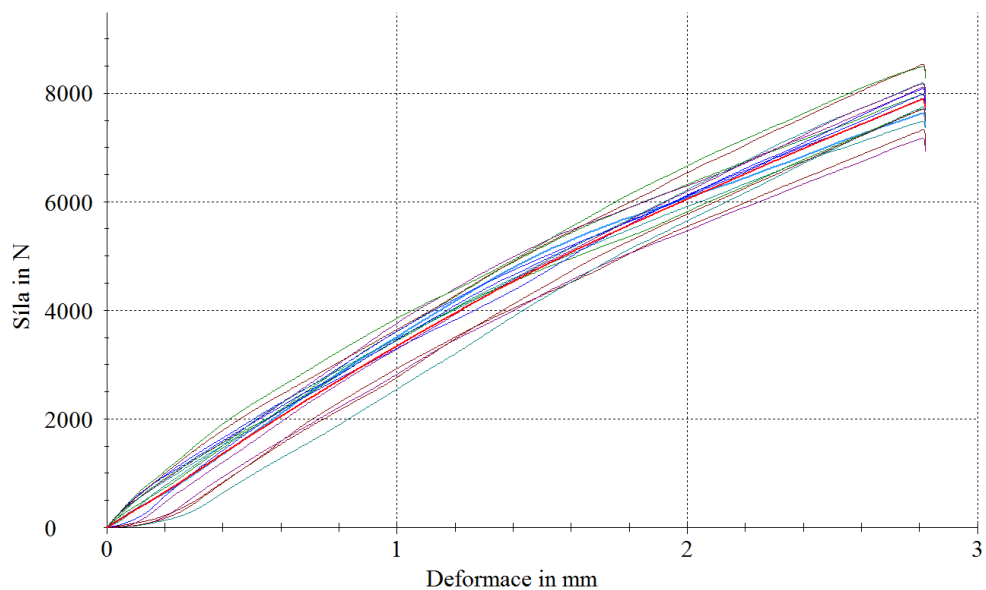
$$r = 0,76$$

5.6 Měření hustoty a dalších mechanických vlastností

Nejprve byla provedena zkouška tvrdosti na hraně i v ploše. První je uvedeno měření v hraně.

Tabulka 20: Měření tvrdosti v hraně – typ B

	<i>Jankova tvrdost</i>	<i>Tuhost</i>	<i>Práce</i>	<i>Vtisk 1000 N</i>	<i>Vtisk 500 N</i>
	<i>N</i>	<i>N.mm⁻¹</i>	<i>N.mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	7885,31	3802,04	12118,69	0,30	0,17
Medián	7936,61	3767,20	12235,48	0,27	0,13
Směr. odchylka	383,17	378,28	912,89	0,10	0,10
Rozptyl výběru	146817,44	143093,6	833361	0,01	0,01
Var. koef.	4,9	10	7,5	34	56,3
Minimum	7165	3311	10622,4	0,19	0,08
Maximum	8531,2	4521	13585,6	0,51	0,36

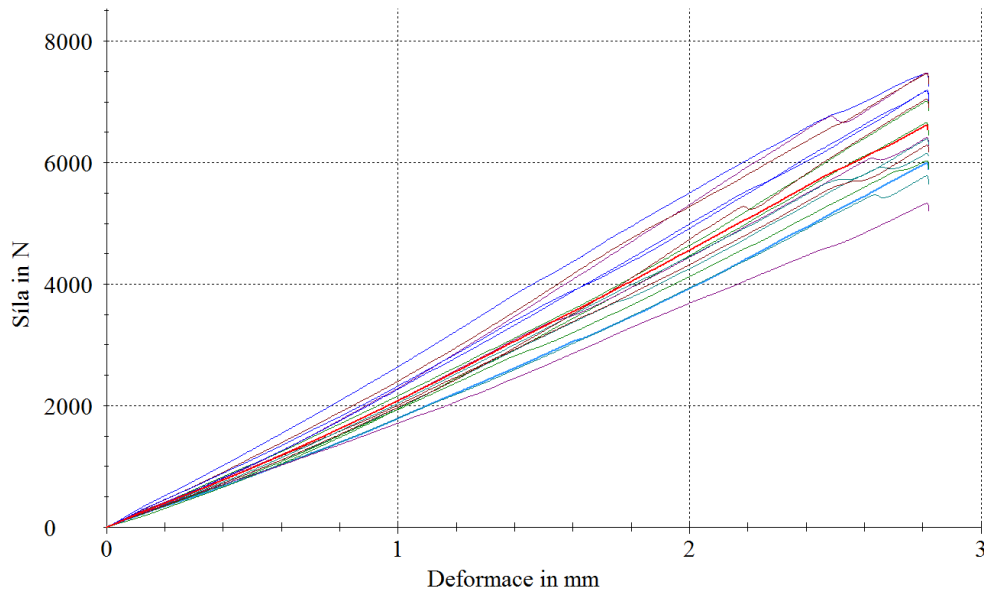


Obrázek 23: Pracovní diagramy měření tvrdosti v hraně – typ B

Nyní následuje měření tvrdosti z plochy.

Tabulka 21: Tvrdost z plochy – typ B

	Jankova tvrdost	Práce	Tuhost	Vtisk 1000 N	Vtisk 500 N
	<i>N</i>	<i>N.mm</i>	<i>N.mm⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	6616,24	8875,21	1970,33	0,52	0,26
Medián	6533,23	8705,5	1903,48	0,52	0,26
Směr. odchylka	666,75	984,37	237,26	0,06	0,03
Rozptyl výběru	444553,28	968981,6	56290,46	0,00	0,00
Var. koef.	10,1	11,1	12	11,3	12,2
Minimum	5332,3	7189,3	1596,9	0,39	0,19
Maximum	7479,1	10702,8	2512,1	0,59	0,31



Obrázek 24: Pracovní diagramy tvrdosti v ploše – typ B

Opět můžeme vidět všeobecně větší hodnoty u tvrdosti v hraně. Rozdíly ovšem již nejsou tak velké jako u typu A. Tvrdost v hraně je větší v průměru o 1269 N, tuhost o $1832 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. I v tomto případě neukázala analýza rozptylu mezi úseky kolíčníku významný rozdíl u měřených veličin, vyjma distribuce hustoty. Její rozložení ukazuje graf na obr. 25. Maxima dosahuje v úseku 3 ($887,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a minima v úseku 5 ($859,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).



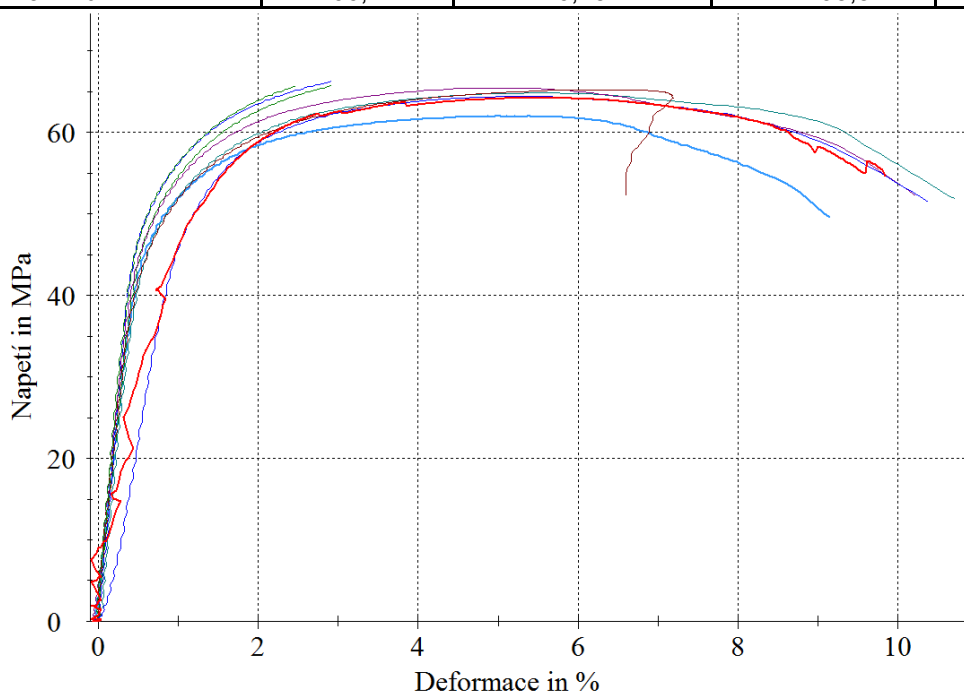
Obrázek 25: Distribuce hustoty u typu B

I zde byla provedena korelace mezi odporem dotažení kolíků pro důkaz, že hustota ovlivňuje moment dotažení, ale i tentokrát nebylo dosaženo uspokojivých hodnot. Potvrzuje se tedy domněnka, že by bylo potřeba provést větší počet měření, aby se závislost prokázala. Nicméně ukázala se silná závislost mezi tímto průběhem hustoty a Jankovou tvrdostí měřené v ploše (0,88), také s prací (0,84) a s tuhostí (0,73).

Dále proběhlo měření pevnosti v tlaku

Tabulka 22: Pevnost v tlaku – typ B

	<i>Mez pevnosti</i>	<i>Deformace na mezi pevnosti</i>	<i>Modul pružnosti</i>	<i>Práce</i>
	MPa	%	MPa	N.mm
Stř. hodnota	64,93	4,45	9136,15	37429,65
Medián	65,33	4,95	9198,42	42029,615
Směr. odchylka	1,33	1,48	1655,89	13252,80
Rozptyl výběru	1,76	2,18	2741955,36	175636679,05
Variační koeficient	2	33,2	18,1	35,4
Minimum	62	2,47	5931,7	19966,4
Maximum	66,2	6,45	11795,3	56475,3



Obrázek 26: Pracovní diagramy pevnosti v tlaku – typ B

Když porovnáme hodnoty s typem A, tak si můžeme všimnout jistých rozdílů. Pevnost v tlaku je vyšší o 11,4 MPa, což potvrzuje i průměrně vyšší celková hustota kolíčníku coby ukazatel mechanických vlastností. Poměrná deformace na mezi pevnosti je nižší a

to o 2,37 %. Količnick je tedy méně houževnatější což potvrzuje i menší hodnota práce do meze pevnosti. Při pohledu na pracovní diagram si můžeme všimnout tří křivek, u kterých nebylo dosaženo meze pevnosti a to z toho důvodu, že zkušební stroj může vyvodit maximální tlak 50 000 N a tyto vzorky i tomuto tlaku odolaly. Zkreslují tedy průměrnou hodnotu meze pevnosti, která by byla nejspíš o trochu vyšší.

5.7 Měření momentu dotažení u typu C

5.7.1 Měření po naražení

Poslední typ količnicku je vyroben taktéž ze 17 vrstev bukových dých. Tloušťka je ovšem v tomto případě 25 mm, takže lze předvídat, že hodnoty budou vycházet nižší, protože zaražený kolík již nemá takovou styčnou plochu jako při zaražení v 32 mm silném količnicku. Hustota byla vypočtena na $749,4 \text{ kg.m}^{-3}$ při vlhkosti 7,1 %.

Pro přehled je uvedena opět popisná statistika pro úseky količnicku, jednotlivé vrtáky a celkový přehled za celý količnick.

Tabulka 23: Moment dotažení po naražení v úsecích – typ C

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	17,53	16,81	15,29	14,83	15,72	13,50	13,05	13,11
Medián	17,75	16,25	15	15	15,5	13,5	14	13
Směr. odchylka	1,79	2,26	1,26	1,82	2,63	2,31	2,48	2,33
Rozptyl výběru	3,19	5,09	1,60	3,32	6,92	5,32	6,16	5,43
Var. koef.	10,2	13,4	8,3	12,3	16,7	17,1	19	17,8
Minimum	14	11	12	12	11	10	9	9
Maximum	20	20	17	18	20	19	17	16

Tabulka 24: Moment dotažení v závislosti na vrtácích – typ C

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	17,53	16,81	15,29	14,83	15,72	13,50	13,05	13,11
Medián	17,75	16,25	15	15	15,5	13,5	14	13
Směr. odchylka	1,79	2,26	1,26	1,82	2,63	2,31	2,48	2,33
Rozptyl výběru	3,19	5,09	1,60	3,32	6,92	5,32	6,16	5,43
Var. koef.	10,2	13,4	8,3	12,3	16,7	17,1	19	17,8
Minimum	14	11	12	12	11	10	9	9
Maximum	20	20	17	18	20	19	17	16

Tabulka 25: Celkový přehled hodnot po naražení u typu C

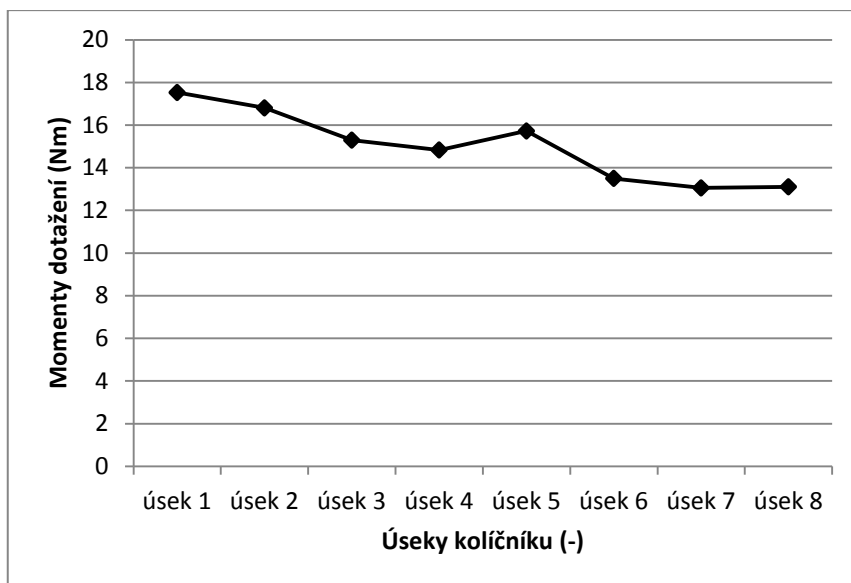
celkově	
Stř. hodnota	14,95
Medián	15
Směr. odchylka	2,64
Rozptyl výběru	6,98
Variační koeficient	17,7
Minimum	9
Maximum	20

Analýza rozptylu a následný Scheffeho test ukázal tentokrát významný rozdíl mezi mnoha úseky, proto je zde uveden i jeho výsledek což je určitě přehlednější forma. Konkrétní úseky jsou uvedeny v tabulce 26, kde buňky s černou výplní znamenají statisticky významný rozdíl mezi touto kombinací.

Tabulka 26: Scheffeho test mezi úseky po naražení pro typ C

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
úsek 1								
úsek 2								
úsek 3								
úsek 4								
úsek 5								
úsek 6								
úsek 7								
úsek 8								

Průběh zobrazuje graf na obr. 27. Z průběhu můžeme usoudit, že moment dotažení klesá od basů k diskantům, jen v úseku 5 se mírně zvyšuje a mezi úseky 7 a 8 je prakticky konstantní. Maximum je tedy v úseku 1 a minimum v úseku 7.



Obrázek 27: Průběh momentů dotažení po naražení v úsecích – typ C

Dle porovnání mediánu se střední hodnotou a rozptylu lze usuzovat, že tento kolíčník je nejvíce homogenní ze všech tří typů v rámci úseků. Jisté extrémní hodnoty se vyskytují jen v úseku 7. Poněkud rovnoměrnější je i pokles průměrných hodnot pro vrtáky. Charakter zůstává tedy i u posledního kolíčníku stále stejný co se týče vzestupu odporu u stupňovitého vrtáku a odporu bez habrové vložky.

5.7.2 Měření po rozvolnění a po 14 dnech

Tabulka 27: Moment dotažení po rozvolnění v úsecích – typ C

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	13,63	13,65	14,39	13,41	13,94	11,79	12,00	11,75
Medián	14	13	15	13	13	11,5	12	12
Směr. odchylka	1,89	2,21	1,82	1,70	2,86	1,85	1,48	1,60
Rozptyl výběru	3,58	4,87	3,31	2,88	8,17	3,41	2,20	2,57
Variační koeficient	13,9	16,2	12,6	12,7	20,5	15,7	12,4	13,6
Minimum	10	10	11	10	11	10	10	10
Maximum	17	18	17	17	23	16	14	15

Tabulka 28: Celkový přehled momentů po rozvolnění u typu C

celkem	
Stř. hodnota	13,23
Medián	13
Směr. odchylka	2,17
Rozptyl výběru	4,72
Variační koeficient	16,4
Minimum	10
Maximum	23

Tabulka 29: Moment dotažení po 14 dnech v úsecích – typ C

	úsek 1	úsek 2	úsek 3	úsek 4	úsek 5	úsek 6	úsek 7	úsek 8
Stř. hodnota	12,18	11,06	10,83	10,17	12,06	10,36	9,63	10,13
Medián	12	10,5	10,5	10	11,5	10	10	10
Směr. odchylka	1,78	1,76	1,15	1,71	1,59	2,44	2,31	2,46
Rozptyl výběru	3,15	3,11	1,32	2,94	2,53	5,94	5,36	6,05
Var. koef.	14,6	16	10,6	16,9	13,2	23,5	24	24,3
Minimum	8	9	9	6,5	10	5,5	5	5
Maximum	16	15	13	13	16	16	13	15

Tabulka 30: Celkový přehled hodnot momentu po 14 dnech pro typ C

Celkově	
Stř. hodnota	10,78
Medián	11
Směr. odchylka	2,09
Rozptyl výběru	4,39
Variační koeficient	19,4
Minimum	5
Maximum	16

Pokles po rozvolnění v porovnání s prvním měřením je zatím nejnižší ze všech druhů a to o 1,72 Nm. Průměrný pokles mezi měřeními po rozvolnění a po 14 dnech je v tomto případě 2,45 Nm. Průměrný rozptyl se mírně snížil a u obou zbylých měření má prakticky stejnou hodnotu. Rozdíly mezi úseky jsou tedy prakticky konstantní.

Provedená analýza rozptylu stále vykazuje velké rozdíly mezi úseky u obou zbývajících měření. V posledním měření se dostáváme k průměrné hodnotě 10 Nm, což už je považováno obecně za nevyhovující. I z toho důvodu tento poslední typ kolíčnicku není příliš používán.

V dodatečné diskuzi je uveden graf zobrazující průběh všech tří měření. Můžeme vidět, že charakter je velmi podobný hlavně u prvního a třetího měření. U každého měření je vidět nárůst v úseku č. 5. To by mohlo poukazovat na zvýšenou hustotu. Ovšem při porovnání s průběhem hustoty, která byla měřena dále, je vidět naopak pokles hustoty v tomto úseku, což je v protikladu s průběhem momentů dotažení. I přesto při pokusu o korelaci bylo dosaženo docela uspokojivých hodnot a to mezi měřeními ihned po naražení a po rozvolnění. Konkrétní výsledky jsou uvedeny dále.

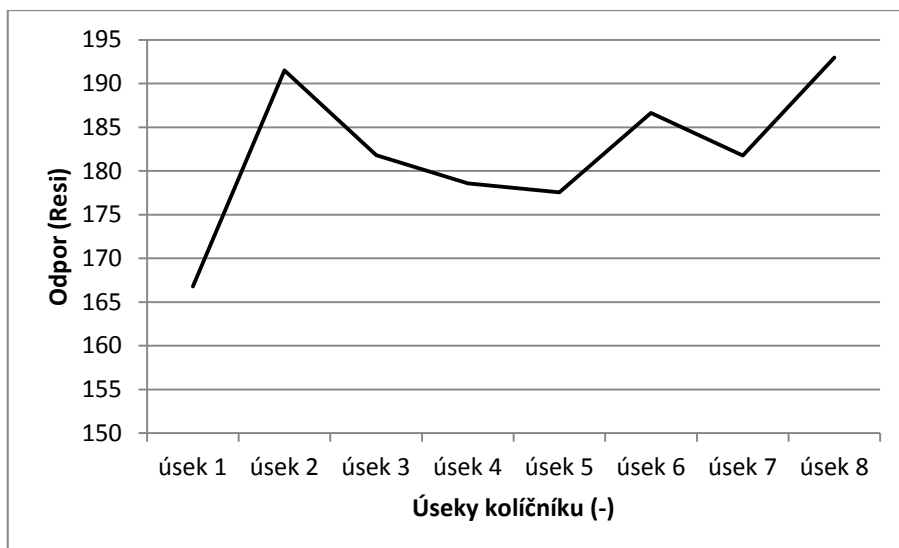
5.8 Měření rezistografem

Na závěr proběhlo taktéž měření rezistografem. Průměrný odpor byl naměřen nejnižší z důvodu menší tloušťky materiálu. Korelace mezi hodnotami po naražení se ukázala tentokrát negativní. To opět vylučuje jakoukoli závislost, protože připadají v úvahu jen kladné hodnoty (vzájemně se vylučuje nízký odpor kolíků v kombinaci s vysokým odporem u rezistografu). Konkrétní křivky z jednotlivých úseků jsou uvedeny taktéž v příloze. Z uvedených výsledků můžeme usuzovat, že měření pomocí rezistografu není vhodné pro odhad, jaký odpor budou kolíky klást při otáčení.

Tabulka 31: Korelace mezi momenty po naražení a odporem z rezistografu

Odpory z rezistografu (Resi)	průměrné odpory s úseků (Nm)	Úseky
166,788	17,528	1
191,510	16,806	2
181,803	15,294	3
178,584	14,833	4
177,540	15,722	5
186,621	13,5	6
181,781	13,053	7
192,951	13,105	8

$$r = -0,51$$



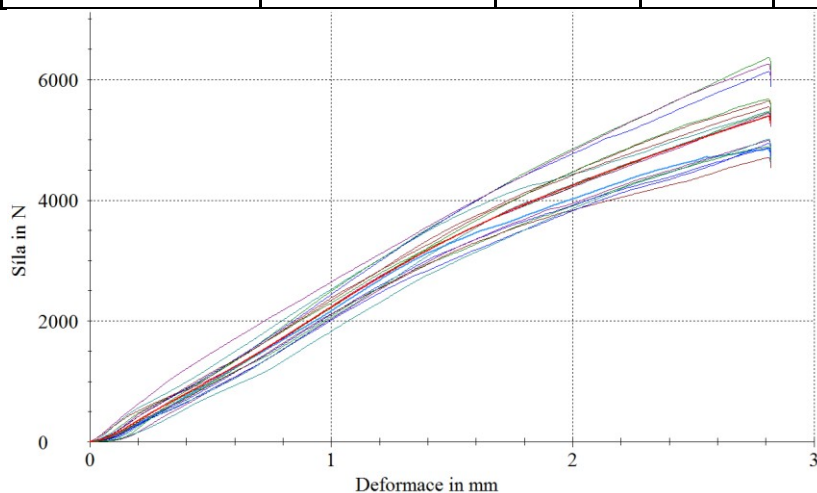
Obrázek 28: Průběh odporu v úsecích podle rezistografu

5.9 Měření hustoty a ostatních mechanických vlastností

Prvotní výsledky se týkají měření tvrdosti v hraně.

Tabulka 32: Tvrdost v hraně – typ C

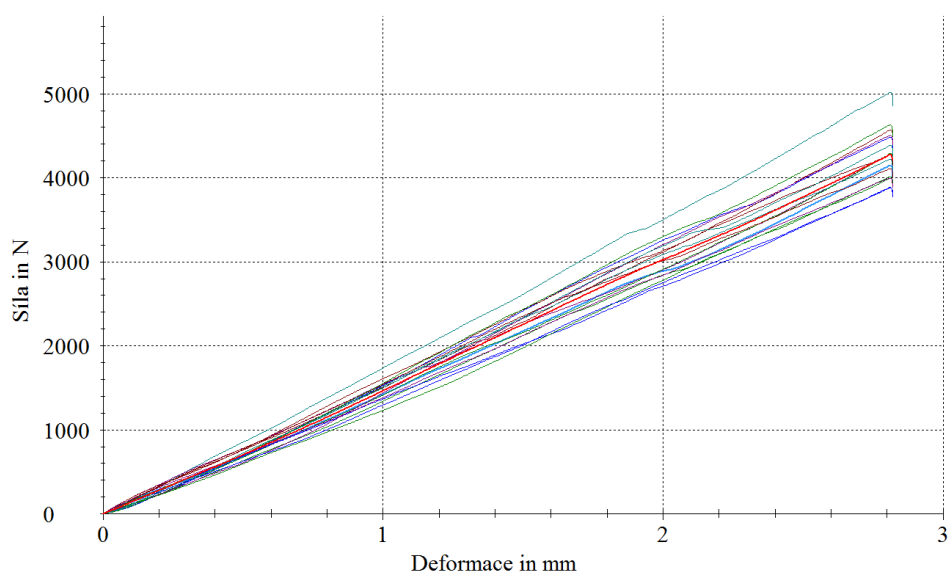
	Jankova tvrdost	Práce	Tuhost	Vtisk 1000 N	Vtisk 500 N
	<i>N</i>	<i>N.mm</i>	<i>N.mm⁻¹</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	5389,95	8296,57	2185,69	0,50	0,26
Medián	5436,19	8319,02	2157,73	0,51	0,28
Směr. odchylka	513,45	748,60	305,72	0,08	0,06
Rozptyl výběru	263634,13	560402,48	93465,17	0,01	0,00
Variační koeficient	9,5	9	14	15,1	23
Minimum	4707,5	7297,1	1845,4	0,32	0,16
Maximum	6364,5	9696,2	3101,5	0,64	0,38



Obrázek 29: Pracovní diagramy tvrdosti v hraně – typ C

Tabulka 33: Tvrdost v ploše – typ C

	Jankova tvrdost	Práce	Tuhost	Vtisk 1000 N	Vtisk 500 N
	<i>N</i>	<i>N.mm</i>	$N.mm^{-1}$	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Stř. hodnota	4275,97	5921,92	1456,38	0,71	0,36
Medián	4274,12	5979,96	1431,74	0,69	0,37
Směr. odchylka	302,14	424,79	135,56	0,06	0,04
Rozptyl výběru	91290,80	180447,67	18375,70	0,00	0,00
Variační koeficient	7,1	7,2	9,3	8,7	11,2
Minimum	3880,15	5341,44	1221,12	0,59	0,3
Maximum	5019,48	6936,57	1694,44	0,82	0,43



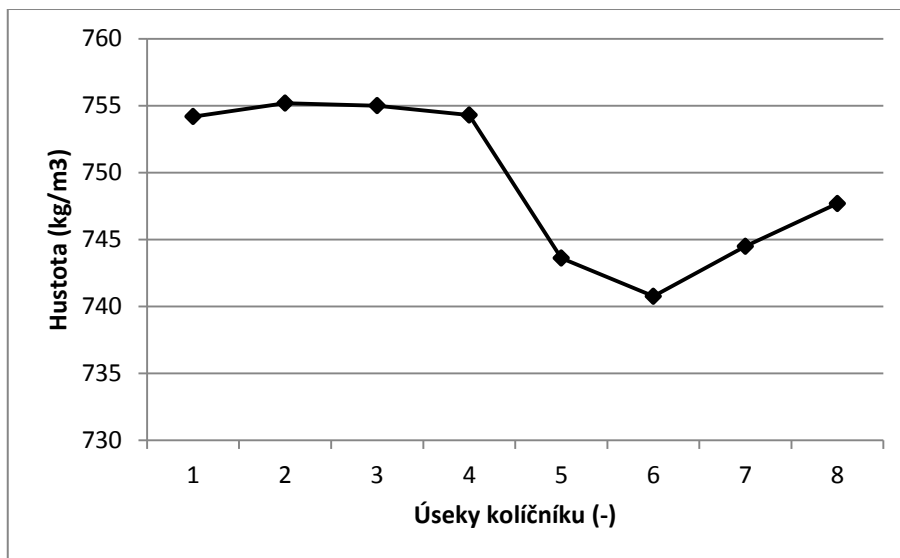
Obrázek 30: Pracovní diagramy tvrdosti v ploše – typ C

I při třetím měření mají hodnoty stejný charakter, co se týče rozdílu mezi tvrdostí v hraně a v ploše. Jankova tvrdost v hraně je vyšší o 1114 N, tuhost o $729,4 N.mm^{-1}$ a práce 2374,6 N.mm.

Pracovní diagramy mají u všech měření stejný tvar a to mírně konkávní u tvrdosti v hraně a mírně konvexní až lineární u tvrdosti v ploše. Tato skutečnost nám říká, že u měření v hraně se postupně snižuje síla, potřebná pro deformaci a v ploše se tato síla zvyšuje nebo je víceméně konstantní.

Toto se děje z toho důvodu, že při vtláčování kuličky do plochy pronikáme stále hlouběji přes křížem lepené dýhy a odpor tím stále narůstá. Kdežto kulička vtláčovaná do hrany působí na stále stejný počet vrstev. Případný mírný pokles síly u některých vzorků se dá vysvětlit delaminací dých při vtláčování kuličky mezi tyto dýhy.

Provedená analýza rozptylu také neprokázala statisticky významné rozdíly mezi měřenými vlastnostmi v úsecích kolíčníku. Pouze u hustoty je významný rozdíl mezi některými úseky. Její průběh zobrazuje obr. 31. Dle tohoto měření dosahuje hustota maxima v úseku 2 a 3 a minima v úseku 6.



Obrázek 31: Distribuce hustoty v kolíčníku – typ C

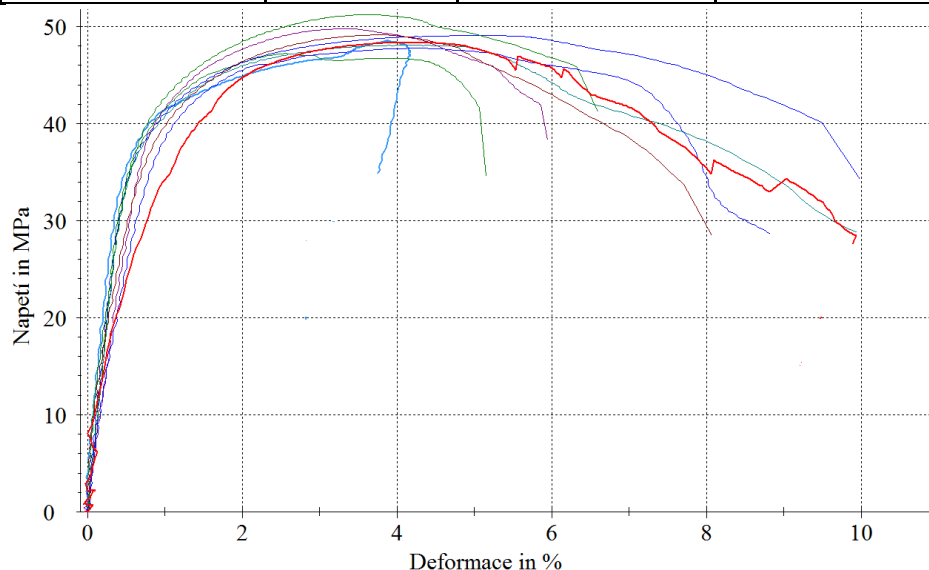
Při pokusu o korelaci s momenty dotažení kolíků se tentokrát ukázala mnohem větší závislost než u předchozích dvou typů a to u měření po naražení kolíků 0,64 a po rozvolnění 0,65. Zde tedy můžeme tvrdit, že tento typ je více homogenní a dle průběhu hustoty můžeme předpovídat, jaký bude moment dotažení.

Toto tvrzení potvrzuje i statistika ze stran 53 – 56, kde při pohledu na hodnoty rozptylu a porovnání s ostatními kolíčníky, vidíme nejnižší průměrný rozptyl mezi úseky právě u tohoto kolíčníku. U tohoto typu se neprokázala významná závislost mezi distribucí hustoty a naměřenými mechanickými vlastnostmi.

Následují výsledky měření pevnosti v tlaku.

Tabulka 34: Hodnoty pevnosti v tlaku – typ C

	Mez pevnosti	Deformace na mezi pevnosti	Modul pružnosti	Práce
	MPa	%	Mpa	N.mm
Stř. hodnota	48,85	3,77	6333,85	19969,54
Medián	48,805	3,805	6466,4	20022,895
Směr. odchylka	1,25	0,69	1243,42	4174,04
Rozptyl výběru	1,57	0,48	1546088,5	17422639,3
Variační koeficient	2,6	18,4	19,6	21
Minimum	47,2	2,56	4583,4	12587,83
Maximum	51,2	4,94	7806,8	27412,42



Obrázek 32: Pracovní diagramy pevnosti v tlaku – typ C

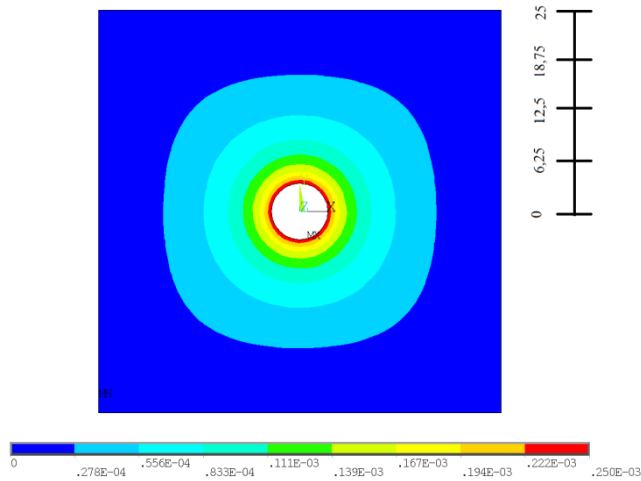
Hodnoty meze pevnosti jsou nejnižší, ale z důvodu menší tloušťky. Proto nemůže být tento kolíček při tomto měření porovnáván s ostatními.

5.10 Konečně-prvkový model

Model simuluje zaražení kolíku do kolíčníku a tlak, který je vyvozen tímto kolíkem na okolní materiál. Dále deformace, kterou způsobuje zaražený kolík. Výpočet byl proveden u každého kolíčníku, vrtáky o průměru 6,1 – 6,7 mm. Celkem bylo provedeno 21 výpočtů. Hodnoty tlaku ovlivňoval modul pružnosti a samozřejmě taky průměr otvoru.

Tyto hodnoty jsou ovšem velmi překvapivé. Výpočtem bylo zjištěno, že tlak vyvozený kolíkem se pohybuje mnohdy v řádech stovek megapascalů, čímž je mnohonásobně překročena mez pevnosti. Hodnoty tlaku jsou porovnávány s mezí pevnosti v tlaku, která byla naměřena na zkušebním stroji.

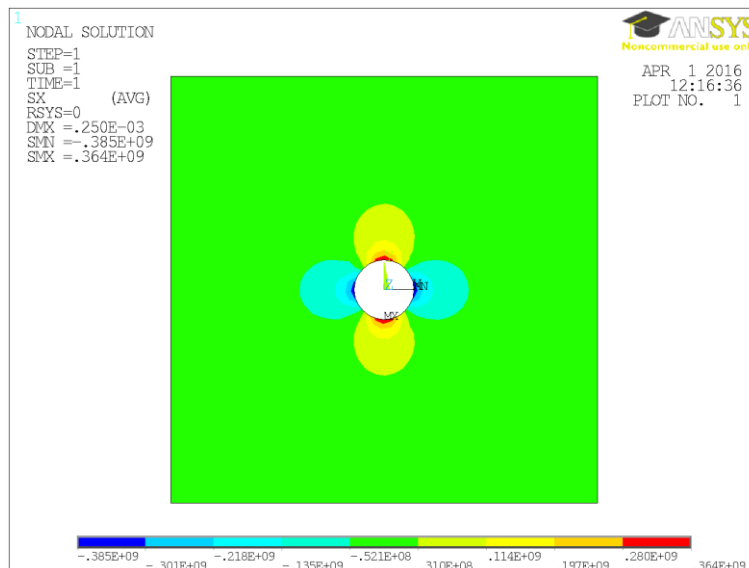
Zde je uveden příklad výsledku pro typ C a vrták o průměru 6,5 mm. Charakter výsledků je u všech výpočtů stejný, mění se pouze hodnoty tlaku v závislosti na modulu pružnosti a průměru vrtáku.



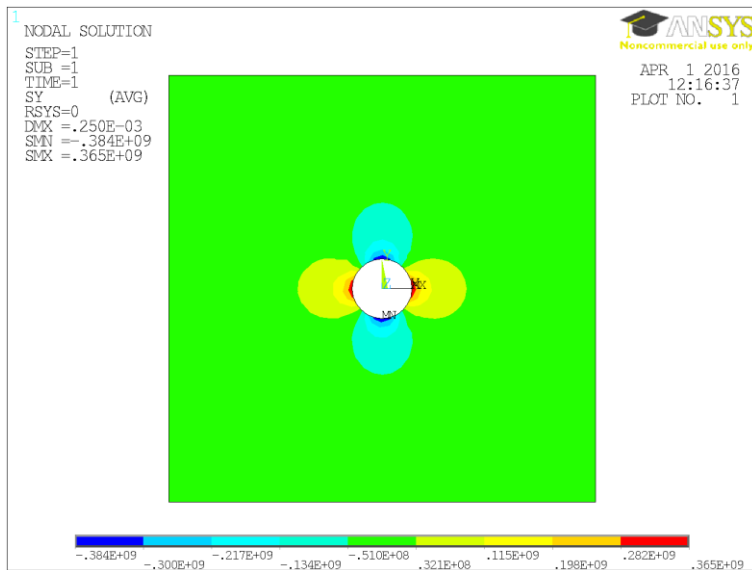
Obrázek 33: Deformace u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm

Na obrázku jsou zobrazeny deformace. Je patrné, že i ve vzdálenosti zhruba 17 mm od otvoru ještě existují deformace po zaražení kolíku o 0,27 mm.

Dále jsou uvedeny výsledky napětí v osách x a y .



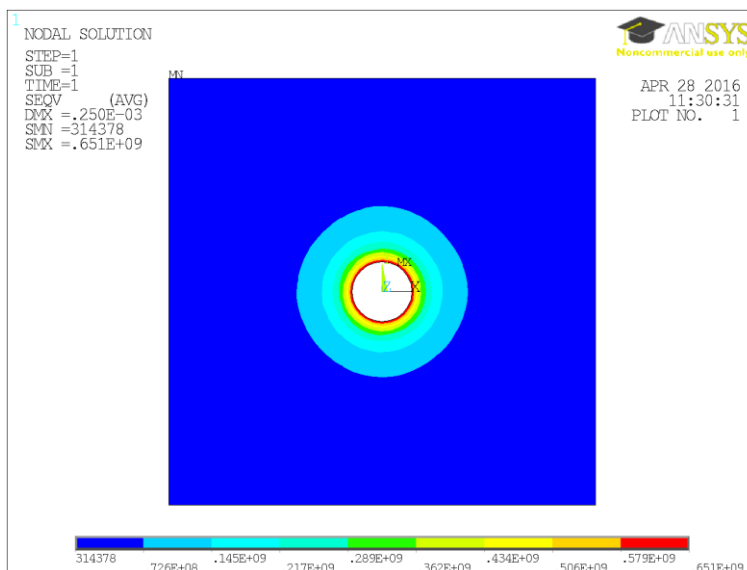
Obrázek 34: Napětí v ose x u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm



Obrázek 35: Napětí v ose y u typu C a průměru vrtáku 6,5 mm

V ose x a y je napětí prakticky identické. Jelikož zde bylo bráno v potaz napětí jen v jednom směru, tak červené a žluté plochy zobrazují místa tlaku a modré plochy místa vydutí tzn. negativního prohnutí. Maximální vyvozený tlak se nachází v červených polích a je roven 365 MPa. Tlak se projevuje do vzdálenosti zhruba 6,5 mm od otvoru a v těchto místech je roven asi 31 MPa. Při naražení kolíku tedy dojde k okamžitému porušení materiálu až do oblasti, kde je již tlak nižší než mez pevnosti v tlaku.

Ekvivalentní napětí zobrazí v barevném spektru napětí a deformace. Je nejspíš nejvíce vypovídající v dané problematice.



Obrázek 36: Ekvivalentní napětí u typu C a vrtáku 6,5 mm

Dle tohoto zobrazení působí napětí ve vzdálenosti zhruba 6,5 mm od otvoru a zde dosahuje hodnot 72 MPa. V bezprostředním okolí kolíku je součet všech složek napětí roven 651 MPa.

Následující tabulky uvádí vypočítané hodnoty napětí při naražení kolíku. Minimum se nachází ve vzdálenosti zhruba 6,5 mm od otvoru, maximum v bezprostřední blízkosti kolíku, střední hodnota poslouží pro orientaci, jak klesá napětí se snižujícím se průměrem vrtáku.

Tabulka 35: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu A

Typ A - mez pevnosti 53,5 Mpa			
Průměry vrtáků	Stř. hodnota	Min	Max
6,1	861,8	172	1550
6,2	749,2	150	1350
6,3	651,3	130	1170
6,4	546,7	109	984
6,5	448,4	89	807
6,6	356,4	71	642
6,7	263,8	52	475

Tabulka 36: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu B

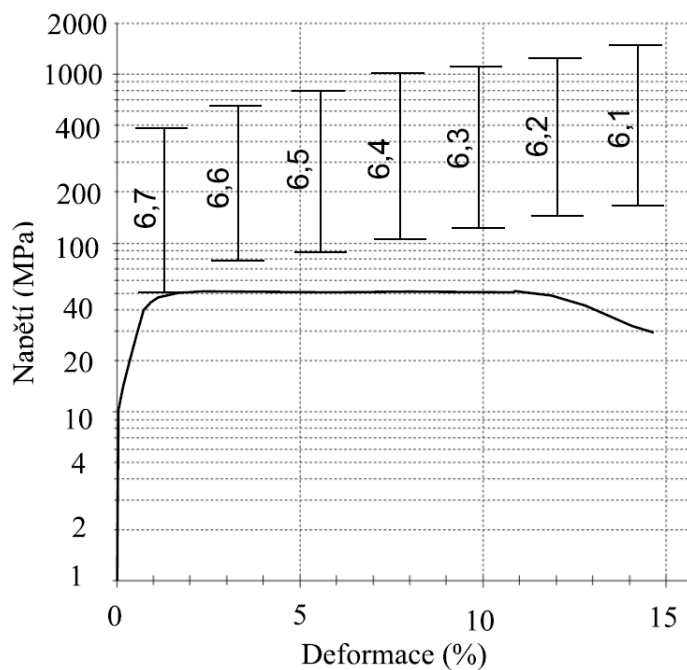
Typ B - mez pevnosti 64,9 Mpa			
Průměry vrtáků	Stř. hodnota	Min	Max
6,1	1000,4	200	1800
6,2	870,0	174	1570
6,3	758,4	152	1370
6,4	635,6	127	1140
6,5	521,6	104	939
6,6	414,3	82	746
6,7	306,8	61	552

Tabulka 37: Porovnání meze pevnosti s napětím u typu C

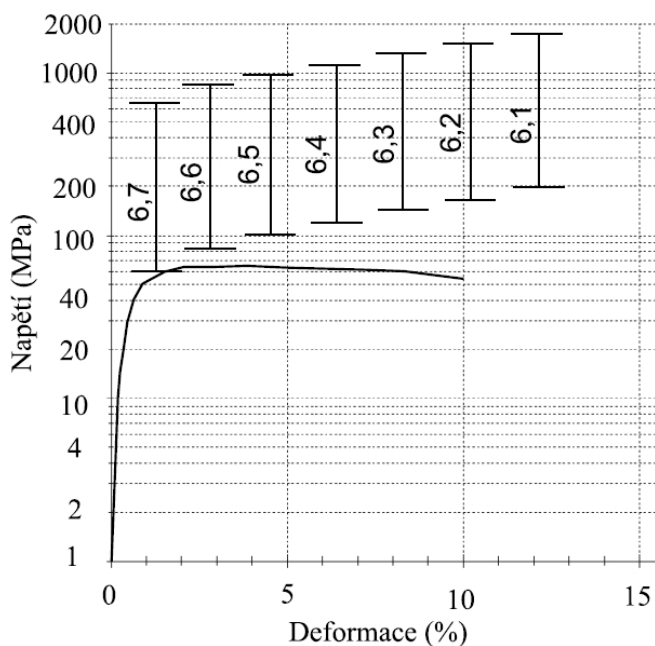
Typ C - mez pevnosti 48,8 Mpa			
Průměry vrtáků	Stř. hodnota	Min	Max
6,1	694,7	139	1250
6,2	603,9	121	1090
6,3	525,9	105	947
6,4	440,7	88	793
6,5	361,7	72	651
6,6	287,2	57	517
6,7	212,7	42	383

Vidíme, že téměř vždy dojde k porušení materiálu, jelikož je v každém případě porušena mez pevnosti v tlaku. Jediný případ, kdy by nemuselo dojít k porušení materiálu, je ve vzdálenosti 6,5 mm od otvoru, při průměru otvoru 6,7 mm. To platí u každého typu.

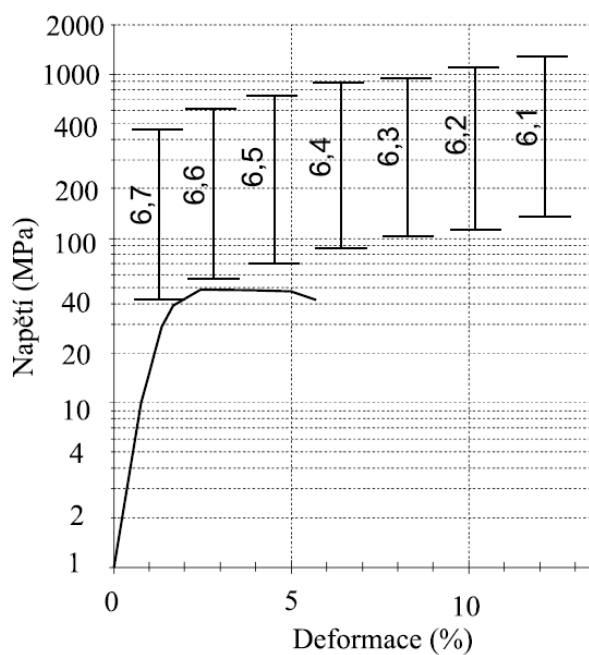
Následující grafy znázorňují oblast v pracovním diagramu, ve které se pohybují vypočítané napětí u jednotlivých typů vrtáků. Je zde zobrazeno minimum a maximum u všech průměrů a průměrná křivka pracovního diagramu pevnosti v tlaku. Pozn. osa y je logaritmická.



Obrázek 37: Přehled napětí u vrtáku – typ A



Obrázek 38: Přehled napětí u vrtáků – typ B

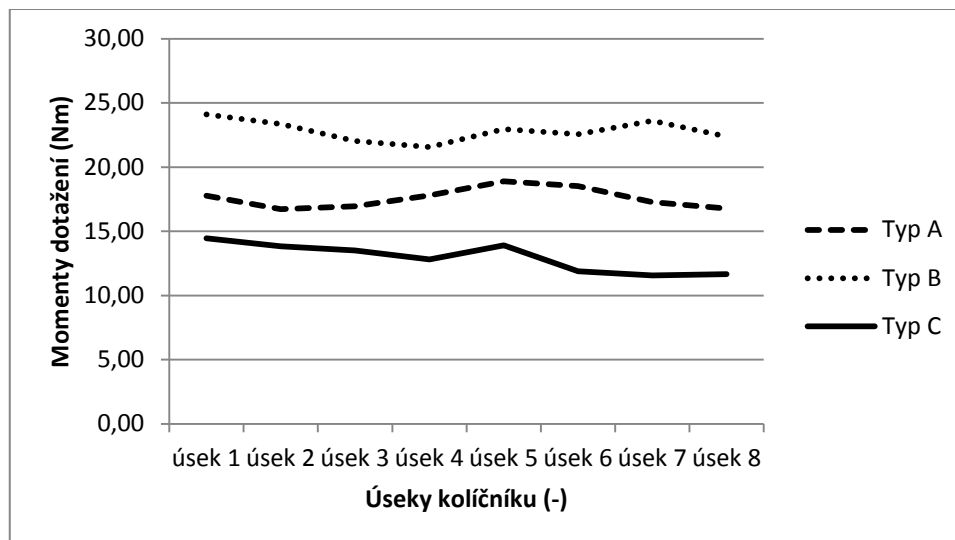


Obrázek 39: Přehled napětí u vrtáků – typ C

5.11 Dodatečná diskuze

Byl proveden test středních hodnot ze všech měření momentu dotažení. U každého kolíčníku byly zprůměrovány hodnoty ze všech měření a provedena analýza rozptylu z následným Scheffeho testem. Prokázal se statisticky významný rozdíl mezi všemi

typy količnicků. Výsledky zobrazuje obr. 40. Na něm je vidět, že hustota a tloušťka materiálu má opravdu zásadní vliv na celkové hodnoty momentu dotažení. Typ A má celkovou hustotu 761 kg.m^{-3} a tloušťku 32 mm, Typ B 880 kg.m^{-3} a 32 mm, Typ C $749,4 \text{ kg.m}^{-3}$ a 25 mm.



Obrázek 40: Průměrné momenty dotažení u všech typů

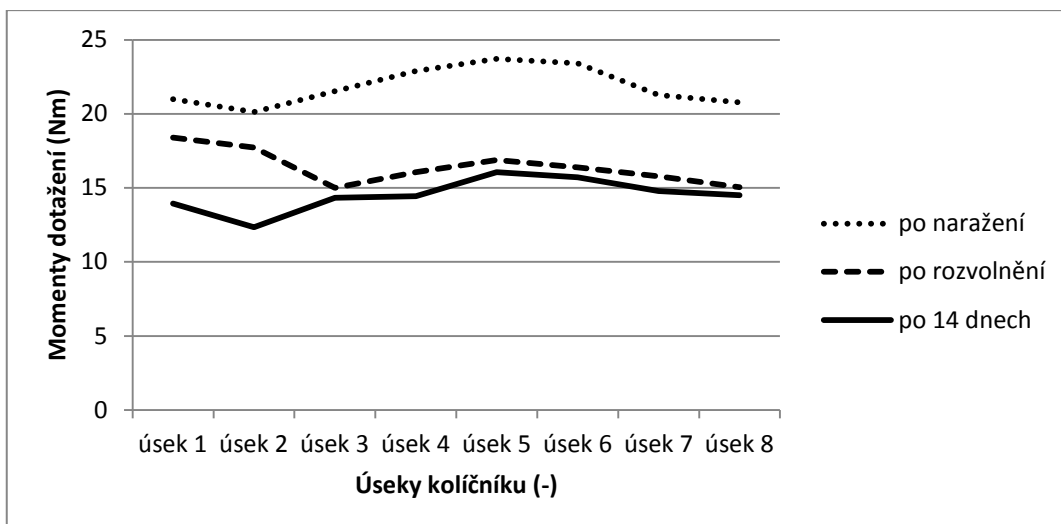
Mezi jednotlivými typy tedy existují zásadní rozdíly v naměřených momentech. V absolutním vyjádření je to průměrně 17,59 Nm u typu A, 22,82 Nm u typu B a 12,95 Nm u typu C.

Další kritérium, které bylo testováno, je rozdíl mezi měřeními po naražení, po rozvolnění a po 14 dnech. Opět se prokázal u všech typů významný rozdíl mezi všemi těmito měřeními. Faktor rozvolnění a faktor času má tedy zásadní vliv na snížení průměrného momentu dotažení. Konkrétní průměrné hodnoty jsou:

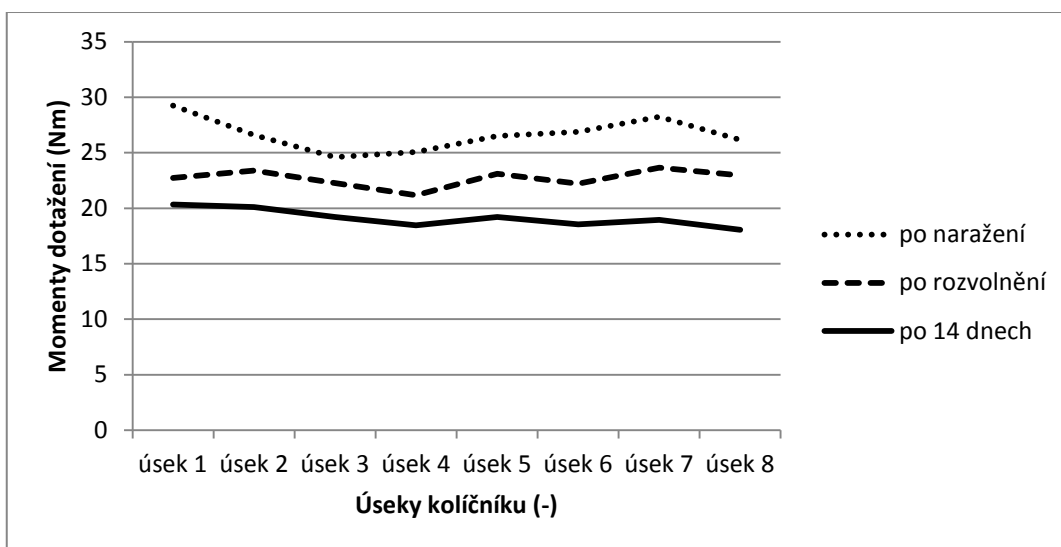
- Typ A: po naražení 21,83 Nm, po rozvolnění 16,41 Nm, po 14 dnech 14,51 Nm. Celkový pokles od prvního měření je tedy 7,32 Nm.
- Typ B: po naražení 26,66 Nm, po rozvolnění 22,68 Nm, po 14 dnech 19,11 Nm. Celkový pokles od prvního měření 7,55 Nm.
- Typ C: po naražení 14,98 Nm, po rozvolnění 13,07 Nm, po 14 dnech 10,8 Nm. Celkový pokles od prvního měření 4,18 Nm.

U všech typů se v porovnání s prvním měřením snižuje rozptyl, což naznačuje, že hodnoty se přibližují k průměru a rozdíly mezi odpory se víceméně vyrovnávají. Dřevo relaxuje, probíhá tečení dřeva, snižuje se napětí a tím pádem i odpor.

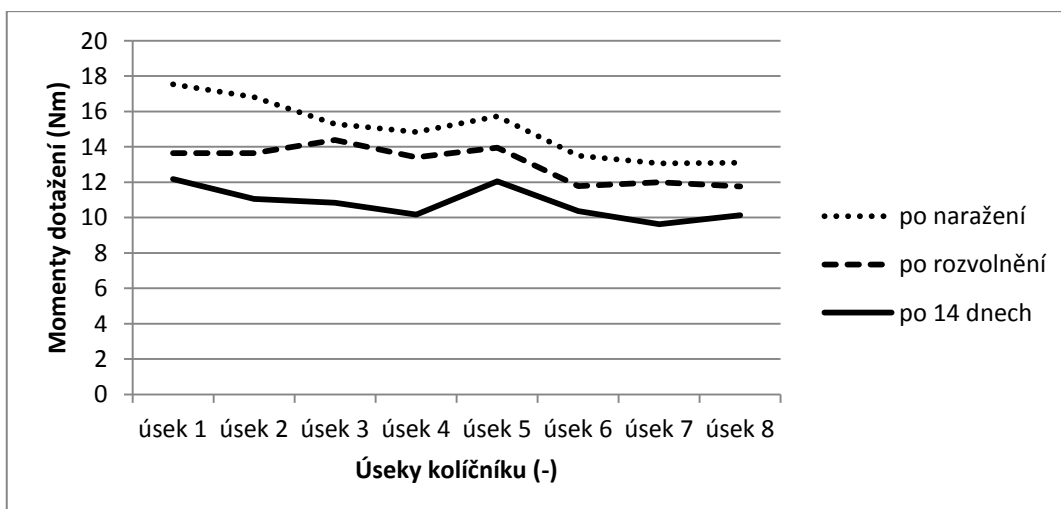
Průběhy zobrazují následující grafy:



Obrázek 41: Momenty dotažení všech měření – typ A



Obrázek 42: Momenty dotažení všech měření – typ B



Obrázek 43: Momenty dotažení všech měření – typ C

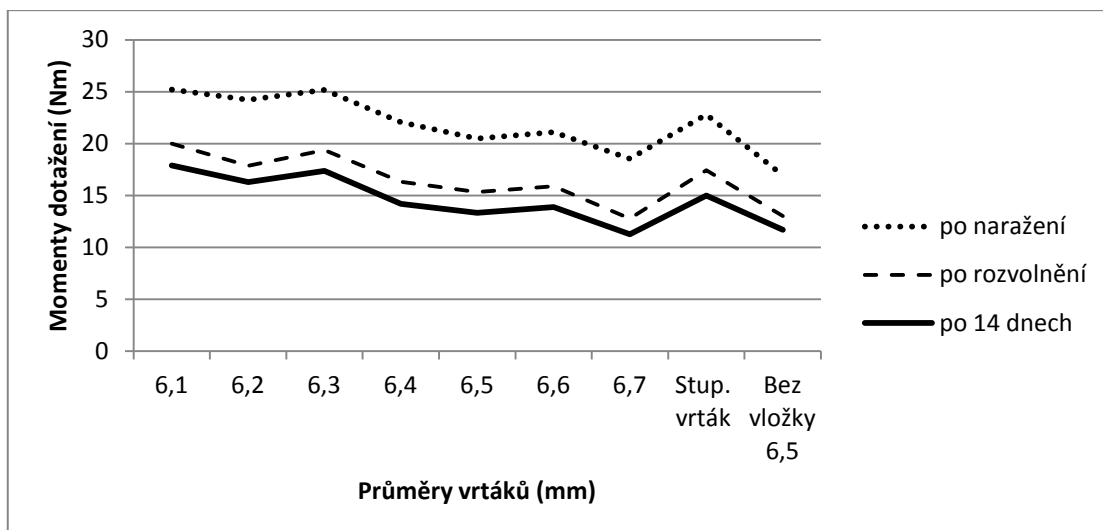
Dále byl porovnáván vliv průměru vrtáku na odpor při dotažení a vliv habrové vložky na výsledný odpor. U všech typů můžeme vidět podobný charakter a to pokles odporu se vzrůstajícím průměrem vrtáku, dále náhlý nárůst u stupňovitého vrtáku a následně pokles u otvoru bez habrové vložky.

Analýza rozptylu ukazuje rozdíly mezi různými průměry. Nejdůležitější ovšem je rozdíl mezi průměrem 6,5 mm vůči stupňovitému vrtáku 5,5 – 6,5 mm a vůči otvoru bez habrové vložky.

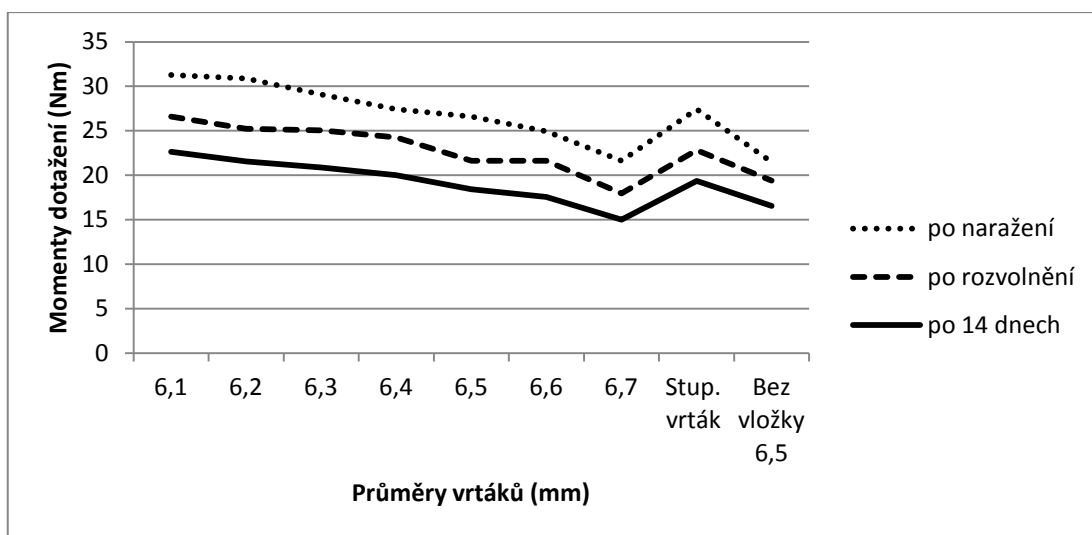
Stupňovitý vrták obecně dosahuje vyšších hodnot odporu než průměr 6,5 mm. Tento rozdíl je nejvyšší u prvního měření a poté klesá. Nicméně statisticky významný rozdíl to není. Habrová vložka oproti tomu způsobuje významný nárůst hodnot odporu, ale jen u prvního měření. Poté již není rozdíl tak markantní.

Konkrétní hodnoty jsou následující:

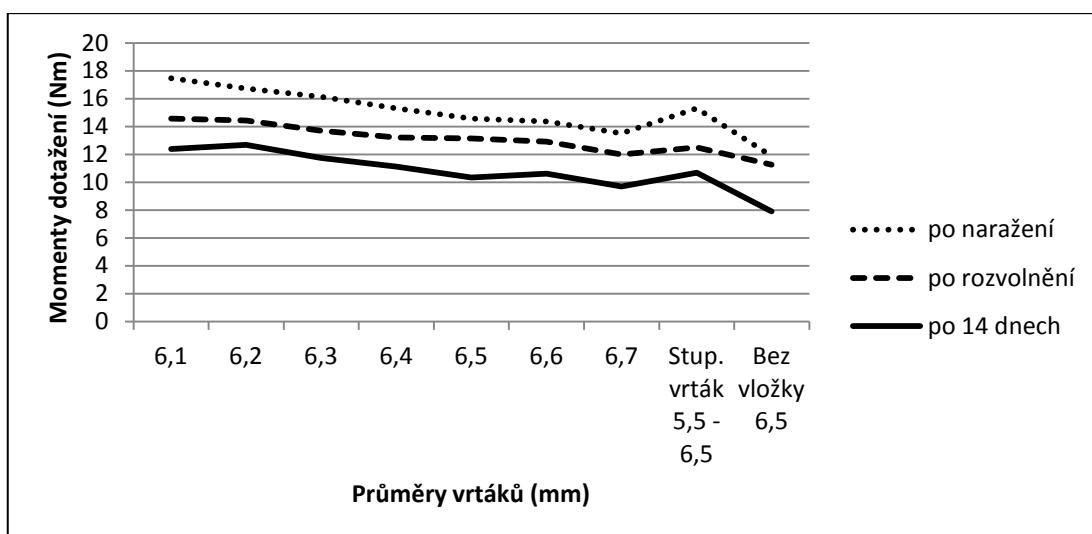
- Typ A: v průměru o 2,04 Nm vyšší odpor stupňovitého vrtáku vůči vrtáku 6,5 mm. Otvor o průměru 6,5 mm vybavený habrovou vložkou dosahuje po naražení kolíků vyšší odpor průměrně o 3,54 Nm oproti otvoru bez vložky a poté již průměrně o 1,9 Nm.
- Typ B: v průměru o 0,98 Nm vyšší odpor stupňovitého vrtáku vůči vrtáku 6,5 mm. Otvor o průměru 6,5 mm vybavený habrovou vložkou dosahuje po naražení kolíků vyšší odpor průměrně o 5,12 Nm oproti otvoru bez vložky a poté již průměrně o 2,07 Nm.
- Typ C: zde se vyskytuje anomálie v porovnání s předchozími měřeními a to ta, že u měření po rozvolnění dosahuje stupňovitý vrták nižších hodnot odporu a to o 0,63 Nm. U ostatních měření tomu již tak není a odpor je vyšší v průměru o 0,55 Nm u stupňovitého vrtáku. Otvor o průměru 6,5 mm vybavený habrovou vložkou dosahuje po naražení kolíků vyšší odpor průměrně o 2,67 Nm oproti otvoru bez vložky a poté již průměrně o 2,15 Nm.



Obrázek 44: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ A



Obrázek 45: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ B

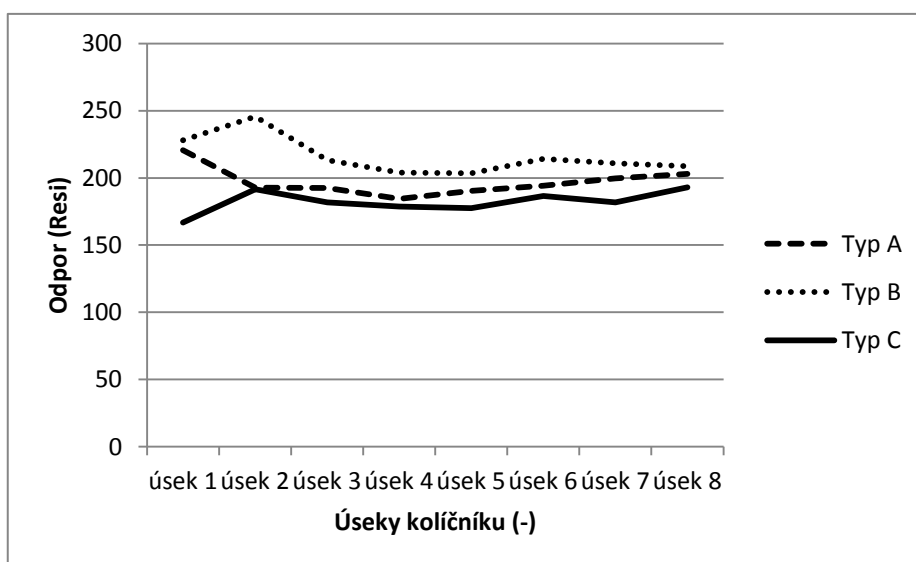


Obrázek 46: Moment dotažení dle typu vrtáků – typ C

Porovnání výsledků z rezistografu mezi jednotlivými kolíčníky přináší následující tabulka a graf.

Tabulka 38: Přehled průměrných odporů rezistografu v úsecích

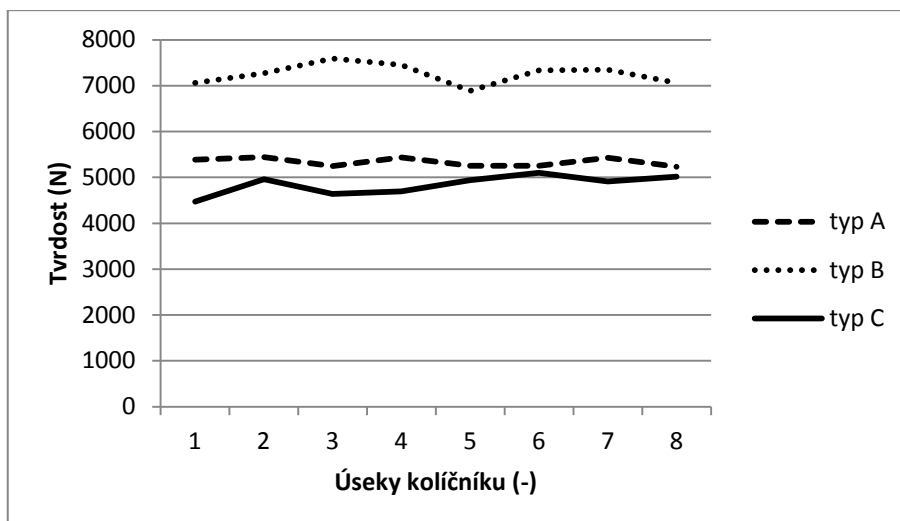
	Typ A	Typ B	Typ C	
BAS	úsek 1	220,5419	228,0372	166,7883
	úsek 2	192,6651	245,599	191,5097
	úsek 3	192,403	213,1839	181,8031
	úsek 4	184,3842	204,0046	178,5844
	úsek 5	190,4596	203,5414	177,5405
	úsek 6	194,0607	214,2679	186,6214
	úsek 7	199,7047	210,9049	181,7814
DISKANT	úsek 8	202,9731	208,5955	192,9506



Obrázek 47: Grafické zobrazení průběhu

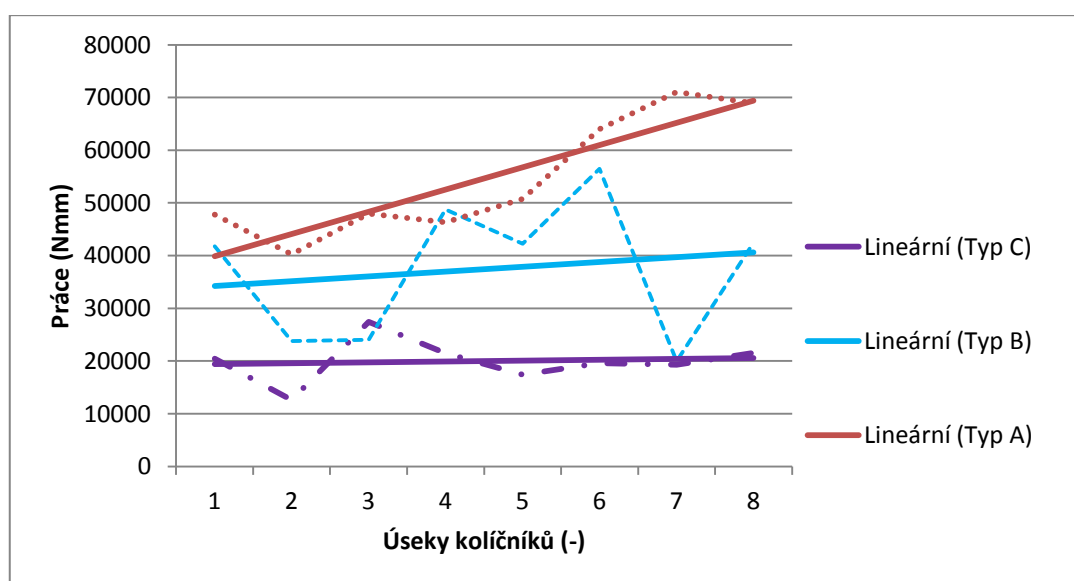
Tento způsob měření se ukázal jako málo vypovídající o vlastnostech kolíčníků a to z důvodu, že bylo provedeno jen jedno měření v každém úseku a toto měření mohlo být ovlivněno lokálními anomáliemi dých, jako jsou například husté nebo naopak řídké letokruhy, suky, praskliny apod.

U měření tvrdosti Jankovou i Brinellovou zkouškou existuje významný rozdíl mezi typem A a typem B, dále pak mezi typem B a typem C. Typ A má v průměru o 1916,7 N nižší Jankovu tvrdost a typ C o 2417,8 N v porovnání s typem B. I zde se ukázalo, že hustota je hlavním ukazatelem mechanických vlastností. Poměr tvrdosti u typů B : A : C je tedy 1 : 0,73 : 0,66. Podobný poměr lze pozorovat i u tuhosti a práce do meze pevnosti. Porovnání Jankovy tvrdosti u všech tří typů přináší obr. 48.



Obrázek 48: Jankova tvrdost u všech typů

Měření pevnosti v tlaku podél vláken přineslo významné rozdíly mezi všemi druhy kolíčníků. Nejvyšší pevnosti a to v průměru 64,9 MPa dosahuje typ B. Typ A má průměrnou pevnost o 11,4 MPa nižší a typ C o 16,1 MPa. Poměr vůči nejpevnějšímu je tedy B : A : C – 1 : 0,82 : 0,75. Podobně vychází také modul pružnosti. Jen u práce do meze pevnosti, která se dá spojit s houževnatostí materiálu, dosahuje nejvyšších hodnot typ A a to 54 626,8 N.mm. Tento typ je tedy nejhouževnatější, což dokazuje i největší deformace na mezi pevnosti – 6,82 %. Za ním následuje typ B s hodnotou 37 429,6 N.mm a poté typ C s 19 969,5 N.mm. Poměr vůči nejhouževnatějšímu je A : B : C 1 : 0,68 : 0,36. Průběh zobrazuje následující graf:



Obrázek 49: Průběh práce do meze pevnosti

Houževnatost se dle tohoto měření zvyšuje směrem od basové části po diskantovou část a to především u typu A.

Z uvedených dat je zřejmé, že mezi jednotlivými typy kolíčnicků existují významné rozdíly v naměřených hodnotách, které jsou dány především jejich rozdílnou hustotou a taky tloušťkou. Při rozdělení kolíčnicků na úseky a pokusu o vyšetření závislosti měřených veličin ovšem narážíme na problém nehomogenity dřeva jako takového. Výsledky poukazují na rozdílné průběhy veličin mezi úseky a jen v málo případech se ukázala závislost vlastností vůči sobě.

Například u typu C, který byl popsán jako obecně nejvíc homogenní, pracujeme v některých případech s alespoň trochu uspokojivými korelačními koeficienty. Jako velký problém se ukázal počet měření, jelikož jich nebylo možno provést o mnoho více, než bylo uvedeno. V tomto případě by byla potřeba provést měření na více kusech kolíčnicků stejných typů, což by přineslo zcela jistě uspokojivější výsledky.

Také by bylo vhodné implikovat do měření tah strun, který by měl zcela jistě vliv na měřené momenty. Nicméně tento výzkum by byl již značně časově i finančně náročnější a nad rámec této bakalářské práce. I přesto by byla jeho aplikace v praxi značně diskutabilní, protože výsledkem by byly jisté průměrné hodnoty a dřevo, jak známo, je velmi proměnlivých vlastností a průměrný kolíčnick vlastně neexistuje.

Co se týče vlivu vrtání pomocí různých typů vrtáku, tak zde bylo dospěno k více vypovídajícím výsledkům. Ukázalo se, že vliv předvrtání způsobuje vždy zvýšení momentu dotažení kolíku, ale toto zvýšení není statisticky významné. Oproti tomu habrová vložka již způsobí značný nárůst momentu.

Díky této práci tedy alespoň zhruba víme, jaké hodnoty mechanických vlastností a momentu dotažení lze očekávat od jednotlivých typů kolíčnicku.

6 Závěr

Kolíčníky byly odvrtány pomocí různých průměrů vrtáků, stupňovitým vrtákem a v případě posledního sledovaného otvoru nebyly vybaven habrovou vložkou. Kolíčníky byly rozčleněny na osm úseků, a osazeny ladícími kolíky.

Stupňovitý vrták způsobí nárůst odporu ladícího kolíku při otáčení, ale tento nárůst není statisticky významný, v průměru o 1,2 Nm oproti vrtáku 6,5 mm. Habrová vložka zaražená v litinovém rámu způsobí již významný nárůst odporu kolíků a to v průměru o 2,9 Nm.

Moment dotažení byl měřen ihned po naražení, poté po rozvolnění a nakonec po 14 dnech. U všech typů byl vždy zaznamenán významný pokles momentu dotažení. Rozdíl mezi prvním a posledním měřením je průměrně 6,35 Nm. Nejvyšších průměrných hodnot momentu dotažení dosáhl typ B, poté typ A, a nejnižších hodnot typ C.

Průběh momentu dotažení mezi úseky se dá považovat za nahodilý, nekorelující s ostatními naměřenými veličinami.

Byl sestaven konečně-prvkový model v programu ANSYS, s cílem objasnit míru namáhání okolí otvoru. Napětí způsobené kolíkem překročí mez pevnosti materiálu v průměru $9,8\times$ a způsobí poškození kolíčníku zhruba 17 mm kolem otvoru.

Odpor při odvrtávání byl měřen odporovou mikrovrtáčkou Resistograph. Tento způsob se ukázal jako nevhodný pro měření distribuce hustoty a ostatních mechanických vlastností, alespoň v rámci počtu měření, které bylo provedeno.

Byla stanovena tvrdost dle Janky a Brinella a mechanické vlastnosti při zkoušce v tlaku v rovině desky a distribuce hustoty. Největší Jankova tvrdost 7250,5 N a pevnost v tlaku 64,9 MPa byla zaznamenána u typu B (100 %), poté následoval typ A s hodnotami 5334 N a 53,5 MPa (77 %). Nejnižší hodnoty 4832,9 N a 48,8 MPa (70 %) byly naměřeny u typu C. Typ A dosáhl nejvyšší houževnatosti. Rozdíly těchto veličin v úsecích kolíčníku nejsou statisticky významné, vyjma průběhu hustoty.

U všech typů byla zjištěna nestejněměrná hustota v úsecích. Naměřené momenty neprokázaly závislost na této distribuci. Typ A a typ B prokázal závislost distribuce hustoty na tvrdosti měřené v ploše o hodnotě $r = 0,81$ a $0,88$.

Přesnějších výsledků by bylo dosaženo, kdyby bylo provedeno více měření jednotlivých vlastností a také na větším počtu kolíčnicků. Poté by vypočítané korelace mohly poukazovat na jisté závislosti v jednotlivých druzích kolíčnicků, které se popřípadě často opakují a na základě tohoto poznatku přizpůsobit jejich výrobu (vrtání) daným parametrům.

Hlavní přínos práce spočívá v tom, že byly zjištěny průměrné hodnoty momentů dotažení a mechanické vlastnosti u jednotlivých typů kolíčnicků a dle těchto měření lze v budoucnu předvídat, jaké vlastnosti můžeme od jednotlivých typů očekávat.

7 Summary

This work focuses on the analysis of the mechanical properties of piano pin blocks. Three pin block types were used, all made from multi-layered beech-plywood. Pin blocks were divided into eight sections and physical-mechanical properties of material were measured by several methods.

Pin blocks were drilled using seven drills diameters (6,1 – 6,7 mm), stepped drill (5,5 – 6,5 mm) and hole without hornbeam inset. Pin blocks were fitted with tuning pins and were divided into eight sections to measure densities and mechanical properties.

The first part deals with tightening torque measurement and resistance by drilling. The resistance by drilling was measured by Resistograph apparatus. Tightening torque was measured with a torque wrench after driving pins, secondly after loosening up and finally after 14 days.

The second part is focused on the measurement of mechanical properties. Janky's and Brinell's hardness, compression strength in the panel plane, modulus of elasticity, strain and toughness were measured by the universal testing machine Zwick.

The last part solves the issue of stress, generated when pin-driving. The finite-element model in ANSYS software was built. The model is planar and material was able to simplify into isotropic one. The material properties were derived from mechanical tests on universal testing machine. The results show the stresses induced by pin pushing into pin block.

With measurements were discovered statistically significant differences between different types of pin blocks. Individual sections of pin blocks differ with measured properties.

In future, the multiple measurements of individual properties and also on a larger number of pin blocks could bring more accurate results. It would be appropriate to incorporate a measuring of tension of the strings.

The benefits of the work lay, in the analysis of average torques and mechanical properties in different types of pin blocks and according to these measurements the behaviour and properties of each type of material could be predicted or used for selection and grading of material in technology of piano making.

8 Seznam použité literatury

8.1 Literatura

BANK, B., LEHTONEN, H., M., 2010. Perception of longitudinal components in piano string vibrations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(3). 117-123.

BERTHAUT, J., ICHCHOU, M., N., JEZEQUEL, L., 2003. Piano soundboard: structural behavior, numerical and experimental study in the modal range. *Applied Acoustics*, 64 (11). 1113-1136.

BODIG, J., JAYNE B., A., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 712 s. ISBN 0442008228.

BONHARD, V., PRACH, J., 1958. *Piana a pianina*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.

BUCUR, V., 2006. *Acoustics of wood*. 2nd ed. New York: Springer, 393 s. ISBN 9783540261230.

BURRED, J., J., 2004. *The acoustics of the Piano*. 1. Madrid: Professional Conservatory of Music.

FLETCHER, N., H., ROSSING, T., D., 1998. *The physics of musical instruments*. 2nd ed. New York: Springer, 756 s. ISBN 0387983759.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK P., ŠLEZINGEROVÁ J., 2009. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GIORDANO, N., 1997. Simple model of a piano soundboard. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 1159-1168.

GIORDANO, N., JIANG M., 2004. Physical modeling of the piano. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 926-933. DOI: 10.1155/S111086570440105X.

GIORDANO, N.; KORTY, A. J., 1996. Motion of a piano string: Longitudinal vibrations and the role of the bridge. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(6). 3899-3908.

HALL, D., E., 1987a. Piano string excitation II: General solution for a hard narrow hammer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81 (2). 535-546.

- HALL, D., E., 1987b. Piano string excitation III: General solution for a soft narrow hammer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81 (2). 547-555.
- CHAIGNE A., COTTÉ, B., VIGGIANO, R., 2013. Dynamical properties of piano soundboards, *Journal of the Acoustical Society of America*, 133 (4), 2456-2466.
- CHAIGNE, A. ASKENFELT, A., 1994b. Numerical simulations of piano strings. II. Comparisons with measurements and systematic exploration of some hammer-string parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95 (3). 1631-1640.
- CHAIGNE, A., ASKENFELT, A., 1994a. Numerical simulations of piano strings. I. A physical model for a struck string using finite difference methods. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95 (2). 1112-1118.
- ILLE, R., 1974. *Výzkum rezonančního dřeva smrku*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 59 s.
- JÍLEK, Z. *O klavíru*. 2. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 1997, 65 s. ISBN 80-85883-17-1.
- KNOTT, G., A., SHINN Y., S., CHARGIN, M., 1989. A modal analysis of the violin. *Finite Elements in Analysis and Design*. 1989 (3): 269–279. DOI: 10.1016/0168-874X(89)90049-8.
- KURFÜRST, P., 2002. *Hudební nástroje*. Vyd. 1. Praha: Togga, 1168 s. ISBN 80-902912-1-x.
- LEHTONEN, H., M., 2005. *Analysis and parametric synthesis of the piano sound*, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- LEHTONEN, H., M., 2010. *Analysis, perception, and synthesis of the piano sound*, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- MARSHALL, K., D., 1985. Modal analysis of a violin. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 77, 695-709.
- MICHELS, U., 2000. *Encyklopedický atlas hudby*. Praha: Nakladatelství Lidové noviny, 611 s. ISBN 80-7106-238-3.
- MOAVENI, S., 2008. *Finite element analysis : theory and application with ANSYS*. 3. vyd. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall. 861 s. ISBN 978-0-13-241651-1.

- MODR, A., 2002. Hudební nástroje. 9. vyd., Praha: Editio Bärenreiter , 283 s., [2] příl. ISBN 80-86385-12-4.
- MUELLER, U., 1980. INFLUENCE OF RIBS ON THE ACOUSTIC BEHAVIOUR OF PIANO RESONANT PLATES. Archives of Acoustics, 5 (2), 147-155.
- POŽGAJ et al., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 485 s. ISBN 8007009604.
- RAJČAN, E., 1998. Akustika I. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 136 s. ISBN 80-228-0758-3.
- RAJČAN, E., DANIHELOVÁ A., URGELA S., 1999 Aplikácia akustiky pri štúdiu vlastností dreva. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 56 s. ISBN 80-228-0789-3.
- ROWELL, R., M.,1993. Stabilization of acoustical properties of wooden musical instruments by acetylation. Wood and fiber science, 25(4). 395-403.
- SADIE, S. (ed.), TYRRELL J. (ed.), 2001. The New Grove dictionary of music and musicians. 2nd ed. New York: Grove, 912 s. ISBN 0195170679.
- SADIE, S., 2001. The New Grove dictionary of music and musicians. 2nd ed. New York: Grove, 24. vyd, 912 s. ISBN 0195170679.
- SUNDBERG, J., 1991. The science of musical sounds. San Diego: Academic Press, 237 s. ISBN 0126769486-.
- SUZUKI, H., 1986. Vibration and sound radiation of a piano soundboard. The Journal of the Acoustical Society of America, 80 (6). 1573-1582.
- SUZUKI, H.; NAKAMURA, I., 1990. Acoustics of pianos. Applied Acoustics, 30 (2) 147-205.
- SYROVÝ, V., 2003. Hudební akustika. Vyd. 1. V Praze: Akademie múzických umění v Praze, 2003, 427 s. ISBN 8073319012.
- SYROVÝ, V., 2008. Hudební akustika. 2., dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 440 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.
- THOMAS D. ROSSING, Thomas D.editor., 2010. The science of string instruments. Online-Ausg. New York: Springer. ISBN 9781441971104.

TIPPNER, J., 2010. Numerická simulace rezonanční desky klavíru. Brno, 2010. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Petr Koňas.

WILLIAMS, J., P., 2003. Piano. Průvodce hudebním nástrojem a jeho místem v dějinách. Slovart, Bratislava. ISBN 80-7209-473-4.

YANO, H., NORIMOTO, M., ROWELL, R., M., 1993. Stabilization of acoustical properties of wooden musical instruments by acetylation. Wood and Fiber Science, 25 (4). 395-403.

ZENKL, L., 2003. ABC hudební nauky. 8. vyd., Praha: Editio Bärenreiter, 2003, 199 s. ISBN 80-86385-21-3.

8.2 Patenty

Fastening device for tuning pins. Vynálezci: N., SIGNORE. Itálie. Patent číslo 525,751. 25.7.1967.

Improvement in piano stringing and tuning device. Vynálezci: W., F., KEARSING. Spojené Státy Americké. Patent No. 160,600. 7.11.1874.

MASON & HAMLIN, ORGAN AND PIANO COMPANY. Stringing Pianos. Vynálezci: J., P., RICHARDSON. Massachusetts. Patent No. 281,794. 22.3.1883.

Piano tuning pin lock. Vynálezci: D., I., TICEHURAT. Spojené státy americké. US 3,754,494. 28.8.1973.

Piano tuning pin. Vynálezci: H., E., WARREN, R., G., WARREN. Spojené státy americké. Patent No. 130,658. 11.3.1952.

Piano tuning pin. Vynálezci: J., J., BRUER. Austrálie. Patent No. 883,285. 31.3. 1908.

STEINWAY & SONS. Wrestplanks. Vynálezci: F., H., WALSH. Spojené státy americké. US 3,091,149. 28.5.1963.

STEINWAY MUSICAL INSTRUMENTS, INC. Wrestplanks. Vynálezci: S., Y., KENAGY, W., D., ALBRECHT, J., A., PATTON. Spojené státy americké. US 7,759,565 B2. 20.7.2010.

Tuning pin and adjusting-screw for pianos. Vynálezci: A., FELLDIN. Spojené státy americké. US 550,366. 26.11.1895.

Tuning pin for Pianos. Vynálezci: H., A., CONKLIN, Jr. Spojené státy americké. US 4,920,847. 1.5.1990.

Tuning-pin lock for Pianos. Vynálezci: F., W., GOTTERKE. Spojené státy americké. Patent číslo 982,425. 24.1.1911.

YAMAHA CORPORATION. Composite keyboard musical instrument, silent system for performance without acoustic tones and regulativ button mechanism for changing escape timing depending upon mode of operation. Vynálezci: S., INOUE, K., KAWAMURA. Japonsko. US 6,683,242 B2. 27.1.2004.

8.3 Online zdroje

Wikipedia: Otevřená encyklopedie [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-10-02]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Trum%C5%A1ajt>

Delignit: Blomberger Holzindustrie GmbH [online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z:
http://www.delignit.de/Delignit/cms/front_content.php?idcat=7

ASKENFELD, A. *Five lectures on the Acoustics of The Piano* [online]. Royal Swedish Academy of Music, 1990 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z:
http://www.speech.kth.se/music/5_lectures/

ŠTĚTINA, J., JAROŠ, M., RAMÍK, P. *Virtuální laboratoř: Měření, snímáče, metody* [online]. Brno: 2003 [cit. 20.11.2015]. Dostupné z:
<http://otpp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka06-04.htm>

Bösendorfer: Der Klang, Der Berührt [online]. Vienna [cit. 2015-11-02]. Dostupné z:
<http://www.boesendorfer.com/en/ceus-reproducing-system>

Klavírnictví: Jiří Cafourek [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z:
<http://www.klavirnictvi.cz/otazky.htm>

Dehonit - Falke s.r.o. [online]. Sokolov [cit. 2015-10-26]. Dostupné z:
<http://www.dehonit.cz/dehonit/produkty/dehonit-pro-klaviry-a-piana.html>

Pianos Bolduc [online]. Montreal [cit. 2015-10-26]. Dostupné z:
<http://www.pianosbolduc.com/en/piano-components/bolducblock-maple-pinblock/>

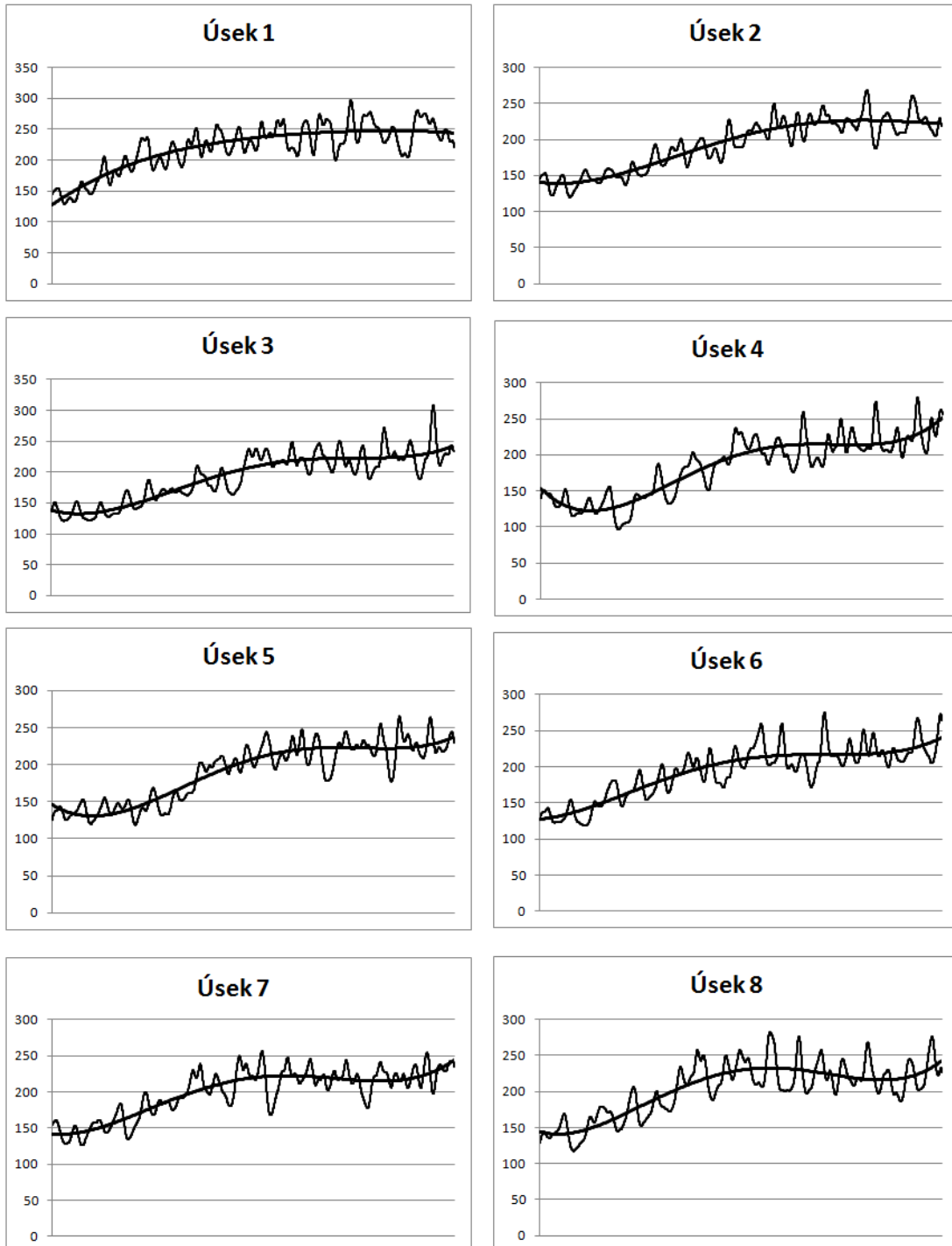
Yamaha [online]. 2015 [cit. 2015-11-03]. Dostupné z:
<http://cz.yamaha.com/cs/products/musical-instruments/keyboards/silentpianos/>

Seznam příloh

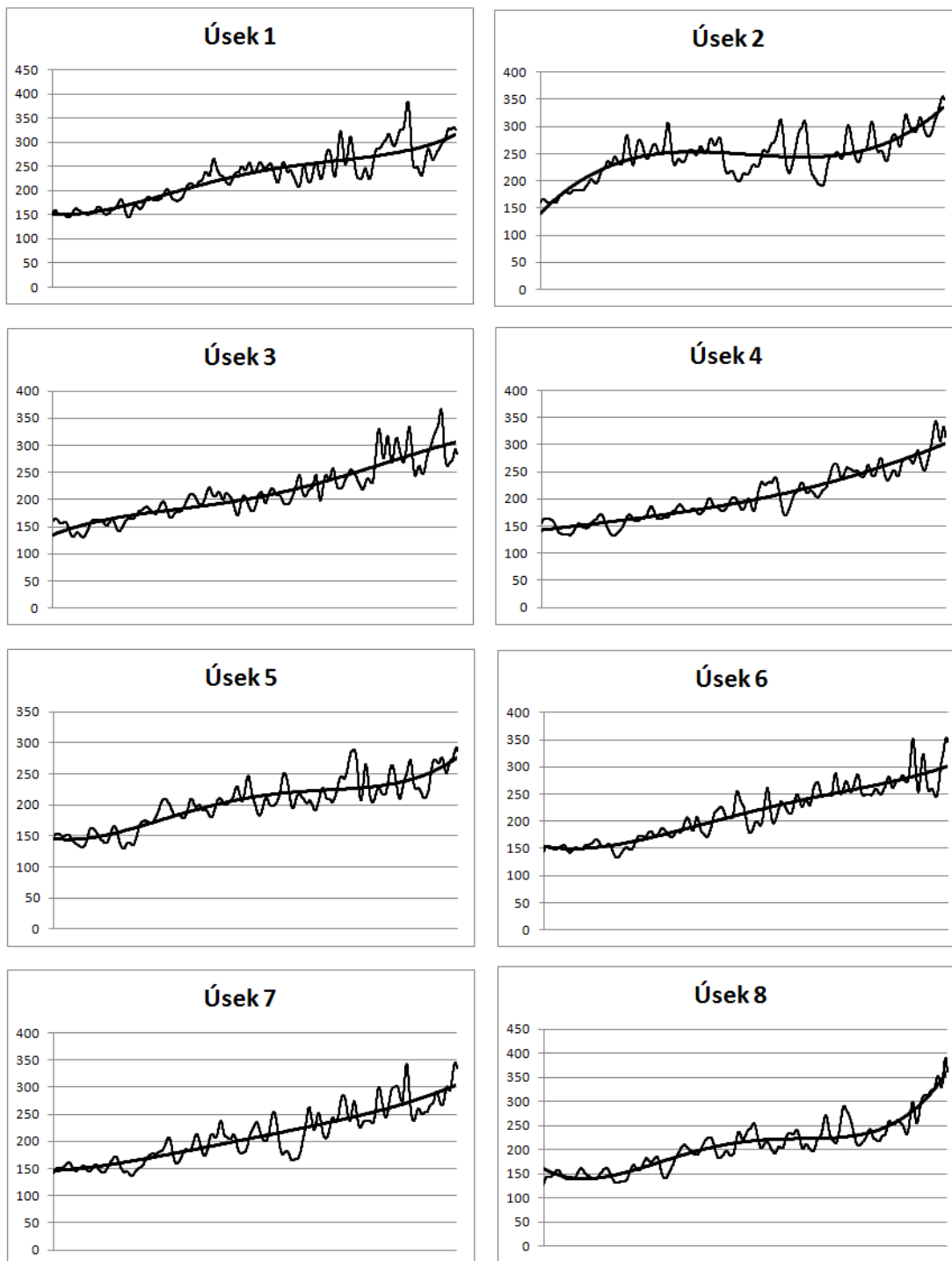
<i>Příloha 1: Průběh odporu v úsecích – typ A</i>	83
<i>Příloha 2: Průběh odporu v úsecích – typ B</i>	84
<i>Příloha 3: Průběh odporu v úsecích – typ C</i>	85
<i>Příloha 4: APDL skript</i>	87

9 Přílohy

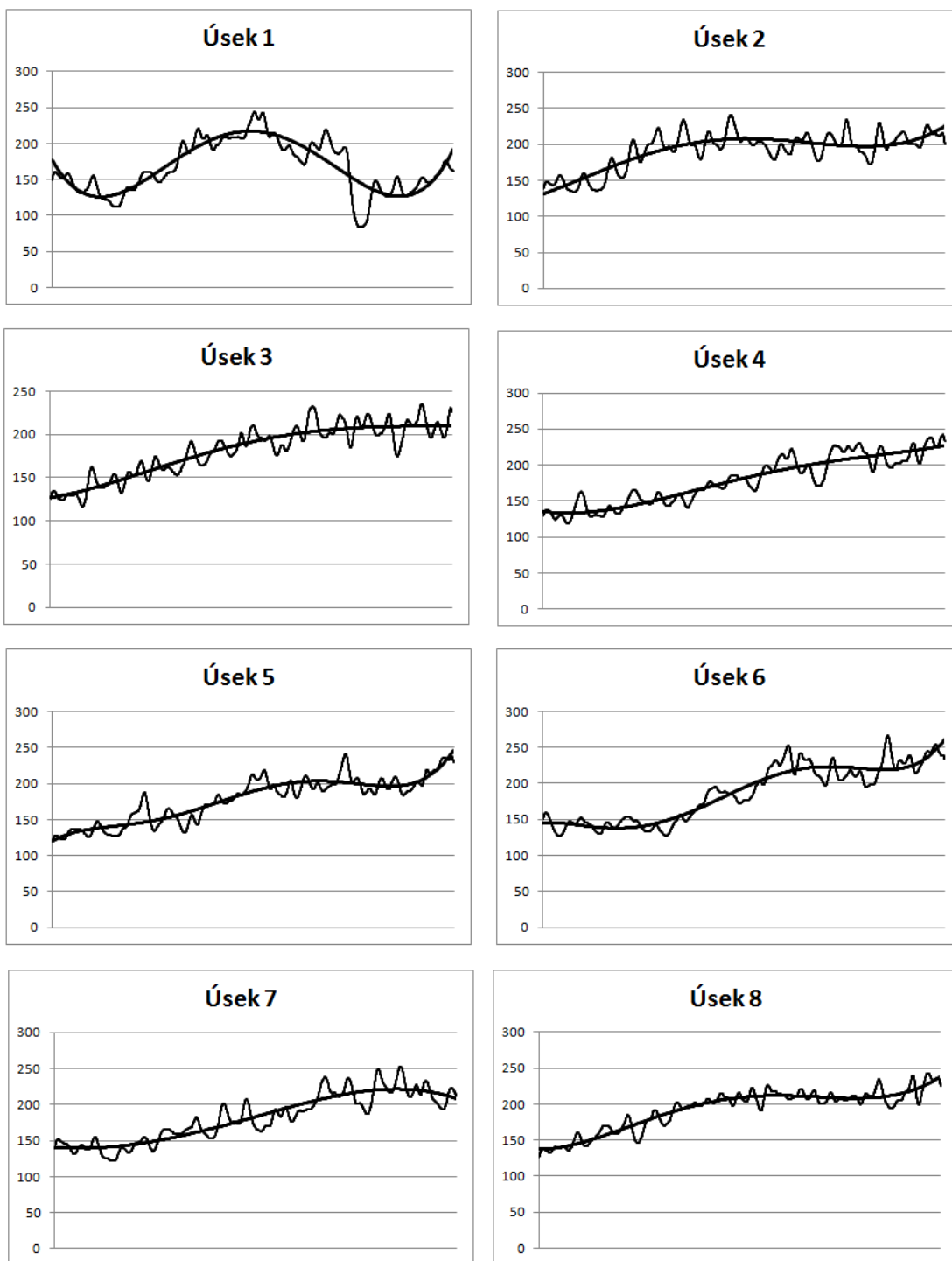
Příloha č. 1 – 3 obsahuje jednotlivé průběhy odporu naměřené rezistografem. Odpor byl měřen v jednotlivých úsecích kolmo na vlákna a délka křivky je celá tloušťka kuličnicku. Osa Y zobrazuje jednotku Resi, což je umělá jednotka rezistografu.



Příloha 1: Průběh odporu v úsecích – typ A



Příloha 2: Průběh odporu v úsecích – typ B



Příloha 3: Průběh odporu v úsecích – typ C

```

! model kolicnik
/prep7
rozm=0.025
prumvr=0.0065
prumkol=0.007
rectng,-rozm,rozm,-rozm,rozm,
cyl4,0,0,prumvr/2
asba,1,2
et,1,183
!
esize,0.001,0,
mshape,0,2d
mshkey,0
!
csys,1
cswpla,11,1,1,1,
esys,11
amesh,all
nrotat,all
!
mp,ex,1,7858e6
mp,prxy,1,0.3
!
lssel,s,loc,x,prumvr/2
nsl1,s,1
d,all,ux,prumkol/2-prumvr/2
lssel,inve
dl,all,,all,0,1
allsel,all
finish
/sol
solve
finish
/post1
set,last
!
/dscale,all,1.0
/efacet,1
rsys,0
plnsol,s,eqv,0,1.0
!
/show,png,,0
pngr,comp,1,-1
pngr,orient,horiz
pngr,color,2
pngr,tmod,1
/gfile,1000,
!*
/cmap,_tempcmap_,cmp,,save
/rgb,index,100,100,100,0
/rgb,index,0,0,0,15
/replot
/cmap,_tempcmap_,cmp
/delete,_tempcmap_,cmp
/show,close
/device,vector,0
!
rsys,11
plnsol,u,x,0,1.0
!
/show,png,,0
pngr,comp,1,-1
pngr,orient,horiz
pngr,color,2
pngr,tmod,1
/gfile,1000,
!*
/cmap,_tempcmap_,cmp,,save
/rgb,index,100,100,100,0
/rgb,index,0,0,0,15
/replot
/cmap,_tempcmap_,cmp
/delete,_tempcmap_,cmp
/show,close
/device,vector,0
!

!preprocessing - parametrizace
!definovani rozmeru zakladni plochy
!prumer vrtaku
!prumer kolicu
!vytvoreni plochy o definovanych rozmerech
!vytvoreni kruhu o prumeru vrtaku
!odecteni kruhu (booleovsky rozdil)
!definovani typu bloku (zde plane183)

!definovani velikosti segmentu sitovani
!definovani tvaru segmentu sitovani (ctyrhran)
!schema, dle ktereho se situje (volne)

!aktivace cylindrickeho souradnicoveho systemu
!definice lokalniho sour. systemu (polarni)
!nastaveni sour. systemu na prvek
!sitovani
!rotace souradnic uzlu do aktivniho sour. systemu

!nastaveni modulu pruznosti
!nastaveni poissonova cisla

!zvoleni linii ve vzdalenosti polomeru vrtaku
!zvoleni uzlu asociovanych k liniim, vctne krajnich
!definice stupnu volnosti (kolik minus vrtak)
!vybrat linie ktore nebyly vybrane
!definice stupnu volnosti na vybranych linii (vsechny)
!zvoleni vseh objektu

!solver

!postprocessing
!nastavi posledni sadu vysledku

!nastaveni meritka

!aktivace kartezskeho sour. systemu
!zobrazeni napeti von mises

!ulozeni ve formatu png

!aktivace sour. systemu pro zobrazeni prvku
!zobrazeni vysledku posunuti

!ulozeni ve formatu png

```

```

rsys,0                                !aktivace kartezskeho sour. systemu
plnsol,s,x,0,1.0                       !zobrazeni napeti v ose x
!
/show,png,,0                            !ulozeni ve formatu png
pngr,comp,1,-1
pngr,orient,horiz
pngr,color,2
pngr,tmod,1
/gfile,1000,
!*
/cmap,_tempcmap_,cmp,,save
/rgb,index,100,100,100,0
/rgb,index,0,0,0,15
/replot
/cmap,_tempcmap_,cmp
/delete,_tempcmap_,cmp
/show,close
/device,vector,0
!
rsys,0                                !aktivace kartezskeho sour. systemu
plnsol,s,y,0,1.0                       !zobrazeni napeti v ose y
!
/show,png,,0                            !ulozeni ve formatu png
pngr,comp,1,-1
pngr,orient,horiz
pngr,color,2
pngr,tmod,1
/gfile,1000,
!*
/cmap,_tempcmap_,cmp,,save
/rgb,index,100,100,100,0
/rgb,index,0,0,0,15
/replot
/cmap,_tempcmap_,cmp
/delete,_tempcmap_,cmp
/show,close
/device,vector,0
!
/eof                                    !konec skriptu

```

Příloha 4: APDL skript