

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Analýza deformace dřeva s imperfekcí na základě
srovnání jednoduchého numerického modelu
s optickou metodou DIC**

Diplomová práce



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Bc. Ondřej Klvač
Studijní program: Dřevařské inženýrství
Obor: Dřevařské inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Václav Sebera, Ph.D.
Konzultant: Ing. Martin Brabec

Název práce: **Analýza deformace dřeva s imperfekcí na základě srovnání jednoduchého numerického modelu s optickou metodou DIC**

Zásady pro vypracování:

1. Student vypracuje literární rešerši na relevantní témata, tj. problematiku optických měření deformací v oboru dřeva s využitím metody digitální korelace obrazu (DIC) a simulací dřeva s otvorem a imperfekcemi.
2. V kapitole Materiál a metodika student popíše metodiku měření s využitím metody DIC a postup modelování pomocí MKP včetně materiálových modelů, dále zpracování dat a použité materiály. Poměrné deformace budou analyzovány jak v části elastické, tak plastické.
3. Ve výsledkové části budou adekvátním způsobem prezentovány výsledky měření, které budou srovnány s numerickými výpočty, včetně adekvátního statistického zhodnocení. Na konci práce budou výsledky shrnuty do přehledných závěrů.

Rozsah práce: 60-70 stran

Literatura:

1. CARL, C. -- BERGMAN, R. -- CAI, Z. *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Madison, Wis.(U.S.): Forest Products Laboratory (U.S.), 2010. 508 s.
2. KLOIBER, M. -- KUNECKÝ, J. -- TIPPNER, J. -- SEBERA, V. A new diagnostic device for in-situ determination of conventional strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to fiber. In *9th International Conference on Structural analysis of historical constructions*. 1. vyd. Mexico city: Instituto de Ingenieria, 2014, s. 57--58.
3. SUTTON, M A. -- ORTEU, J. -- SCHREIER, H W. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications*. New York: Springer, 2009. 321 s. ISBN 978-0-387-78746-6.
4. KOTLÍNOVÁ, M. -- KLOIBER, M. -- VASCONCELOS, G. -- LOURENÇO, P. -- BRANCO, J. *Nondestructive Testing of Wood*. Praha: Lesnická práce, 2008. 40 s. první. ISBN 978-80-87154-14-4.
5. BODIG, J. -- JAYNE, B A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1982. 712 s. ISBN 0-89464-777-6.
6. POŽGAJ, A. -- CHOVANEC, D. -- KURJATKO, S. -- BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
7. BUCUR, V. *Delamination in wood, wood products and wood-based composites*. 1. vyd. New York: Springer, 2011. 401 s. ISBN 978-90-481-9549-7.
8. BUCUR, V. *Nondestructive characterization and imaging of wood*. Berlin: Springer, 2003. 354 s. ISBN 3-540-43840-8.

Datum zadání: listopad 2014

Datum odevzdání: duben 2016

Bc. Ondřej Klvač
Autor práce

Ing. Václav Sebera, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Ing. Vladimír Gryc, Ph.D.
Vedoucí ústavu

doc. Ing. Radomír Klvač, Ph.D.
Děkan LDF MENDELU

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma: Analýza deformace dřeva s imperfekcí na základě srovnání jednoduchého numerického modelu s optickou metodou DIC vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny 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 o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:

.....

podpis

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Seberovi, Ph.D za spolupráci a za možnost uskutečnění této práce. Dále bych rád poděkoval celému kolektivu z ústavu nauky o dřevě a obzvláště kolegům Ing. Jaromíru Milchovi, Ing. Martinu Brabcovi a Ing. Radimu Rouskovi za pomoc při výrobě a testování vzorků. Poděkování patří také firmě TRIBON za poskytnutí PE plastového materiálu na výrobu vzorků.

Autor: Bc. Ondřej Klvač

Název práce: Analýza deformace dřeva s imperfekcí na základě srovnání jednoduchého numerického modelu s optickou metodou DIC

Abstrakt:

Tato práce se věnuje analýze dřeva s imperfekcí zatíženého tahem, metodami digitální korelace obrazu a metodou konečných prvků. Je zjišťována srovnatelnost výsledků těchto dvou metod na příkladu chování dřeva v tahu s imperfekcí. Jako imperfekce může být bráno jakékoliv oslabení struktury dřeva, jak přirozené v podobě suků, trhlín a podobně, tak i umělé, jako například zde v podobě vrtaného otvoru. V této práci byl také proveden experiment plastového vzorku stejným postupem, aby bylo možné ověřit analytický postup výpočtu napětí a prakticky ukázat rozdíl mezi isotropním a anizotropním materiálem. Práce také obsahuje všeobecné informace z odborné literatury, teoretické předpoklady, metodické postupy, naměřené výsledky a srovnání těchto výsledků navzájem a s literaturou. Výsledkem práce je vyhodnocení chování dřeva v tahu s otvorem a srovnání těchto dvou moderních metod měření deformací. Závěrem jsou uvedeny výhody a nedostatky jednotlivých metod.

Klíčová slova:

Metoda konečných prvků, Metoda digitální korelace obrazu, ANSYS, Numerický model, Mechanické vlastnosti dřeva, Vlastnosti dřeva v tahu, Chování dřeva s otvorem, Napěťově deformační analýza dřeva s otvorem.

The author name: Bc. Ondřej Klvač

Title of thesis: Analysis of deformation of wood with imperfection and comparison of a simple numerical model with optical method DIC

Abstract:

This work is devoted to the analysis of wood with imperfection in tension, digital image correlation method and finite element method. It is investigated the comparability of the results of these two methods on the example of behaving of the wood in tension with imperfection. The imperfection could be for example any weakening of the wood structure. It could be natural (knots, cracks and so on). The example of artificial imperfection here is a drilled hole. In this work an experiment with plastic sample in the same manner was also conducted in order to validate the analytical procedure for calculating the stress and practically demonstrate the difference between isotropic and anisotropic material. The work also includes general information from the literature, theoretical assumptions, methodologies, measured results and the comparison of these results each other and with the literature. The result of this work is to evaluate the behavior of wood with a hole in the tension and the comparison of these two methods of measuring deformation. In the end there are the advantages and disadvantages of each method.

Keywords:

Finite element method, digital image correlation, ANSYS, Numerical model, Mechanical properties of wood, Wood tensile Properties, Behaviour timber with the hole, Stress strain analysis wood with the hole

OBSAH

1.	ÚVOD	1
2.	CÍL PRÁCE	2
3.	LITERÁRNÍ PŘEHLED.....	3
3.1.	Mechanické vlastnosti dřeva.....	3
3.2.	Nedestruktivní testování dřeva	9
3.3.	Metoda korelace digitálního obrazu	11
3.4.	Metoda konečných prvků.....	15
3.5.	Napětí kolem otvoru	18
4.	MATERIÁL A METODIKA	23
4.1.	Vytvoření numerického modelu	23
4.2.	Definování materiálových vlastností	23
4.3.	Nastavení souřadnicového systému	24
4.4.	Síťování a definice okrajových podmínek	25
4.5.	Výroba vzorků	26
4.6.	Příprava a měření	29
4.7.	Vyhodnocení DIC	31
4.8.	Verifikace a srovnání výsledků.....	32
5.	VÝSLEDKY A DISKUSE	35
5.1.	Výsledky vzorků s otvorem 5 mm.....	41
5.2.	Výsledky vzorků s otvorem 10 mm	47
5.3.	Výsledky vzorků s odklonem vláken.....	53
5.4.	Shrnutí a srovnání výsledků.....	58
6.	ZÁVĚR	62
7.	SUMMARY	63
8.	POUŽITÁ LITERATURA.....	65

1. ÚVOD

Dřevo používá lidstvo už od nepaměti, ke stavbám nejrůznějších přístřeší až po stavbu lodí a v nezměněné formě je tento materiál dosud nepřekonaný. Je jisté, že díky své obnovitelnosti bude využíván i nadále. Dnes máme oproti dávné minulosti, moderní metody pro zjišťování a předpovídání jeho chování. Proto není nutné vytvářet konstrukce metodou pokus-omyl, ale je třeba se věnovat těmto moderním metodám.

Stejně jako s nástupem běžně dostupné a výkonné výpočetní techniky, přišly i nástroje, které jsou schopny řešit velmi složité úlohy. Představa, že virtuálně je možné vytvořit konstrukci třeba i z materiálu, který doposud v praxi neexistuje a vyzkoušet jeho vlastnosti a chování v konkrétním prostředí a při konkrétní aplikaci, graficky vyhodnotit výhody a nedostatky byla donedávna skoro nemyslitelná. Tyto metody jsou velmi výkonné a neomezují se pouze na dřevo, ale v podstatě jakékoliv mechanicky poddajné materiály. Metoda DIC je například využívána v letectví při testování konstrukcí a MKP má velký význam i pro zdravotnictví, proudění tekutin, simulace opotřebení kloubů, při výrobě protéz a tak dále. Je jisté, že jsou tyto metody velkým přínosem a do budoucna je třeba se jim věnovat a srovnávat.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce je vytvořit literární přehled pojednávající o mechanických vlastnostech, konkrétně vlastnostech dřeva zatíženého tahem, zpracovat všeobecné informace o chování materiálu s otvorem. Všeobecně popsat nedestruktivní testování mechanicky poddajných materiálů s historickým vývojem tohoto testování. Především zjistit informace o použitých metodách digitální korelace obrazu a metody konečných prvků, uvést problematiku týkající se těchto metod. Dále popsat metodiku měření s využitím metody DIC a postup modelování pomocí MKP včetně materiálových modelů, dále zpracovat data a použité materiály. Hlavním cílem je adekvátně srovnat výsledky obou metod, srovnání je jak grafické tak i naměřených hodnot. Vhodně okomentovat uvedené výsledky a poukázat na rozdíly těchto metod. Závěrem shrnout výsledky jednotlivých typů vzorků a srovnat výhody a nedostatky obou metod. Úkolem práce je vytvořit takový parametrický model v systému Ansys metodou konečných prvků, který by se dal po jednoduché úpravě dále použít v jiné aplikaci.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1. Mechanické vlastnosti dřeva

Chováním a vlastnostmi pevných těles se zabýval už Leonardo da Vinci (1452-1519), který zkoumal sílu železných drátů o různé délce, aby určil maximální možnou zátěž. Zabýval se také chováním dřevěných nosníků a uvedl, že u nosníků o stejném průměru došlo k ohybu v části nejvzdálenější od podpěr. Došel k názoru, že síla trámu podepřeného na obou koncích je nepřímo úměrná délce a přímo úměrná šířce. Po něm se mechanice těles věnoval v 17. století Galileo Galilei (1564-1642). Jeho hlavním zájmem byla odolnost materiálu vůči zlomu. Nehledě na povahu této odolnosti si byl jist, že síla zlomu v přímém tahu byla větší než v ohybu. Robert Hooke (1635-1703), položil základy pro moderní koncepty elasticity. Popsal experimenty se dřevem a dalšími materiály přírodního původu. Zabýval se ohybem dřevěného trámu a všiml si deformace podél vláken. Učinil důležitý objev, že vlákna na konvexní straně jsou během ohybu natažena, zatímco vlákna na konkávní straně jsou stlačena.

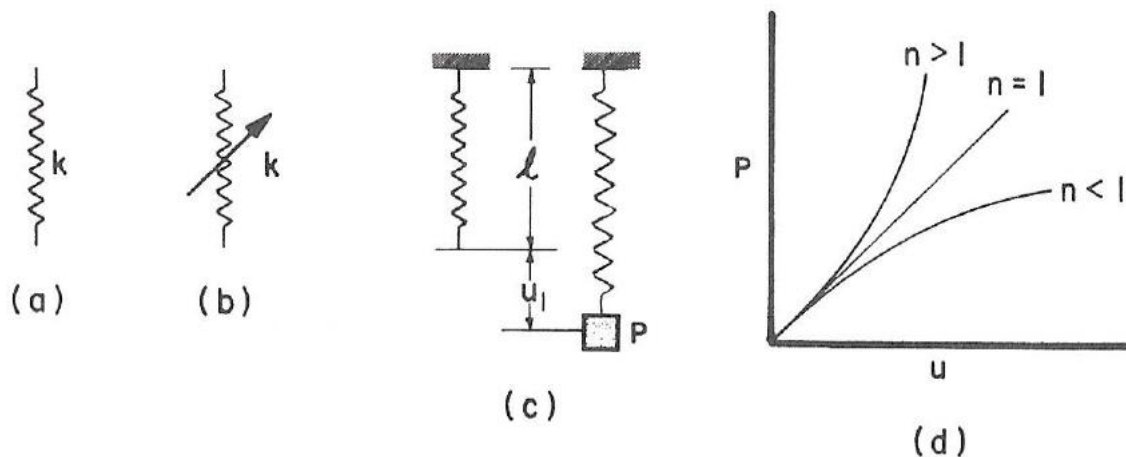
Mechanické vlastnosti u dřeva popisujeme jako schopnost dřeva odolávat vůči působení vnějších sil. Mechanické vlastnosti mají anizotropní charakter, ten je dán především uspořádáním stavebních látek ve dřevě (Gandelová L., Horáček 1998). Jsou ovlivňovány zejména anatomickou stavbou a to mikrostrukturou, kde zohledňujeme tvar a uspořádání stavebních elementů ve dřevě, například směr mikrofibril ve střední vrstvě sekundární buněčné stěny a makrostrukturou kde zohledňujeme převážně druh dřeviny, šířku a směr letokruhů a velikost dřeňových paprsků. Velký význam na mechanické vlastnosti mají také kovalentní a vodíkové můstky, kde ovlivňujícím faktorem je orientace (Rammer 2010).

Pro studium mechaniky pevných těles nemá tvar ani objem deformace daného materiálu význam. Pro určení sil působících na těleso v rovnováze je nutné použít pouze newtonovské zákony. Při řešení některých problémů je nicméně nutné brát deformaci tělesa při daném rozložení sil v potaz. Deformovatelná tělesa, která jsou předmětem značného zájmu, představují dřevo a dřevěné kompozity. Pozornost je upřena na vztah mezi napětím a deformacemi těchto materiálů. (Bodig a Jayne 1982) Na vztahy napětí a deformace je rovněž významný vliv teploty, vlhkosti, struktury materiálu, orientace symetrických os, míry zatížení a velikosti deformace.

3.1.1. Jednoosé napětí

Mnoho materiálů, zvláště pak pevné látky, se chová přibližně elastickým způsobem. U některých materiálů má elastické chování lineární formu. Další se mohou vyznačovat nelineární elasticitou. Je důležité si uvědomit, že elastické chování nevyžaduje nutně linearitu mezi zatížením a posunem, pouze kompletní a okamžité navrácení odstranění deformace při odstranění zátěže. Naopak, linearita vztahu zatížení-posun u daného materiálu nutně neimplikuje elastické chování. (Bodig a Jayne 1982)

Přestože žádný materiál není zcela elastický, a to ani v případě malých deformací, je používán takzvaný pružinový model, který je fyzikální idealizací perfektního elastického chování, pro přibližné určení vlastností mnoha materiálů. Symbol pro lineární elasticitu je uveden na obrázku 1 (a); symbol pro nelineární elastickou pružinu na obrázku 2 (b). Vztah síla-posun lineární elastické pružiny, uveden v obrázku 2 (c) a nelineární a lineární vztah síla-posun v obrázku 2 (d)

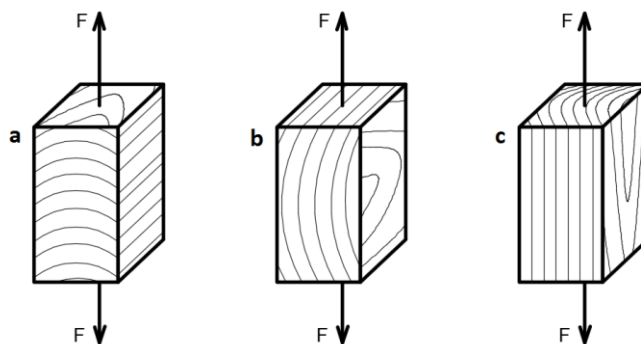


Obrázek 1 (a) lineární elasticita, (b) nelineární elasticita, (c) nedeformovaný a deformovaný model, (d) nelineární a lineární vztah síla - posun (Bodig a Jayne 1982)

Dřevo a spousta dalších materiálů má po pozvolném překročení lineární, elastické části diagramu plastickou, nelineární část. Tyto dvě části odděluje bod, který se nazývá, mez úměrnosti. Po překročení této meze rostou plastické deformace a deformace pružné v čase. (Požgaj et. al. 1997)

3.1.2. Pevnost dřeva zatíženého tahem

Pevnost dřeva zatíženého tahem rozlišujeme podobně jako u tlaku podle anatomických směrů dřevních vláken. Znázornění zatížení dřeva tahem podél vláken, kolmo na vlákna v radiálním směru a kolmo na vlákna v tangenciálním směru viz (obr. 2).



*Obr. 2 - tah (a) kolmo na vlákna radiální, (b) kolmo na vlákna tangenciální
(c) podél vláken*

Pevnost dřeva zatíženého tahem ve směru vláken je v porovnání s ostatními vlastními pevnostmi největší a průměrná hodnota tahové pevnosti ve směru vláken pro všechny tuzemské dřeviny se udává 120 MPa. Velká pevnost v tahu podél vláken je dána především vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Elementy zabezpečující převážně mechanickou funkci, letní tracheidy a libriformní vlákna, mají zdřevnatělou buněčnou stěnou tvořenu z více jak 50% makromolekulami celulózy s téměř rovnoběžnou orientací s podélnou osou buněk. Teoreticky by díky kovalentním vazbám orientovaným v podélném směru mohla pevnost v tahu dosáhnout 8000 MPa. Molekuly celulózy ovšem nevytvářejí pouze krystalické celky, ale ve fibrilární struktuře se nacházejí i amorfni části. Tahová pevnost tedy není dána jen pevností kovalentních vazeb, ale je redukována o podíl amorfni částí celulózy. Molekulární soudržnost celulózových řetězců a celého lignino-sacharidového komplexu je navíc snížena rozdílnou orientací v buněčné stěně, složením střední lamely a přítomností inkrustačních látek. Na makroskopické úrovni je pevnost v tahu dále redukována přítomností dřeňových paprsků. Výsledná pevnost v tahu ve směru vláken je výsledkem vzájemných interakcí struktury dřeva. (Požgaj et. al. 1997) Pevnost v tahu podél vláken u různých dřevin, viz (Tab. 1)

*Tabulka 1 - Pevnost v tahu ve směru vláken u některých dřev
(podle Ugoleva 1986)*

Druh dřeva	Mez pevnosti v tahu ve směru vláken (MPa)		Druh dřeva	Mez pevnosti v tahu ve směru vláken (MPa)	
	w = 12%	w = 30%		w = 12%	w = 30%
modřín	125	96	dub	132	100
borovice	103	79	jasan	145	109
smrk	103	79	buk	123	92
jedle	79	61	bříza	139	106

Dřevo zatěžované v tahu napříč vláken vykazuje na rozdíl od předcházejících vlastností jednu z nejmenších pevností vůbec. Hodnoty pro některé druhy dřevin jsou uvedeny v tabulce (2). Průměrná tahová pevnost kolmo na vlákna se pohybuje v rozpětí od 1,5 do 5 MPa, proto bychom se při použití dřeva na nosné konstrukce měli tomuto způsobu zatížení vyhnout. Nízká pevnost v tahu kolmo na vlákna vychází z orientace vazebných sil. Ve směru napříč vláken se ve větší míře podílejí vodíkové vazby a Van der Waalsovy vazby, které jsou řádově slabší, než vazby kovalentní. Předpokládá se, že toto je jednou z hlavních příčin několikanásobného rozdílu mezi tahovou pevností ve směru a napříč vláken. (Požgaj et. al. 1997).

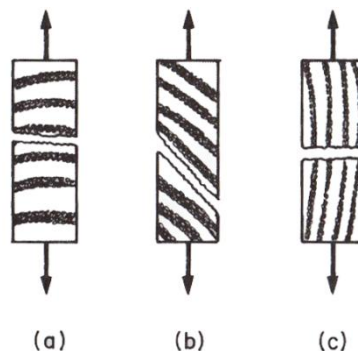
*Tabulka 2 - Pevnost dřeva v tahu napříč vláken u vybraných dřev
(podle Ugoleva 1986)*

Mez pevnosti (MPa) v tahu napříč vláken ve směru		
druh dřeva	radiálním	tangenciálním
	W = 12%	W = 12 %
smrk	2.2	1.7
dub	5.8	-
buk	4.4	3.4
habr	4.6	3.8

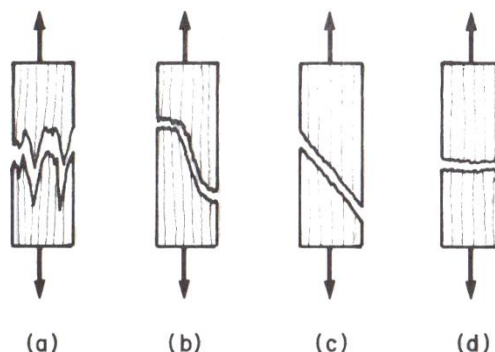
3.1.3. Deformace a porušení vlivem tahu

Bodig a Jayne (1982) ve své publikaci uvádí deformace způsobené tahem do meze úměrnosti. Tah na zkušební vzorku způsobí rozměrové změny ve třech anatomických směrech, v podélném, radiálním a tangenciálním. Ve směru namáhání dojde k prodloužení tělesa, kolmo od směru namáhání dojde k zúžení. Tyto rozměrové změny lze v jednotlivých směrech vypočítat pomocí Hookeova zákona.

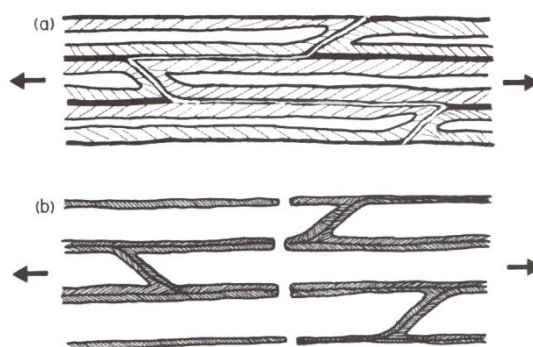
Po překročení meze pevnosti je u dřeva s vyšší pevností roztržená část vláknitá nebo třískovitá, u dřeva s menší pevností je schodovitá až téměř hladká. Při zatížení v tahu ve směru vláken se dřevo chová jako křehký materiál s malou deformací a zlomem bez viditelných předcházejících příznaků (plastických deformací). I když je tahová pevnost dřeva ve směru vláken značná, nelze této vlastnosti prakticky v plném rozsahu využít vzhledem k tomu, že často dochází k porušení dřeva (smykem, otláčením) v místech upevnění konstrukčních dílů. (Požgaj et. al. 1997)



Obrázek 3 - typy porušení dřeva v tahu (a)porušení v jarním dřevě (b)porušení podél letokruhu (c)porušení dřevních vláken v podélném směru (Bodig a Jayne 1982)



Obrázek 4 - typy porušení dřeva v tahu v podélném směru (a) vláknitý lom (b) lom v důsledku kombinace tahu a smyku (c) smyk (d) křehký lom (Bodig a Jayne 1982)



Obrázek 5 - Nejběžnější poruchy struktury tahem (a) tlustostěnné letní dřevo (b) tenkostěnné jarní dřevo (Bodig a Jayne 1982)

Obecně se dá říct že si trhlina hledá cestu nejmenšího odporu. U vzorku, který bude narušen otvorem, nebo jakoukoli další vadou se trhlina začne šířit právě zde.

3.2. Nedestruktivní testování dřeva

Nedestruktivní hodnocení fyzikálních vlastností dřeva má své počátky v potřebě vyřešit praktické problémy, aniž by došlo k destrukci integrity zkoumaných objektů. Je obecně přijímáno, že termíny “nedestruktivní hodnocení vlastností dřeva a “nedestruktivní testování vlastností dřeva” jsou zaměnitelné. Beall (1996), Ross a Pellerin (1991) a Bodig (1994) volí termín “nedestruktivní hodnocení” jako vhodnější, jelikož “vyjadřuje proces, v rámci něhož jsou vybrané fyzikální vlastnosti materiálu posuzovány bez poškození nebo změny jeho vlastností“.

První nedestruktivní hodnocení dřeva bylo prováděno vizuální inspekci především při výběru dřeva určeného pro nosné účely v řadě aplikací. I dnes je tato metoda široce používána pro klasifikaci dřeva pro řezivo, překližky atd. a detekci biologické degradace těchto produktů. Rozvoj vědeckých nedestruktivních metod byl umožněn v počátku 20. století s rozvojem teorie elasticity a instrumentace měření vlastností dřeva. Zájem vědců byl nejdříve upřen na určení modulu pružnosti statickými metodami (Horig 1935, Kollmann 1951). Později bylo publikováno použití akustických vibrací pro dynamické metody sloužící k určení elastických konstant dřeva v Evropě (Barducci a Pasqualini 1948, Hearmon 1948, Kollmann a Krech 1960), v Severní Americe (Jayne 1955, James 1959) a v Japonsku (Fukada et al. 1956). Entuziasmus v rámci rozvoje rentgenových technik pro hodnocení interní struktury dřeva v 60. letech 20. století měl pozitivní vliv na rozvoj mikrodenzitometrie v různých laboratořích po celém světě (Polge 1978). V Japonsku byla vyvinuta technika rentgenové difrakce pro účely studia krystalinity celulózy ve dřevě (Fukada 1965, Fukada et al. 1956). V první polovině 60. let 20. století byly Hoylem (1961), Senftem et al. (1962) a Pellerinem (1965) publikovány první výsledky dynamického testování za použití vibračních metod při nedestruktivním testování konstrukčního dřeva. Rozvoj ultrazvukových technických metod pro elastickou charakterizaci dřeva byl ve Spojeném království podpořen prací Hearmona (1965). Od pozdních 70. let 20. století byla činnost laboratoří po celém světě zabývajících se nedestruktivním testováním dřeva stimulována sympoziem organizovaným v USA na Washington State University Pellerinem a kolegy ve spolupráci s ForestProductsLaboratory z Madisonu (Ross a Pellerin 1991, 1994) a od roku 1996 střídavě v Evropě a USA. Od roku 1970 byly publikovány nové poznatky v oblasti mechanické charakterizace dřeva (Jayne 1972, Bodig a Jayne 1982), dielektrické

vlastnosti dřeva (Torgovnikov 1993) a akustické vlastnosti dřeva (Bucur 1995). Schniewind (1981) byl editorem první encyklopedie nauky o dřevě. V roce 1983 byla započata publikace zvláště důležitých sérií knih *SpringerSeries in Wood Science*. Posledních 20 let 20. století bylo charakterizováno mimořádným rozvojem různých metod pro nedestruktivní hodnocení dřevěných výrobků, které umožnily zobrazení vnitřní struktury dřeva jak na makroskopické tak mikroskopické úrovni. (Sutton et al. 2009)

Pro zajištění efektivního použití dřevěných materiálů v budoucnosti je nutné se věnovat oblastem rozvoje nedestruktivních technik pro hodnocení různých vlastností, jako jsou fyzikální, mechanické, chemické, estetické atd., zlepšení přírodních kvalit dřeva prostřednictvím modifikace vlastností různými postupy a vytvoření nových produktů za použití dřeva jako hlavního surového materiálu, které odpovídají požadavkům moderní společnosti. Kombinace fyzikálního testování a modelování by mělo přinést lepší pochopení faktorů, které ovlivňují kvalitu produktů. (Sutton et al. 2009) V dnešní době jsou technologie používané pro dřevěné kompozity založeny na kontrole kvality nedestruktivními technikami hodnocení, které hrají čím dál důležitější roli v procesu přizpůsobení trhu na změny ve zdrojích dřeva. V budoucnosti bude důležité vyvinout nové nedestruktivní techniky a prostředky pro kontrolu kvality nových dřevěných kompozitů vyráběných z rozmanitějších zdrojů surového materiálu. Jak poznamenali Youngquist a Hamilton (1999), právě v tomto spočívá výzva pro 21. století.

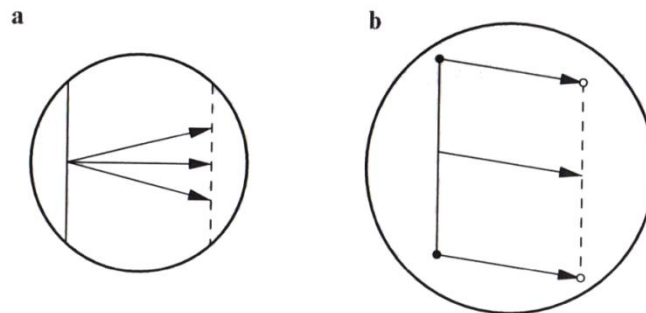
Metoda konečných prvků by se také dala zařadit do kategorie nedestruktivního testování, i když jde jen o výpočetní (virtuální) predikci chování konkrétního modelu, který je pak potřeba verifikovat destruktivně, dal by se takto upravený a verifikovaný model aplikovat i na další podobné úlohy už bez destruktivní testování.

3.3. Metoda korelace digitálního obrazu

Jedná se o disciplínu z počítačového zpracování obrazu. Porovnání obrazu se například používá k řešení problémů v řízení průmyslových procesů, k automatickému rozpoznávání SPZ v garážích, na biologické růstové jevy, geologické mapování, stereo vidění, kompresi videa a u autonomních robotů pro výzkum vesmíru. Vzhledem k tomu, že je využití tak rozdílné, existuje široká škála přístupů a algoritmů, které se v současné době používají a mnoho z nich je specializovaných na daný úkol. Například vysoce specializované algoritmy existují pro stanovení pohybových vektorů malých stopových částic použitých při výzkumu průtoku tekutin. (Adrian, et. al.) Digitální korelace obrazu není výjimkou a používají se takové algoritmy, které berou v úvahu fyziku podkladových deformačních procesů. V jednom ohledu je však digitální korelace obrazu poněkud jedinečná. Vzhledem k nepatrným pohybům, které jsou často předmětem zájmu v technických provozech, jsou požadavky na rozlišení mnohem vyšší, než u většiny ostatních případů. Tyto požadavky vedly k vývoji mnoha algoritmů zaměřených na zajištění vysokého rozlišení s minimem systematických chyb. (Sutton et al. 2009). Tato metoda je založena na výpočtu přetvoření tělesa ze snímků před a po jeho deformaci, přičemž při namáhání sledujeme posun výběru pixelů na snímku. Tyto směrové vektory posunu bodů se dále zpracovávají a přes triangulační schéma se vypočítají, přetvoření bodů tj. poměrnou deformaci. Aplikací této metody získáváme dva výstupy před a po deformaci. Vyhodnocení je provedeno softwarem. Z výstupu tohoto softwaru je graficky zpracován průběh deformace povrchu. Pro měření posuvu bodů touto metodou je důležité, aby měřený objekt disponoval charakteristickou strukturou. (Jahoda a Valach, 2009)

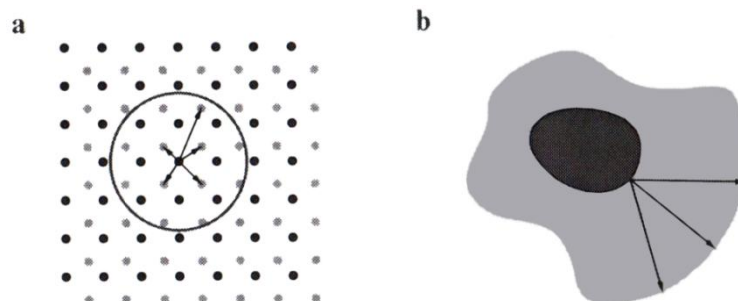
Obecně nelze nalézt jeden shodný pixel v jednom i druhém obrazu. Typicky lze hodnotu šedé jednoho pixelu nalézt v tisíci dalších pixelů v druhém obrazu, a žádná jedinečná shoda neexistuje. Pokládáme tedy nalezení shody v těsné blízkosti pixelu za náhodu. Zatímco okolí pixelu poskytne další informace, problém s porovnáním stále nemusí být jedinečný. Obr. 6 ilustruje tento problém pro posunutí bodu v obraze. Ačkoliv složka pohybového vektoru, který je kolmý k čáře, může být vyřešena, pohyb podél čáry nikoliv. Bod na čáře na prvním obrázku lze přizpůsobit libovolného bodu na čáře na obrázku druhém. Tato nejednoznačnost se běžně označuje jako *aperture*

problem (problém okénka). V pravé části obrázku byl pohled rozšířen a odhalil tak koncové body čáry. V tomto případě může být pohybový vektor jednoznačně určen.



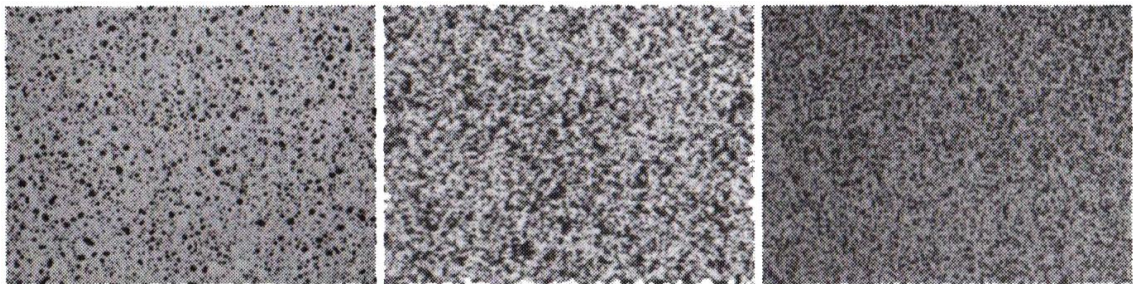
Obrázek 6 - Aperture problem při porovnávání obrazu. (a) Bod na čáře může odpovídat libovolným bodům na posunuté lince. (b) Okénko bylo rozšířeno a nyní zahrnuje koncové body čáry. Pohybový vektor je nyní unikátní. (Sutton et al. 2009)

Aperture problem je zvláštním případem obecnějšího korespondenčního problému. Existuje mnoho situací, v nichž nemůže být stanovena jedinečná korespondence mezi rysy ve dvou obrazech. Dva případy jsou znázorněny na (Obr. 7). U opakujících se struktur, jako např. mřížka s malými body, může být pohyb vyřešen pouze do neznámého násobku konstanty mřížky, jak je znázorněno na (Obr. 7a). Pokud se na celou mřížku nahlíží rozšířením okénka, problém korespondence se opět stává unikátním a pohybové vektory mohou být vyřešeny. Problém korespondence půjde vyřešit obtížněji, pokud se neomezíme pouze na shodnou transformaci, ale vezmeme v úvahu případy, kdy objekt prochází deformací. To je znázorněno na (Obr. 7b). U struktury bez textury, která prochází deformací, nemůžeme získat žádné informace o pohybu uvnitř jejích hranic, protože nejsou přítomny žádné rysy. Ovšem vzhledem k deformaci dokonce vůbec není možné určit pohybové vektory na rozhraní struktury.



Obrázek 7 - Problém korespondence pro (a) opakující se strukturu, kde lze jedinečnou shodu nalézt pouze v případě, že je okraj mřížky zobrazen v okénku a (b) deformující se struktura bez textury, u které nemůže být stanovena žádná shoda bez dalších předpokladů (Sutton et al. 2009)

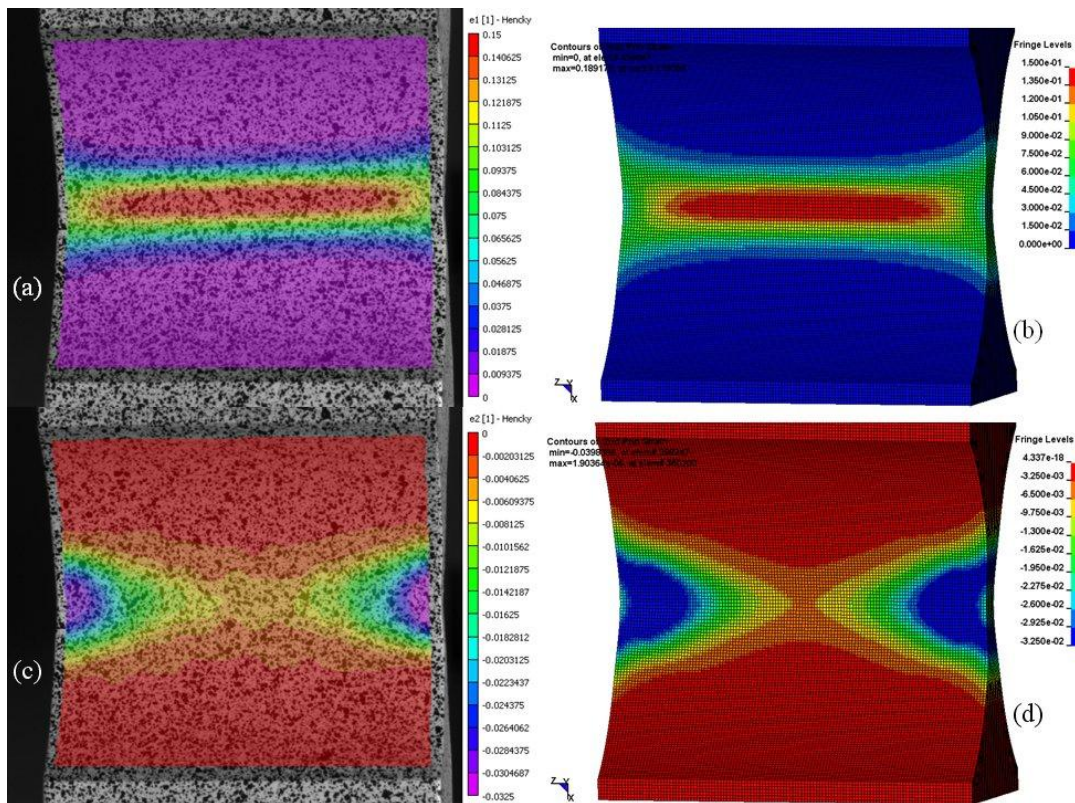
Aby se dal problém korespondence jednoznačně vyřešit, musí povrch objektu vykazovat určité vlastnosti. Rozebrání *aperture problem* ukázalo, že orientované struktury, jako například čáry, omezují určení pohybových vektorů ke složce kolmé ke struktuře. Ideální struktura povrchu by tedy měla být izotropní, neměla by tudíž mít přednostní orientaci. Dále jsme ukázali, že opakující se textury mohou vést k problémům s chybnou registrací. Preferovaná textura povrchu by proto měla být neperiodická. Tyto požadavky přirozeně vedou k používání náhodných textur. Avšak vzory používané při digitální obrazové korelaci ulpívají na povrchu a deformují se s povrchem, a tudíž nedochází k žádné ztrátě korelace i při velkých přímočarých posunech a deformacích. Některé příklady zrnitosti jsou znázorněny na (Obr. 8). Jedním z klíčových rysů dobré zrnitosti je její vysoký informační obsah. Vzhledem k tomu, že má celý povrch texturu, jsou informace pro porovnávání vzorů k dispozici všude na povrchu a to nejen v poměrně řídké mřížce. Díky tomuto lze použít relativně malé okénko pro porovnání vzorů, které se také běžně označuje jako *subset*. (Sutton et. al. 2009).



Obrázek 8 - Ukázky běžně používané textury (Sutton et al. 2009)

Digitální korelace obrazu se obvykle používá pro výpočet velkého množství vektorů posunutí v celém obrazu. Pokud by tedy například někdo rád zanalyzoval posunutí vektorů na 5 pixelových středech při typickém rozlišení obrazu 1024 x 1024 pixelů, bude nutné vypočítat přibližně 40 000 vektorů posunutí. S rostoucím trendem vyšších rozlišení fotoaparátů počet datových bodů, které je třeba analyzovat, neustále roste. Kromě toho není analýza zpravidla omezena pouze na jediný obrázek, ale spíše se aplikuje na sekvence obrázků. Není neobvyklé zachytit několik set snímků při dynamických deformačních událostech, což má za následek, že je třeba zopakovat základní algoritmus porovnávání obrazů víc než milionkrát. Z tohoto důvodu má výpočetní účinnost algoritmu digitální korelace obrazu zásadní význam. (Sutton et al. 2009).

O tom, že je tato metoda velmi užitečná a má mnoho využití svědčí i to, že je použita v celé řadě dalších experimentů, různých autorů. Sutton et. al (2009) ve své publikaci také uvádí srovnání experimentu 3D DIC s numerickým modelem LS-DYNA viz (Obr. 9), kde znázorňuje mimo jiné i výhody 3D DIC analýzy.



Obrázek 9 - Srovnání DIC a FEM (Sutton et. al 2009)

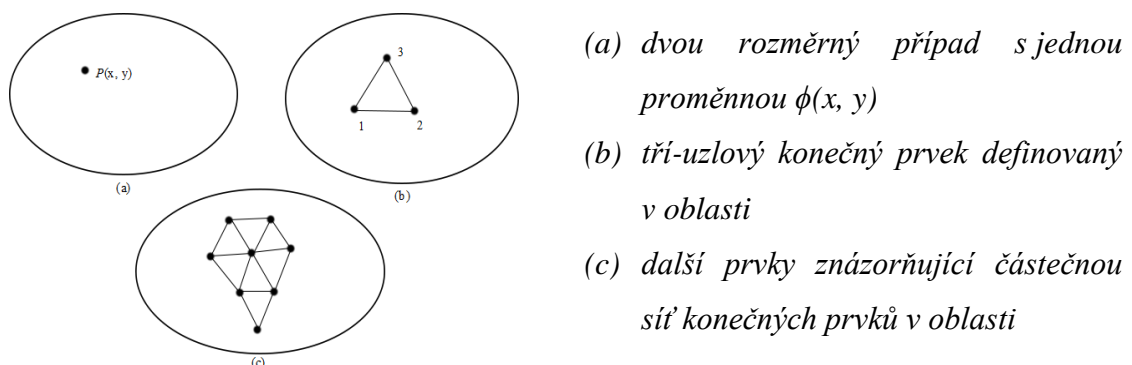
Dále například Pan, et. al. (2009) uvádějí ve své publikaci další výhody metody DIC a popisují i možnost měření malých deformací s pomocí mikroskopu. Zing, et. al. (1995) použili metodu DIC při hodnocení kompozitních materiálů na bázi dřeva a vyhodnotili tuto metodu jako velmi vhodnou. Problémy spojené s vyhodnocení a konkrétně už zmíněný problém korespondence podmnožiny ve své publikaci zveřejnil Schreier, et. al (2002). Analýzu dřevoplastového kompozitu zkouší touto metodou Godara, et al. (2009). Lecompte, et al. (2006) Zkoumá vliv kvality unikátního patternu. Ocelové vzorky v tahu metodu DIC zkoumá Wattrisse, et al. (2001). Zajímavou studii uvedli Pan, Bing, et al.(2010), metodou DIC zkoumají deformace vlivem tepla a existuje mnoho dalších publikací na tohle téma.

3.4. Metoda konečných prvků

V technické praxi se ukázalo, že metoda konečných prvků (MKP) je velmi silná při řešení úloh mechaniky poddajných těles. V průběhu poslední třetiny dvacátého století se MKP stala téměř monopolním prostředkem numerické analýzy mechanických soustav poddajných těles. Je implementována v řadě inženýrských programových prostředků: v robustních aplikacích jako jsou tradiční „velké MKP balíky“ ANSYS, ADINA, MARC atd. dále v programech specializovaných na různé konkrétní technické problémy, simulace havárií, simulace technologických procesů a i v systémech CAD jako prostředek pro rychlé návrhové výpočty. Často je vlastní MPK ukryta „někde uvnitř programu“ a uživatel s ní ani nepřijde do styku (Španiel a Horák 2011). Metoda konečných prvků dnes jednoznačně dominuje při napětově-deformační analýze.

Pod pojmem MKP si lze představit způsob diskretizace kontinua, který vychází z představy rozdělení tělesa na podoblasti, ve kterých je posuv interpolován z hodnot v takzvaných uzlových bodech, Celková potenciální energie tělesa se vyjadřuje jako součet celkových potenciálních energií těchto podoblastí (Španiel a Horák 2011).

Obrázek (10) zachycuje objem některých materiálů nebo materiálů známých vlastností. Objem představuje okrajové podmínky řešeného problému. Pro zjednodušení, v tomto bodě, předpokládáme dvou rozměrný případ s jednou proměnnou $\phi(x, y)$, která musí být stanovena v každém bodě $P(x, y)$ tak, že je známa řídicí rovnice (nebo více rovnic), která splňuje přesně takový bod (Hutton, 2004).



Obr. 10- (Hutton, 2004)

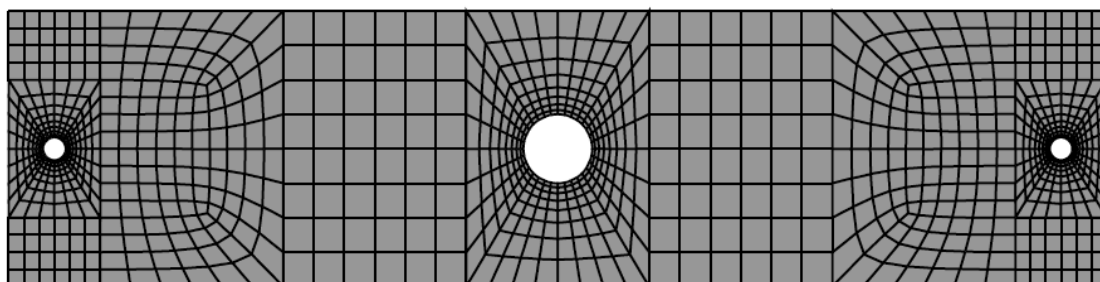
3.4.1. Základní nastavení elastické úlohy v MKP software

V úlohách řešených pomocí MKP software (např. Ansys), je třeba dbát na správné stanovení čtyř základních parametrů, materiálové vlastnosti, hustota výpočetní sítě, okrajové podmínky a interpretace výsledků.

Materiálové vlastnosti spolu s geometrií zkoumaného tělesa přímo ovlivňují tuhost celku, proto jejich nesprávná definice výrazně ovlivní sledované výsledky. Při strukturální analýze je nejprve nutno rozhodnout, jestli využijeme lineárních materiálových vlastností, tedy průběh deformací a napětí bude definován pouze pomocí Youngova modulu pružnosti (E) a Poisso-novou konstantou (ν), tyto hodnoty pro dřevo najdeme v literatuře viz (*Tab. 3*), nebo připustíme nelineární materiálové vlastnosti, tedy napětí bude omezeno mezi pevností materiálu (např. mezi kluzu, pevností v tlaku nebo tahu atd.). Lineární materiál se při analýze používá především tam, kde bud' jistě víme, že nemůže být dosažena mez pevnosti materiálu, nebo v místech, na kterých nesledujeme průběhy deformací a napětí (např. v částech modelu, které nelze jednoznačně nahradit pomocí okrajových podmínek). Nelineární materiál by měl být použit vždy, kdy si nejsme jisti, zda nebude dosažena mez pevnosti materiálu, a to především v místech, ve kterých zkoumáme deformace vzorku a napjatost na něm. Mez pevnosti materiálu je často stanovena pomocí materiálových zkoušek a matematicky popsána příslušným materiálovým zákonem plasticity, jako jsou například von Misesova podmínka plasticity pro kovové materiály nebo podmínka plasticity Drucker-Prager využívána pro materiály s rozdílnými vlastnostmi v tahu a tlaku. (Jiří Drozda, et al. 2012)

Přesné řešení získáváme pouze v místech uzlových bodů, v ostatních částech jsou výsledky interpolovány mezi jednotlivými uzlovými body, proto hustota výpočetní sítě přímo ovlivňuje přesnost řešení. Z toho důvodu se v místech, která analyzujeme, doporučuje testovat dostatečnou hustotu sítě. Nejspolehlivějším způsobem ověření je konvergenční studie, také nazývána h-adaptive konvergence. Její podstata je založena na tom, že v místě zájmu jsou vygenerovány tři sítě se vzrůstající hustotou, následně je sledována závislost přírůstku změny zkoumané veličiny na hustotě sítě. U strukturální analýzy se nejčastěji jedná o napětí. Takto jsme schopni stanovit přiměřenou hustotu sítě k požadovaným výsledkům, aniž bychom zbytečně zvyšovali nároky na hardware a

výpočetní dobu. (Jiří Drozda, et al. 2012) Na obrázku (11) je vidět použité síťování v modelu s otvorem ve studii na institutu v Massachusetts.



Obrázek 11- síťování kolem otvoru podle (studie institutu v Massachusetts 2004)

Místo funkcí vyšších řádů lze použít větší hustotu sítě. Okrajové podmínky v podstatě nahrazují interakci mezi modelovanou částí konstrukce a částí konstrukce, která už není v modelu obsažena. Zahrnují veškeré zatížení aplikované na konstrukci, místa omezení posuvů nebo rotací (podpory) a také speciální typ okrajové podmínky, kterým je kontakt mezi dvěma tělesy. Nesprávná volba odpovídajícího typu okrajové podmínky může výrazně ovlivnit výsledky výpočtu. (Jiří Drozda, et al. 2012)

Tabulka 3 - vlastnosti smrku (Požgaj et. al. 1997)

Moduly E a Poissonova čísla v hlavním směrech pružné symetrie (L, R, T) $W_a=11-12\%$

Dřevina	Ve směru vláken		Radiálním směrem			Tangenciálním směrem			
	Poissonova čísla		Modul E_L (MPa)	Poissonova čísla		Modul E_R (MPa)	Poissonova čísla		Modul E_T (MPa)
Smrk/ Spruce/ Picea abies	μ_{RL}	μ_{TL}		μ_{TR}	μ_{LR}		μ_{RT}	μ_{LT}	
	0,489	0,557	13650	0,990	0,023	789	0,687	0,014	289

Smykové moduly pružnosti $W_a=11-12\%$

Dřevina	Radiální rovina G_{LR} (MPa)	Tangenciální rovina G_{LT} (MPa)	Příčná rovina G_{RT} (MPa)
Smrk/Spruce/Picea abies	573	474	53

Počet pozorování $n=90-120$

3.5. Napětí kolem otvoru

Počátek analýzy koncentrace napětí začíná v roce 1898 s lineárně elastickým řešením Ernsta Kirsche pro napětí kolem otvoru v nekonečné desce. Řešení Ernsta Kirsche obsahuje dobře známý faktor tří koncentrací napětí v otvoru při jednoosém zatížení. Koncentrace napětí se, ale může lišit ve dvou až čtyřech složitějších podmínkách zatížení. (Pilkey, 2005) Popisuje Faktory koncentrace napětí jako, oblasti vysokého napětí v místech rozměrových změn a nesoudržnosti materiálu, například u otvorů, prasklin a ostrých rohů.

Nejdříve je popisován základní případ pro jednoosý tah, poté složitější případ čtvercového zatížení tahem a smykem technikou superpozice a nakonec výpočet koncentrace napětí v desce se známou šířkou.

3.5.1. Zatížení jednoosým tahem Ernst Kirsch

Ernst Gustav Kirsch byl Německý inženýr, studoval v Sorbonne, v Curychu a Berlíně. Byl profesorem od roku 1874 na University of Technology v Chemnitz. Je znám především rovnicemi popisující elastickou napjatost kolem otvoru.

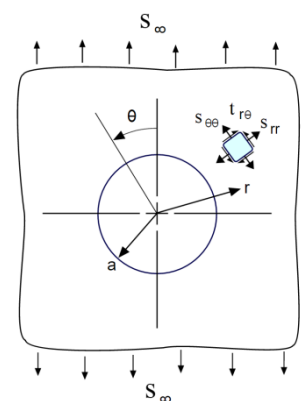
Kirschovo řešení pro napětí v otvoru je případ jednoosého namáhání tahem v desce nekonečné šířky. Jednoosé napětí je reprezentováno pomocí dálkového napětí, σ_∞ . Otvor má poloměr, a , radiální koordinace je r (což se neuvádí pokud $r > a$).

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_\infty}{2} \left(1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) + \frac{\sigma_\infty}{2} \left(1 - 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_\infty}{2} \left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) - \frac{\sigma_\infty}{2} \left(1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta$$

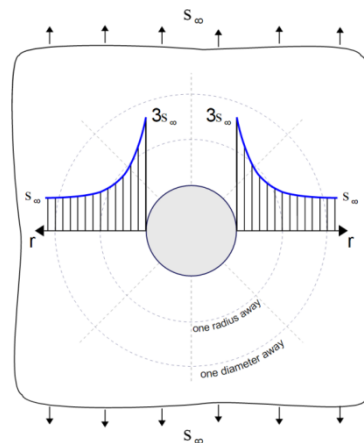
$$\tau_{r\theta} = - \frac{\sigma_\infty}{2} \left(1 + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \sin 2\theta$$

*Rovnice 1 - vzorec napětí kolem otvoru
(Kirsch, 1898)*



*Obrázek 12 - schéma pro vzorec
(McGinty, 2014)*

V takovém příkladu byl proveden i test metodou konečných prvků viz (Obr. 13), který ukazuje koncentraci napětí směrem od okraje otvoru. Toto napětí se s přibývajícím vzdáleností zmenšuje. Ve vzdálenosti dvojnásobku průměru od středu je napětí malé, a ve vzdálenosti trojnásobku dokonce zanedbatelné (McGinty, 2014). Zmenšující se napětí od středu otvoru ve své publikaci potvrzuje i (Smith, 1956), který poukazuje na rozdíly mezi ortotropním a izotropním materiálem. Při definici materiálu jako „ortotropního“, maximální hodnota napětí klesá na polovinu již ve vzdálenosti jedné desetiny poloměru otvoru.

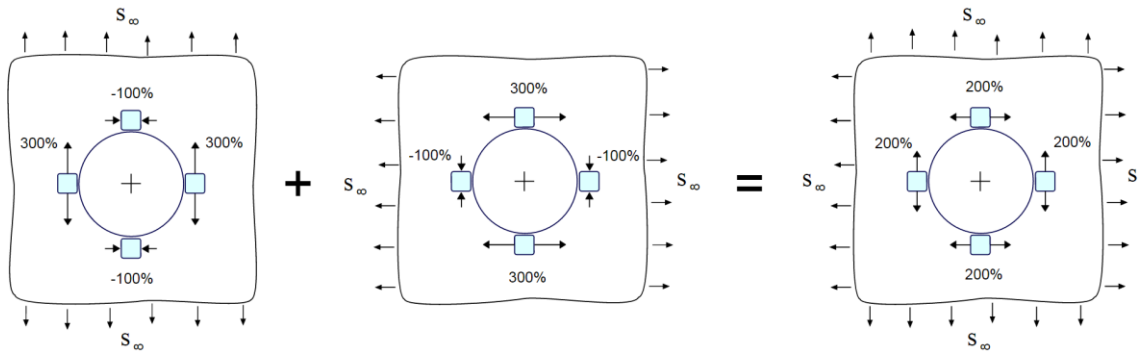


Obrázek 13 - koncentrace napětí (Bob McGinty, 2014)

3.5.2. Čtvercové a smykové zatížení

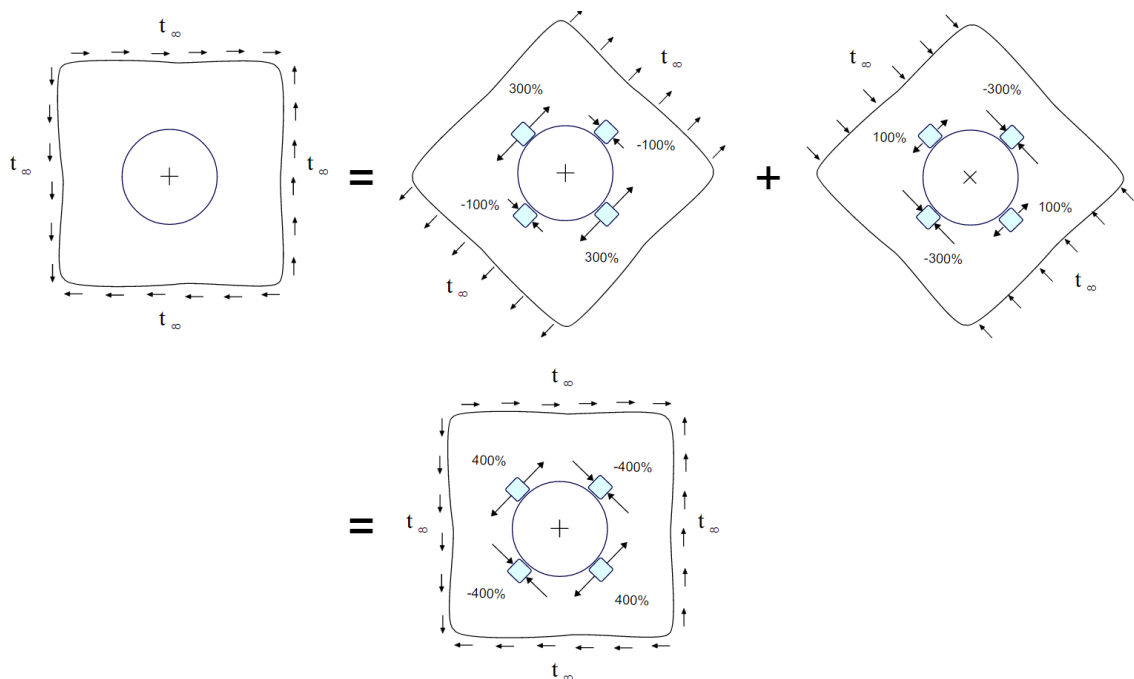
Čtvercové zatížení se skládá ze stejného množství napětí v obou směrech x a y . Výsledek stavu namáhání může být stanoven Kirchovým řešením superpozice, což je přípustné, protože je lineární. Tento postup je znázorněn na obrázku níže (Obr. 14). Ukazuje se, že koncentrace napětí v otvoru pod čtvercovým zatížením má jen jeden nebo dva faktory koncentrace napětí, nikoliv tři jak je tomu v případě jednoosého zatížení. To se týká průběhu celého obvodu otvoru. Napjatost je nezávislá na θ , protože to je stejné u všech úhlů. (McGinty, 2014)

Tahle situace by nastala pouze u izotropního materiálu, který má ve všech směrech stejné vlastnosti. Ve vzorku dřeva by bylo napětí v ose x a y jiné a záleželo by také na orientaci směru dřevních vláken. (Požgaj et. al. 1997) uvádí až patnáctinásobný rozdíl hodnot v tahu mezi podélným a příčným směrem vláken. To je způsobeno především rozdílnou chemickou vazbou a mikroskopickou stavbou.



Obrázek 14 - čtvercové zatížení (McGinty, 2014)

Účinky smyku mohou být stanoveny superpozicí svých hlavních napětí. Níže uvedený obrázek viz (Obr. 15) ukazuje dvě hlavní napětí orientované pod úhlem $\pm 45^\circ$. První z nich je pozitivní a číselně rovna hodnotě smykového napětí. Druhá je negativní. Výsledkem je, že smykové zatížení vede ke vzniku čtyř faktorů koncentrací napětí v otvoru. (McGinty, 2014). Tohle by opět platilo pouze pro izotropní materiály jako jsou některé kovy, plasty atd.



Obrázek 15 - smykové zatížení (McGinty, 2014)

3.5.3. Napětí v desce se známou šířkou

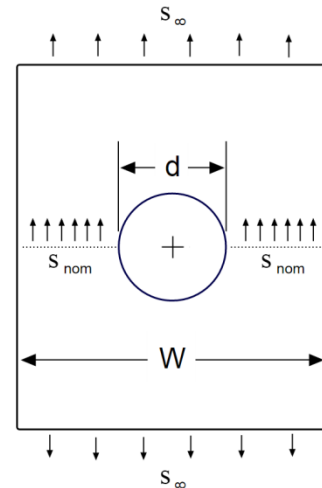
Při práci s konečnou šířkou desky, je nutné zavést další termíny, jmenovité normálové napětí, σ_{nom} , maximální jmenovité napětí, σ_{max} a faktor koncentrace napětí K_t .

$$K_t = 3 - 3,14 \left(\frac{d}{W}\right) + 3,667 \left(\frac{d}{W}\right)^2 - 1,527 \left(\frac{d}{W}\right)^3$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{(D-d)t}$$

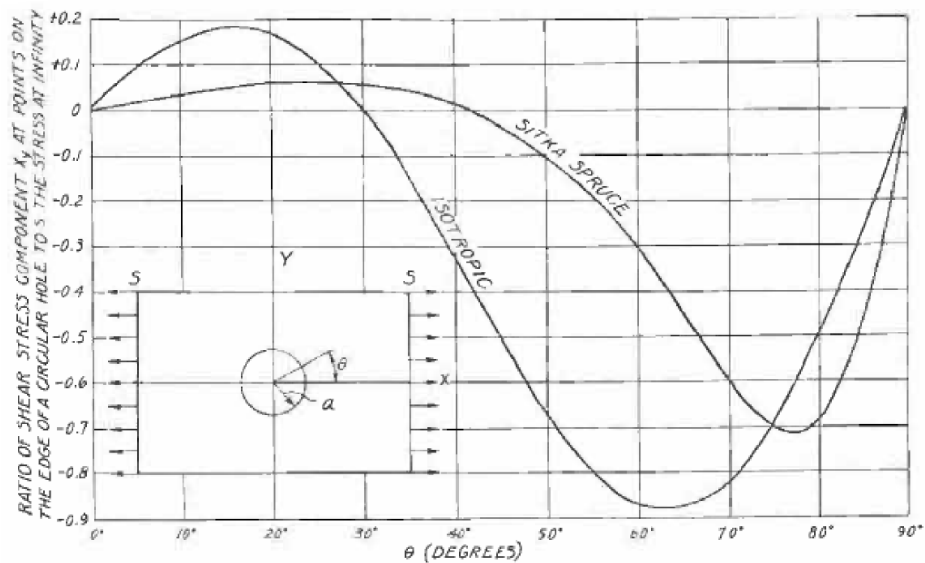
$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} K_t$$

Rovnice 2 - Výpočet maximálního napětí (Pilkey, 2005)

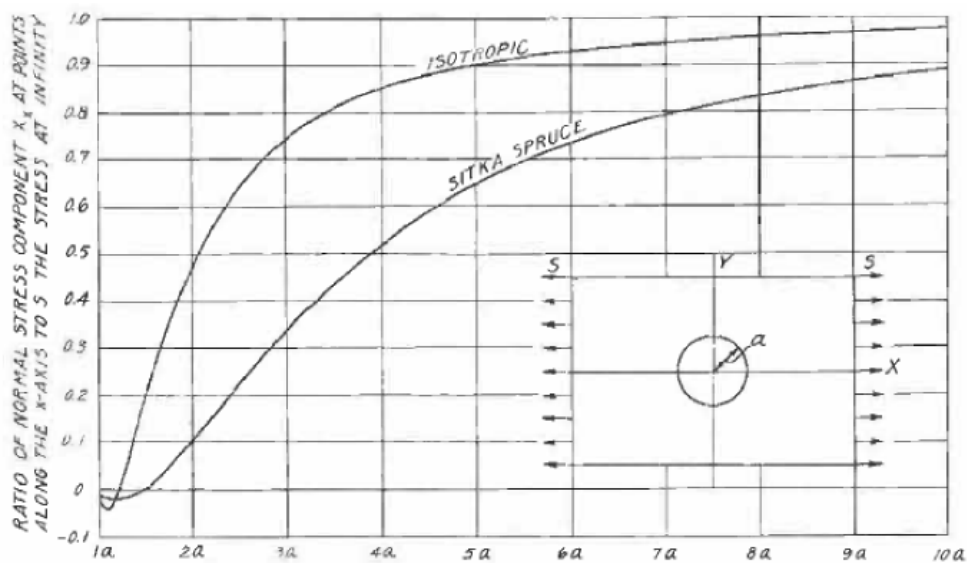


Takto je bez problémů možné vypočítat maximální napětí v (MPa), po jednoduché úpravě vzorce lze zjistit napětí v určitém bodě, například na hraně otvoru a na hraně desky. Autor (Pilkey, 1974) také uvádí, že se tímto způsobem nedá popsat nelineární chování materiálů, pouze elastickou část pracovního diagramu. Plastickou část je možno zohlednit pomocí Neuberova pravidla, který se snaží zohlednit chování materiálu.

Rozdíl mezi vypočítanými izotropními hodnoty napětí a hodnoty napětí v reálném experimentu v otvoru ve dřevě uvádí ve své práci (Smith, 1956). Pomocí tenzometrů v bodě na vzorku, pro který byla zjištěna hodnota napětí i výpočetně. Srovnání v grafech viz (Obr. 16;17)



Obrázek 16 - smykové napětí po obvodu kruhového otvoru u desky ze smrku sitka a u isotropní desky (Smith, 1956)



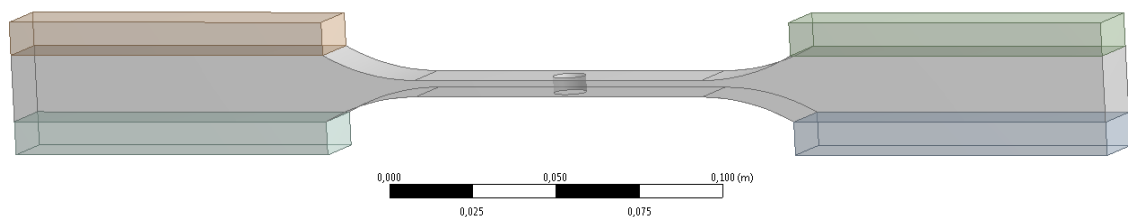
Obrázek 17 - normálové napětí v ose x od okraje otvoru, u desky ze smrku sitka a u isotropní desky (Smith, 1956)

Na grafech viz (obr. 16;17) je možné vidět, že i když jsou naměřené a vypočtené hodnoty napětí trochu odlišné, trend křivky je však velmi podobný. Například na grafu (Obr. 16) je vidět, že maximální smykové napětí u otvoru se u isotropní desky nachází někde u 65° odklonu od osy x , kdyžto u naměřených hodnot z tenzometrů na dřevě až někde u 82° .

4. MATERIÁL A METODIKA

4.1. Vytvoření numerického modelu

K vytvoření modelu bylo třeba určit tvar a rozměry, ty vycházejí z normy ČSN 49 0113. Pro potřeby verifikace reálnou zkouškou metodou DIC byla konstrukce upravena viz kapitola (4.5 - Výroba vzorků). Rozměry byly jinak zachovány dle předpisu z normy. Dále byl geometrický model podle předlohy, viz. (Obr. 18) zakreslen do Ansys v prostředí Workbench, v modulu Design modeler. Po kontrole rozměrů je model připraven na definování materiálových vlastností.



Obrázek 18 - Model vzorku na tah

4.2. Definování materiálových vlastností

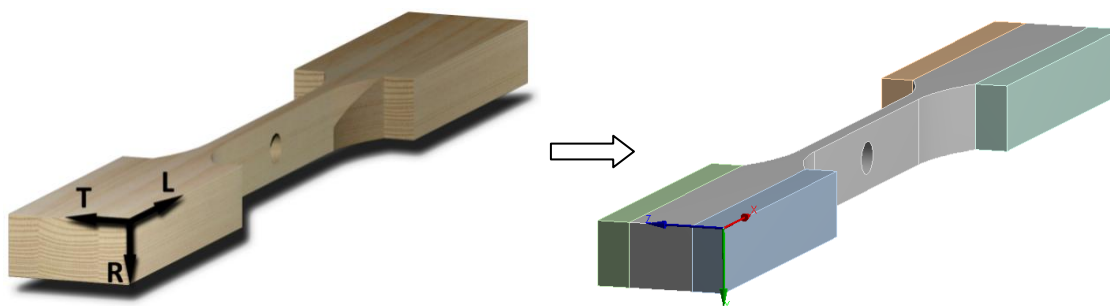
Zvolený materiál pro měření i simulaci bylo dřevo smrku (*Picea Abies*), tudíž je potřeba nastavit odpovídající materiálový model. Smrk a obecně všechny dřeviny jsou ortotropní, to znamená, že musí mít různé a jedinečné vlastnosti ve třech na sebe kolmých osách a to v podélném, radiálním a tangenciálním směru. V těchto třech směrech byly zadány moduly pružnosti, Poissonova čísla a smykové moduly. Hodnoty pro smrk a některé další dřeviny uvádí například (Požgaj et. al. 1997) viz (Tab. 3) v literárním přehledu. Jednotlivé anatomické směry dřeva se musí správně přiřadit k souřadnicovému systému X, Y, Z. Experimentálně byl testován i vzorek z Polyethylen (PE) plastu, vlastnosti tohoto materiálu se nachází v základní knihovně materiálů v Ansys Workbench, viz (Tab. 4) U PE plastu je přednastaveno více parametrů než je potřeba, jelikož budou zjišťovány pouze deformace a napětí, vlastnosti jako například tepelná roztažnost nebo tepelný odpor nejsou potřeba, proto zde nebudou ani uvedeny. Polyethylen je homogenní a izotropní materiál čili, pro definici elastického materiálového modelu stačí tři hodnoty.

Tabulka 4 - Použité materiálové vlastnosti

Smrk		Polyethylen	
Hustota	440 Kg/m ³	Hustota	950 Kg/m ³
Youngův modul v ose X	13650 MPa	Youngův modul	3200 MPa
Youngův modul v ose Y	789 MPa		
Youngův modul v ose Z	289 MPa		
Poissonovo číslo XY	0,023	Poissonovo číslo	0,42
Poissonovo číslo YZ	0,687		
Poissonovo číslo XZ	0,014		
Smykový modul XY	573 MPa	Smykový modul	387,32 MPa
Smykový modul YZ	53 MPa		
Smykový modul XZ	474 MPa		

4.3. Nastavení souřadnicového systému

Jak už bylo několikrát zmíněno dřevo je anizotropní materiál, který redukuje na ortotropní. Proto nestačí nastavit patřičné materiálové vlastnosti obecně, ale konkrétnímu vytvořenému modelu, nebo i jednotlivým částem modelu je třeba určit anatomické směry. V tomto případě je podélný směr zarovnán s osou *X*, radiální s osou *Y* a tangenciální s osou *Z*. Tento systém třech na sebe kolmých os se nazývá ortogonální nebo taky kartézský souřadnicový systém. Změnou úhlu tohoto systému konečných prvků vůči geometrickému modelu je možné simulovat odklon vláken. Vyrobené zkušební vzorky pro reálnou zkoušku jsou téměř speciálně ortotropní tělíska, tudíž je tento souřadnicový systém bude popisovat dostatečně přesně. U větších modelů s výraznějším poloměrem zakřivení letokruhů je lepší materiál definovat pomocí cylindrického souřadného systému.



Obrázek 19 - Nastavení anatomického směru dřeva

4.4. Síťování a definice okrajových podmínek

Meshing neboli rozsítování je proces kdy dojde k systematickému převedení celého geometrického modelu na síť, která je nezbytně nutná pro výpočet. Obecně platí, že čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější, ale výpočet časově náročnější. Pro ideálně přesné výsledky je potřeba provést jednoduchou citlivostní analýzu hustoty sítě. Jelikož je možné si vypočítat maximální napětí u homogenního materiálu s otvorem, podle vzorce viz (Rovnice 2), ve kterém stačí dosadit šířku desky, tloušťku desky, průměr otvoru a zatěžovanou sílu, je možné tento výsledek použít k porovnání s výsledkem simulace metodou konečných prvků. Poté se u konečně-prvkového modelu v Ansys nastaví homogenní materiálový model a zjemňuje se a upravuje síť do té doby než je dosaženo zhruba stejné hodnoty maximálního napětí jako je tomu u výpočtu podle vzorce. I grafická interpretace výsledků bude s jemnější sítí přesnější a lépe vypovídající. K výpočtu takto poměrně jemné sítě je potřeba zhruba tři minuty času při použití počítače, procesorem Intel Core i5 – 6400, který je vytížen z 60% a využito je zhruba 50% operační paměti RAM z celkových 16 GB. Výsledky citlivostní analýzy sítě jsou uvedeny ve výsledkové části práce.



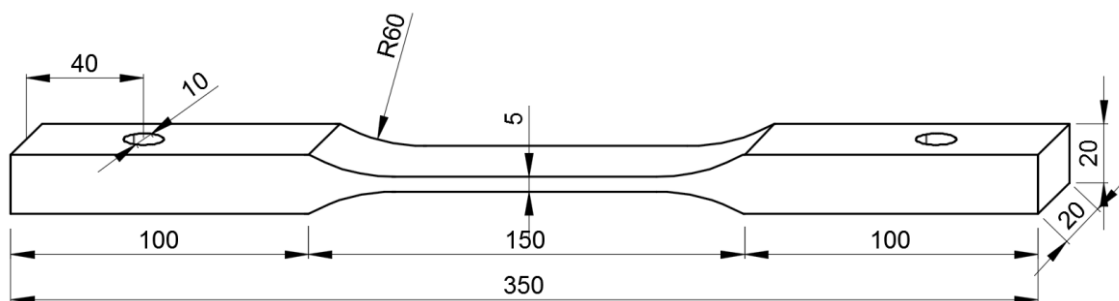
Obrázek 20 - Příklad síťování modelu

Jelikož největší deformace, normálové a smykové napětí se budou odehrávat v pracovní části vzorku, především v okolí otvoru a budou z této části vzorku interpretovány i všechny výsledky, je nutné zde mít síť dostatečně jemnou síť pro dostatečný počet výpočetních uzlových bodů. Naopak části vzorku které nejsou předmětem zájmu a nebude zde ani docházet k žádným deformacím a podobně, bude zde stačit nastavit jednoduchou síť, tak aby nedocházelo ke zbytečnému prodlužování

výpočetní doby. Na obrázku (20) je znázorněno jakým způsobem je síťován celý geometrický model vzorku, v částech modelu které jsou ve tvaru přesných kvádrů program automaticky a vhodně zvolil jednoduché síťování šestibokými prvky. Zbytek modelu, kde se objevují nějaké nepravidelnosti, je síť tvořena čtyřbokými prvky ve tvaru jehlanu. Je zde také vidět jiná jemnost sítě v pracovní části a v okolí otvoru. Okrajové podmínky jsou nastaveny tak aby došlo ke správnému zatížení vzorku tahem a omezení stupňů volnosti. Toho je docíleno velmi jednoduše, na spodní stranu vzorku je nastaven fixní bod a na horní stranu síla, kde jen stačí zadat směr a velikost působené síly. Velikost síly byla určena podle meze úměrnosti vzorků v reálném testu (3000 N).

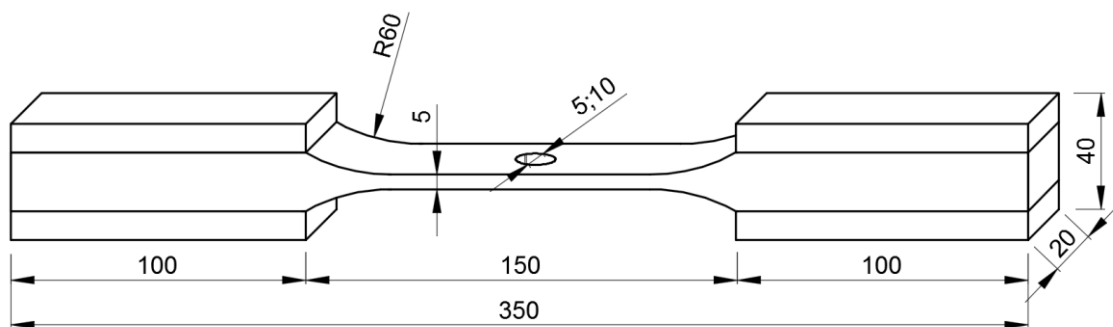
4.5. Výroba vzorků

Vzorky pro zkoušku tahem definuje Československá státní norma ČSN 49 0113. Dále norma uvádí, že letokruhy musí být v podélném směru kolmé s hranou zkušebního vzorku, což je pochopitelné, při větším odklonu by docházelo k porušení smykem. Norma také doporučuje opracovat povrch aby byl hladký, hrany ostré a na sebe kolmé. Rozměry by měli být dodrženy s přesností na 0,5 mm, délka s přesností na 1 mm.



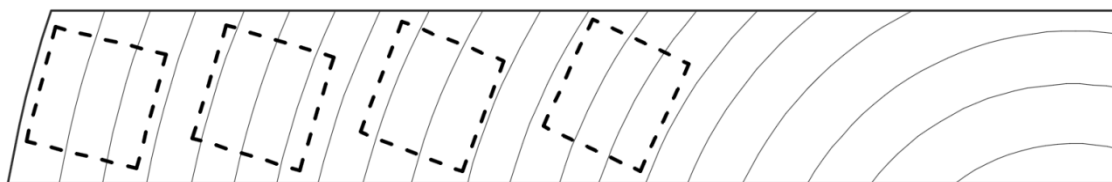
Obrázek 21 - Zkušební vzorek pro tah podle ČSN 49 0113, rozměry v (mm)

Na výkrese viz (Obr. 21) také norma uvádí otvory pro uchycení do zkušebního stroje, po radě od zkušenějších kolegů byl vzorek upraven pro lepší uchycení jiným způsobem. Podle zkušeností dochází k častému nežádoucímu otláčení upínacích čelistí do vzorku. Tomu lze zabránit vytvořením větší plochy v upínací části zkušebního vzorku. Výsledný tvar zkušebního vzorku, včetně otvoru ve středu pracovní části je uveden na obrázku (22).



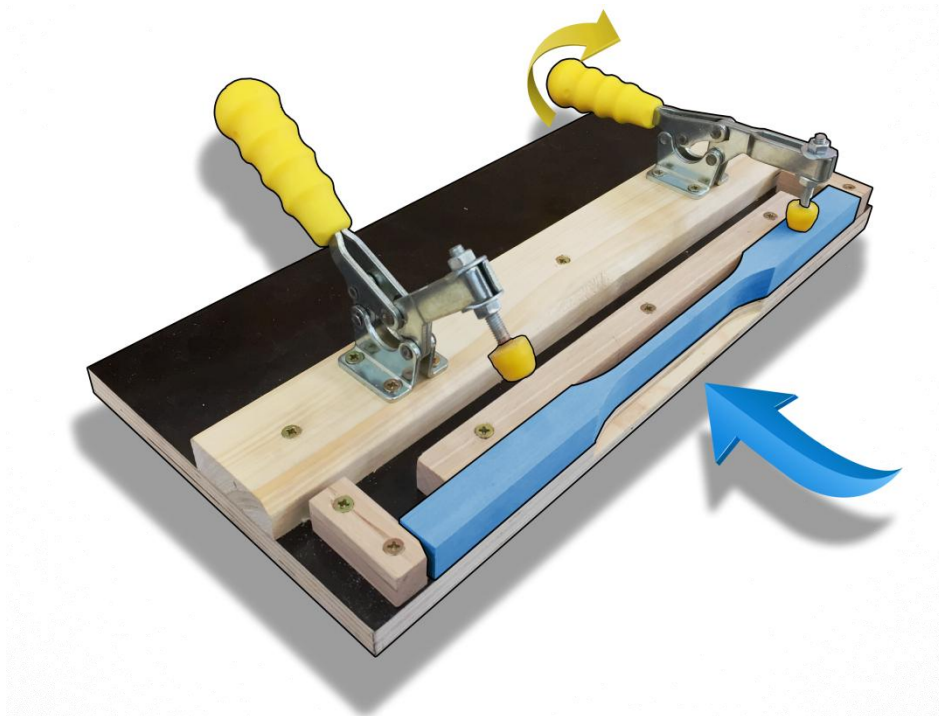
Obrázek 22 - Upravený zkušební vzorek, rozměry v (mm)

S takto navrženým výkresem vzorku s rozšířenou upínací částí je možné se pustit do samotné výroby. Nejprve je potřeba najít vhodný materiál, dřevina byla zvolena smrk. Nutné je se naprosto vyhnout jakýmkoliv vadám ve dřevě, letokruhy na příčném řezu by měly být co možná nejvíce rovné. Anatomický směr dřevních vláken je rovnoběžný s geometrií zkušebního vzorku, jde tedy o speciálně ortotropní tělíska. Poměrně složitým způsobem, viz schéma na obrázku (23) byly vyřezány jednotlivé polotovary z desky.



Obrázek 23 - schéma vyřezání vzorků z desky

Z hlediska přesnosti, bezpečnosti, ale i efektivnosti výroby byly vyrobeny přípravky pro vrtání i frézování. Polotovary, neboli přesně opracovaný a už vyvrtaný hranolek se zasune do přípravku a upevní se dvěma rychloupínacími svěrkami viz (Obr. 24). Na fréze se nastaví doraz a tímto způsobem je zaručena stejná přesnost u všech zkušebních vzorků.



Obrázek 24 - Přípravek pro frézování standardních vzorků na tah

Již v literárním přehledu je uveden zásadní rozdíl v pevnosti v tahu podél vláken a napříč vláken, proto i velmi malý odklon vláken od podélného směru by měl mít velmi zásadní vliv na pevnost i z důvodu, že zde bude působit smykové napětí. V této práci bylo rozhodnuto tento předpoklad ověřit. Dále pro potřebu ověření analytické metody byli vyrobeny i vzorky z PE plastu. V tabulce (5) jsou uvedeny všechny vyrobené vzorky.

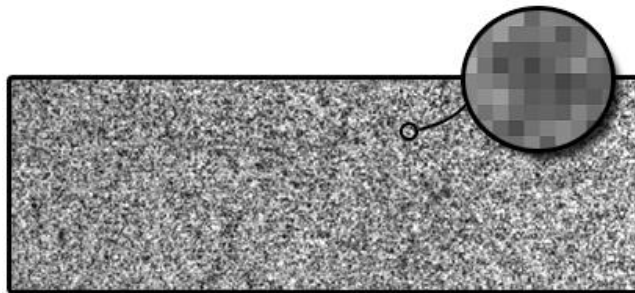
Tabulka 5 - Seznam připravených vzorků

	Počet vzorků	Náhradní vzorky
Bez odklonu s otvorem 5mm	5	2
Bez odklonu s otvorem 10mm	5	2
S odklonem 5° s otvorem 5 mm	5	1
PE Plast	2	0

Vzorky z PE plastu se bez problémů vyráběly stejným způsobem a na stejných obráběcích strojích jako dřevěné vzorky. Dřevěné vzorky byly před testováním dva týdny v klimatizační komoře z důvodu ustálení teploty a vlhkosti.

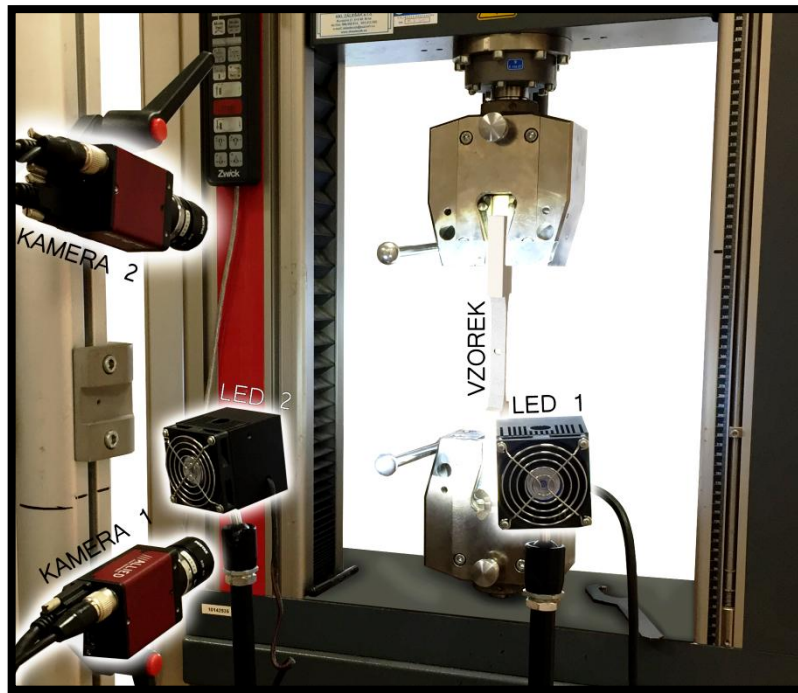
4.6. Příprava a měření

Příprava na měření začala u vzorků, když jsou vytaženy z klimatizační komory. Je na nich potřeba vytvořit unikátní barevný vzorec (pattern), tento pattern stačí nanést pouze na sledovanou část. Začne se nanesením bílé barvy ve spreji, tenkou vrstvou, která ovšem vytvoří souvislou bílou barvu, po zaschnutí se z větší vzdálenosti stříká černá barva ve spreji, která na povrchu vytvoří náhodně velké a náhodně rozmístěné skvrny, viz (Obr. 25)



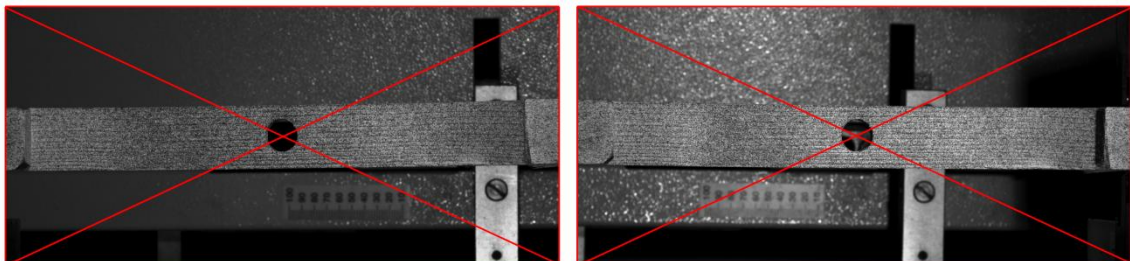
Obrázek 25 - Unikátní pattern

Po nanesení patternu se vzorky uloží zpátky do klimatizační komory a mezitím se připraví měřicí zařízení. Do zkušebního stroje ZWICK byly nainstalovány upínací hlavy pro tahovou zkoušku. Pro systém 3D-DIC je nutné použít dvě kamery a silný zdroj světla, což poskytují dvě vzduchem chlazené LED lampy. Kamery a lampy jsou namontovány na stativy, což umožňuje nastavení pozice kamer a lamp, stativy také zaručují pevné uložení a zabraňují nežádoucímu pohybu v průběhu záznamu. Stereo systém kamer je vzhledem k geometrickému tvaru vzorků uložen vertikálně viz (Obr. 26).



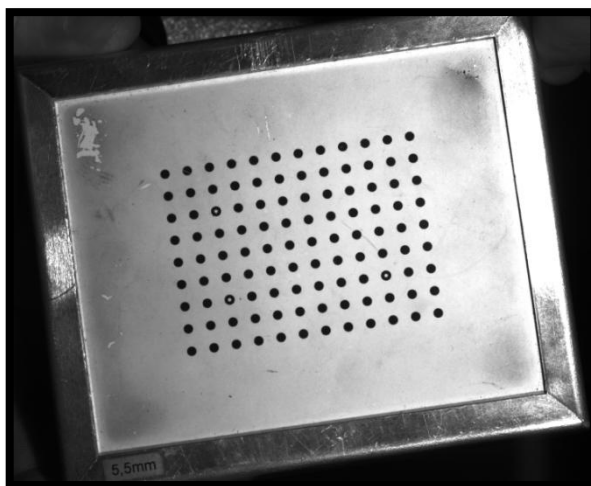
Obrázek 26 - Instalace DIC

Kamery se na stativech jednotlivě nastaví tak, aby obě směřovaly co nejvíce na střed zkoumané části vzorku viz (Obr. 27). Dále se nastaví optimální světelné podmínky pomocí lamp, ale i jas, manuálně otevřením nebo uzavřením clony v objektivu a také softwarově.



Obrázek 27 - Vycentrování kamer

Aby bylo možné počítat výsledky ve třech směrech (x,y,z) a využít tak stereo kamery, je potřeba software pro tuto funkci kalibrovat. Tato kalibrace se provádí pomocí kalibrační destičky. Destička na (Obr. 28) konkrétně s roztečí bodu 5,5 mm má v ploše rozmístěné pole černých bodů, z nichž jsou tři odlišné. Destička se před kamerami vždy nakloní, pootočí a udělá se snímek z obou kamer, tímto způsobem se vytvoří série snímků. V software Vic-3D se tyto snímky analyzují, program porovnává snímky z obou kamer a zjišťuje jak jsou vůči sobě kamery vzdáleny a otočeny. Po této kalibraci se s kamerami už nesmí manipulovat bez dalšího kalibrování.



Obrázek 28 - Kalibrační destička

Po těchto úkonech je možné začít se samotným měřením vzorků. Pro první pokus byl využit jeden z náhradních vzorků. Samotný vzorek se nejdříve číselně označí, změří a zváží. Univerzální zkušební stroj ZWICK 050 se aretuje a vzorek se zajistí do upínacích čelistí. Ve stejnou chvíli se zapne zatížení i záznam kamer. Poté co vzorek dosáhne své meze pevnosti a je přetržen, je měření ukončeno a stejný postup se opakuje u dalších vzorků. Seznam použité techniky viz (Tab. 6).

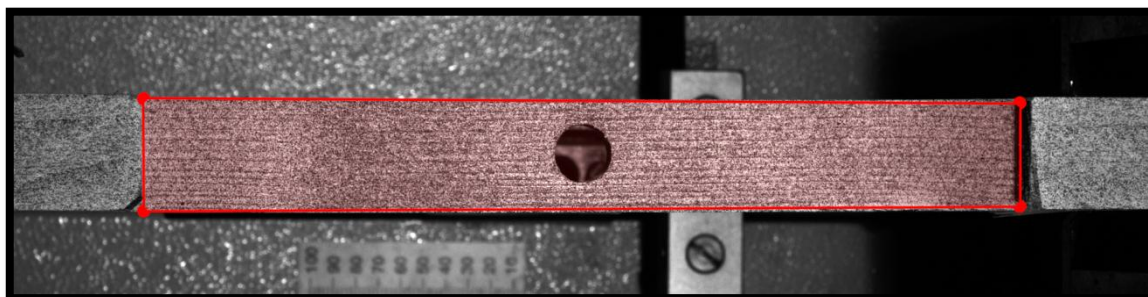
Tabulka 6 - Seznam techniky pro DIC

Kamery	2x CCD AVT 5Mpx Firewire, C-mount
Objektivy	2x Schneider Xenoplan 2.8/50mm Compact, 2x Pentax 25mm Fix focal lens
Stativy	Flood light tripod, Manfrotto Nano, stativ na kamery Manfrotto Tripod 055XPROB
Kalibrační terč	5,5mm
Software	Vic-Snap pro akvizici snímků, Vic-3D pro analýzu posuvů a deformací ve 3D
Počítač	INTEL Core i5, 3,3 GHz, 8GB RAM, Windows 7 Home Premium 64-bit

4.7. Vyhodnocení DIC

Po úspěšném odměření všech vzorků jsou získány snímky z kamer ve formátu (*.TIF) a z měřicího zařízení pracovní diagramy v textovém souboru. Data z textových souborů jsou převedeny do Excelu, kde jsou zjišťovány meze pevnosti a meze úměrnosti. Snímky z kamer jsou analyzovány v programu (VIC 3D). Do tohoto programu je potřeba nejprve načíst kalibrační soubor, poté se načte série snímků z obou kamer z jednoho měření. Dále je potřeba zadat velikost podmnožiny (Subset) a velikost

kroku (step size), na doporučení vedoucího práce byla zvolena velikost podmnožiny 31 pixelů a velikost kroku 4 pixely. Aby nedocházelo ke zbytečně dlouhé době výpočtu a ke špatným výsledkům, je třeba v programu manuálně označit pracovní část vzorku, která bude analyzována. To se provede na prvním snímku v sérii, viz (Obr. 29).



Obrázek 29 - Označení pracovní části

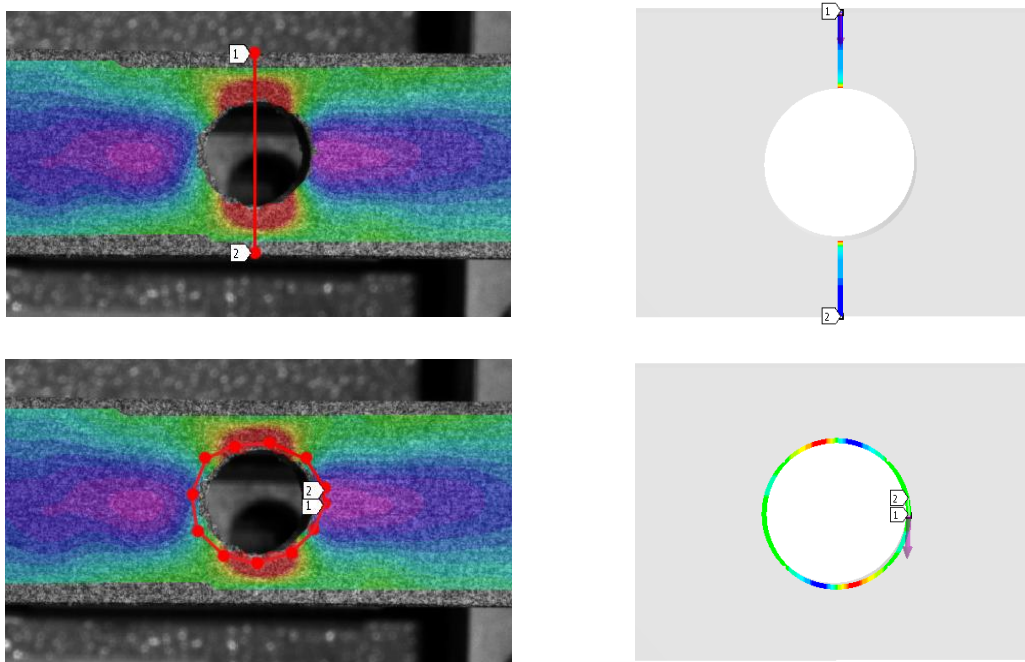
Nyní už stačí nechat všechny snímky analyzovat, program postupně zjišťuje posunutí pixelů a toto posunutí graficky vykreslí na každém snímku. Výpočet trvá zhruba 5 minut, poté je možno zobrazit celkové deformace ve třech směrech, poměrné deformace ve třech směrech a smykové deformace ve třech rovinách. Nejdůležitější jsou snímky, kde dochází k největším deformacím, v tomto případě především smykové deformace v podélné rovině a deformace v podélném směru. Výstupem z programu je především barevná, grafická interpretace deformací, u každého snímku je uvedena i stupnice. Dále je možné zjistit deformaci v bodě nebo na přímce a následně je vykreslit v grafu.

4.8. Verifikace a srovnání výsledků

V této fázi jsou vyhodnoceny výsledky počítačovou simulací metodou konečných prvků a výsledky reálného testu metodou digitální korelace obrazu, cílem této práce je srovnání těchto dvou metod. Hlavním nástrojem srovnání bude především optická metoda, grafických výstupů, kdy se porovná lokalita a rozsah poměrné deformace na zkoumané ploše vzorků a také naměřená data deformací na pomyslné přímce vzorku a v okolí otvoru.

Aby výsledné hodnoty bylo možno porovnávat, musí v obou ze zkoumaných metod působit na vzorek stejná síla. Ta je určena z pracovních diagramů reálného testu, síla je taková, aby v žádném ze vzorků nedošlo k plastické deformaci, tedy hodnota síly

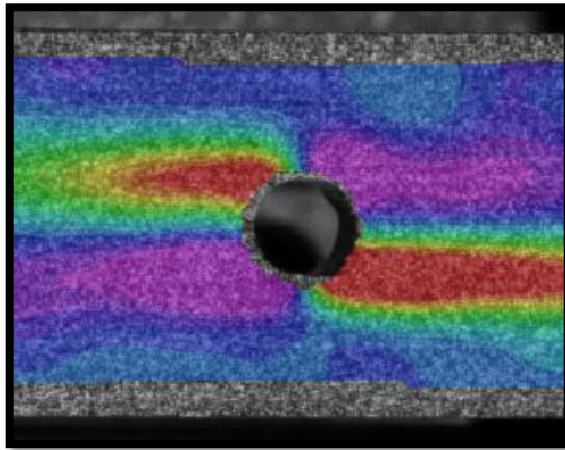
pod mezí úměrnosti. Konkrétně zde byla síla určena na hodnotu 3000N. Tato síla je zadána do okrajových podmínek v software Ansys a při analýze DIC je třeba najít snímek, který odpovídá této síle. Je známo, že tyto konkrétní kamery nahrávaly frekvencí čtyři snímky za sekundu, z dat pracovního diagramu se určí v jakém čase bylo u konkrétního vzorku dosaženo síly právě 3000N, čas v sekundách se vynásobí čtyřmi a tím se zjistí číslo hledaného snímku. Hodnoty deformace na tomto snímku je možno srovnat se simulací MKP



Obrázek 30 - Metody zjišťování deformací

Obrázek (30) popisuje možnosti zjišťování hodnot deformací. V obou z metod je možné vytvořit přímku vedoucí od místa A do místa B a na přímce zvolit počet bodů pro které budou zjištěny hodnoty deformace, z těchto hodnot je pak možné vytvořit grafy a ty mezi sebou porovnat, jak už trend křivky, tak i hodnoty, které by měli být podobné. Další možností v obrázku níže, je proložení křivky v okolí otvoru, stejnou metodu použil v experimentu i Smith (1956) viz (Obr. 16; 17). V programu Ansys je možnost vložit zkoumanou přímku na hranu, zvolena byla tedy hrana otvoru, u vyhodnocení metody DIC je to složitější a méně přesné, program nedovoluje nastavit jiný tvar než je křivka tvořená z přímek, výsledný tvar zkoumané křivky je možno vidět na Obrázku (30) vlevo, dole.

Dalším problémem přesného porovnání je už v literárním přehledu zmíněný *aperture problem*, jednoduše, pixely na okraji vzorku nemají další sousedící pixely a tak deformaci není možné vyřešit, tento problém je viditelný na obrázku (31). Teorie i výsledky nasvědčují tomu, že se maximální napětí i deformace nachází na hraně otvoru a s přibývajícím vzdáleností od otvoru se napětí exponenciálně snižuje. Pokud není deformace z DIC vypočítána na úplném okraji otvoru není tak možné porovnávat maximální poměrnou deformaci s metodou konečných prvků.



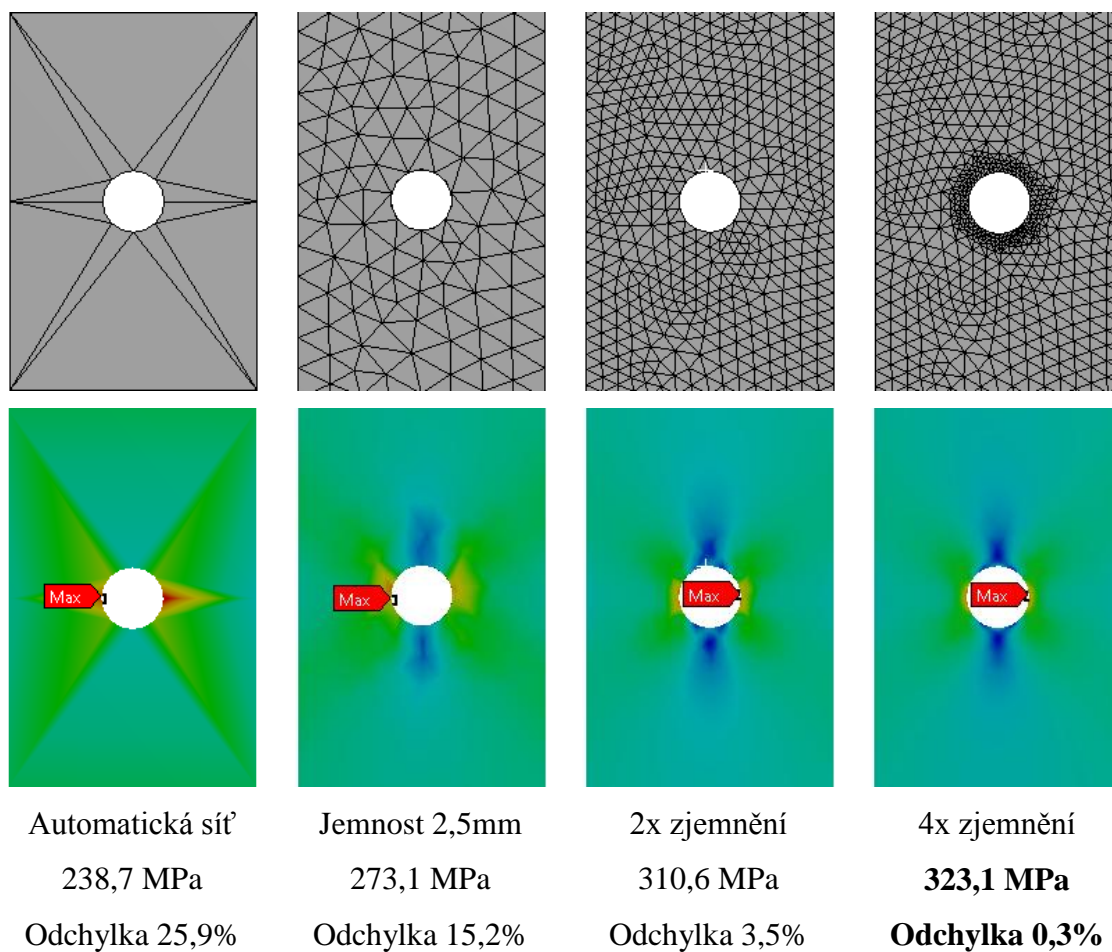
Obrázek 31 - Aperture problem

Pokud naměřené deformace v reálném testu mají stejný trend, a podobné hodnoty jako model v simulaci metodou konečných prvků, dá se říct, že je model zadán správně a je tak verifikován. Takto nastavený model je pak možné aplikovat pro další zkoušky.

5. VÝSLEDKY A DISKUSE

Před samotným výpočtem konkrétních výsledků metodou konečných prvků je potřeba provést jednoduchou citlivostní analýzu hustoty sítě metodou která je popsána v kapitole metodika. Na Obrázku (32) je možno vidět, jakou má hustota sítě vliv na napětí v modelu, v tomto případě téměř třetinový rozdíl ve výsledcích. Požadované hodnoty maximálního napětí bylo dosaženo postupným zjemňováním sítě, kdy ve výsledné podobě sítě je samostatně zjemněna síť v okolí otvoru. Výsledná hodnota maximálního napětí je jen o 1,1 MPa větší než bylo vypočteno analyticky, což představuje relativní odchylku pouze 0,34 %. Dále je na obrázcích vidět jakou má jemnost sítě vliv na grafickou interpretaci výsledků. Tím, že je počítáno více uzlových bodů v oblastech, kde je potřeba, jsou výsledky výrazně lepší. Tyto výsledky slouží pro účely přesného nastavení sítě.

Vypočítané vzorové maximální napětí při $F=10000$ je 322 MPa



Obrázek 32 - analýza hustoty sítě

Pro ověření analytické metody výpočtu a srovnání isotropního a ortotropního materiálu byl vyroben a otestován vzorek z polyethylen plastu. Při analytickém výpočtu se postupuje následovně, nejprve je třeba vypočítat konstantu faktoru koncentrace napětí, dále se vypočítá jmenovité napětí, vynásobením faktoru koncentrace napětí a jmenovitého napětí získáme maximální napětí, které se pak dále srovná s numerickým modelem, v tomto numerickém modelu se zjistí poměrné deformace, které se dále srovnají s reálným experimentem pomocí metody digitální korelace obrazu. Příklad použití rovnice pro výpočet maximálního napětí u modelu s velkým otvorem, viz Vzorec 3.

$$K_t = 3 - 3,14 \left(\frac{d}{D}\right) + 3,667 \left(\frac{d}{D}\right)^2 - 1,527 \left(\frac{d}{D}\right)^3$$

$$K_t = 3 - 3,14 \left(\frac{10}{20}\right) + 3,667 \left(\frac{10}{20}\right)^2 - 1,527 \left(\frac{10}{20}\right)^3$$

$$K_t = 2,16$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{(D - d)t}$$

$$\sigma_{nom} = \frac{3000}{(20 - 10)5}$$

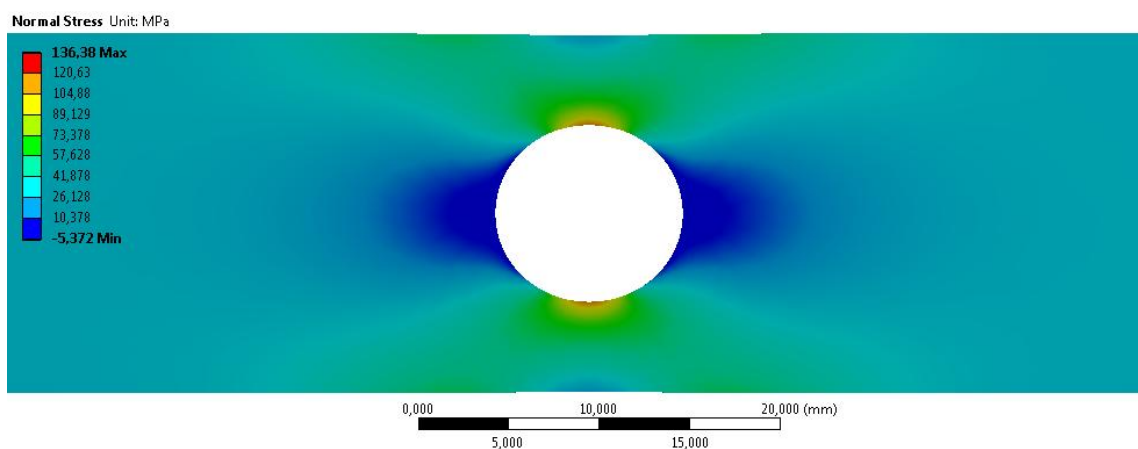
$$\sigma_{nom} = 60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} K_t$$

$$\sigma_{max} = 129,35 \text{ MPa}$$

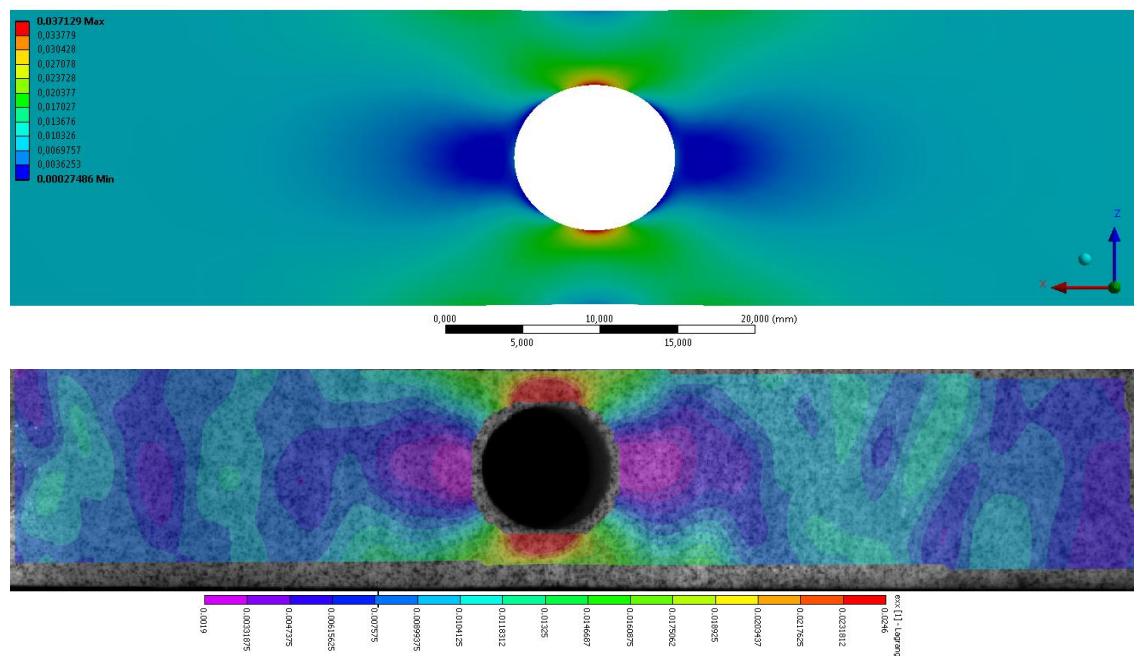
K_t = Koncentrace napětí
 d = Průměr otvoru
 D = Šířka vzorku
 σ_{nom} = Jmenovité napětí
 t = Tloušťka vzorku
 P = Síla
 σ_{max} = Maximální napětí

Vzorec 3 - Výpočet maximálního napětí analyticky



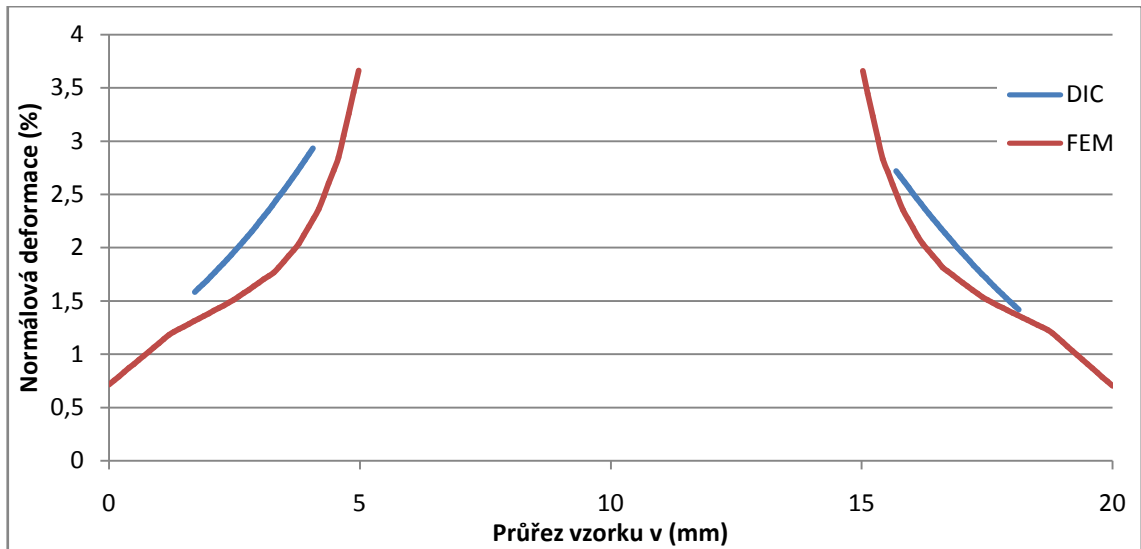
Obrázek 33 - Výpočet maximálního napětí metodou konečných prvků při $F=3000N$

Takto jednoduše lze vypočítat hodnotu maximálního napětí isotropního materiálu s otvorem v tahu. PU plastový model se stejnou charakteristikou byl otestován metodou konečných prvků a při správně nastavené geometrické síti se hodnota maximální deformace shoduje s analyticky vypočítanou, s relativní odchylkou pouhých 5,4%, maximální hodnota napětí, viz (Obr. 33). V případě modelu s malým otvorem při stejných podmínkách je odchylka 8,1%. Nyní je možné srovnat numerický model s experimentem, konkrétně hodnoty a trend deformací, pokud budou srovnatelné, je tak ověřena správnost analytického výpočtu a nadále ji bude možné použít bez další verifikace na jednoduché příklady s otvorem s isotropním materiálem jako v tomto případě PE plast.



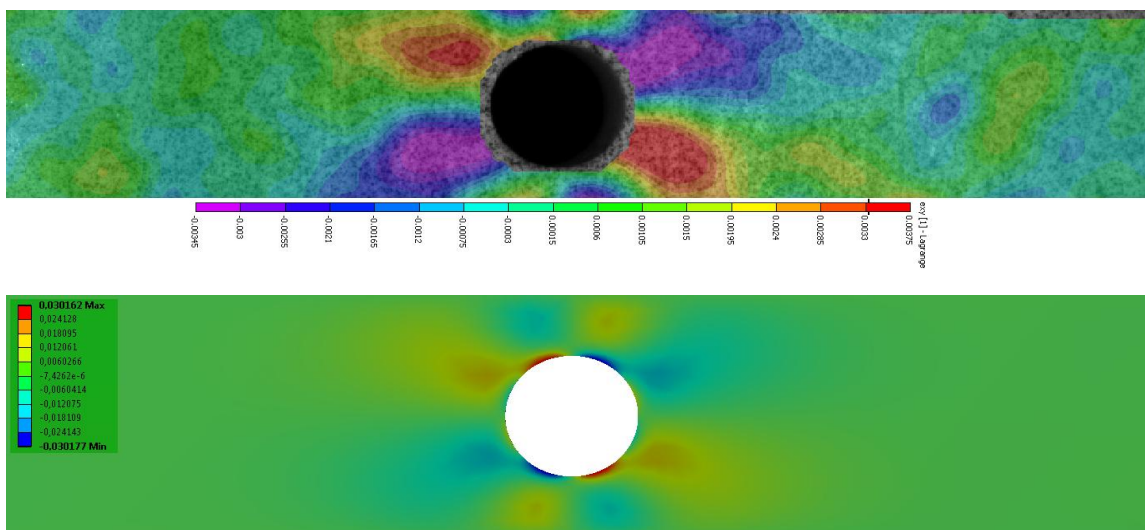
Obrázek 34 - Srovnání normálové deformace DIC; MKP při $F=3000N$

Na obrázku (34) je vidět srovnání deformací v podélném směru obou metod, deformace zjištěné metodou DIC jsou velmi symetrické, je tak poznat, že je vzorek skutečně homogenní a izotropní. Maximální, červeně zbarvená deformace značí největší protažení materiálu, naopak modrá a fialová barva značí téměř nulovou deformaci. Snímky obou metod mají stejný trend deformací a hodnoty se taktéž, alespoň řádově shodují. Jelikož je maximální deformace na úplném okraji otvoru, kde metoda DIC nedokáže dopočítat všechny pixely, maximální hodnoty se tak nedají přesně srovnávat. V takovém případě je lepší proložit zkoumanou část přímkou a srovnávat hodnoty na této přímce viz (Obr. 35), i zde jsou hodnoty i trend velmi podobné.



Obrázek 35 - Srovnání hodnot deformace v podélném směru při $F=3000N$

Při porovnání smykových deformací se zde objevuje zásadní změna oproti smrkovým vzorkům. U plastového vzorku je dominantní normálová deformace a smyková je menší, proto i výsledná tvar porušení vychází z velké normálové deformace v podélném směru. Zatímco u numerického modelu je maximální deformace normálová větší jen zhruba o jednu pětinu, u experimentu je rozdíl až deseti násobný. Tato neshoda by se dala opět přisuzovat nedopočítaným pixelům metodou DIC v místech největších deformací. Srovnání výsledků smykové deformace viz (Obr. 36), Trend a rozložení smykových deformací se u jednotlivých metod shoduje. Numerický model byl tedy verifikován.

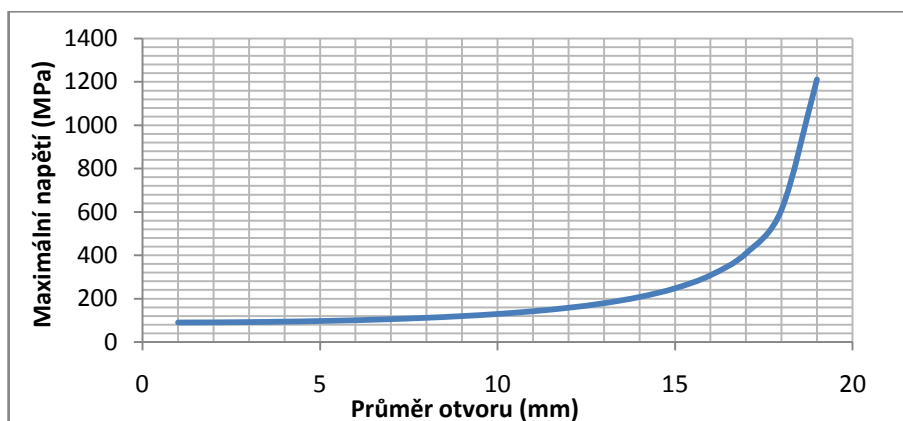


Obrázek 36 - Grafické srovnání smykové deformace při $F=3000N$

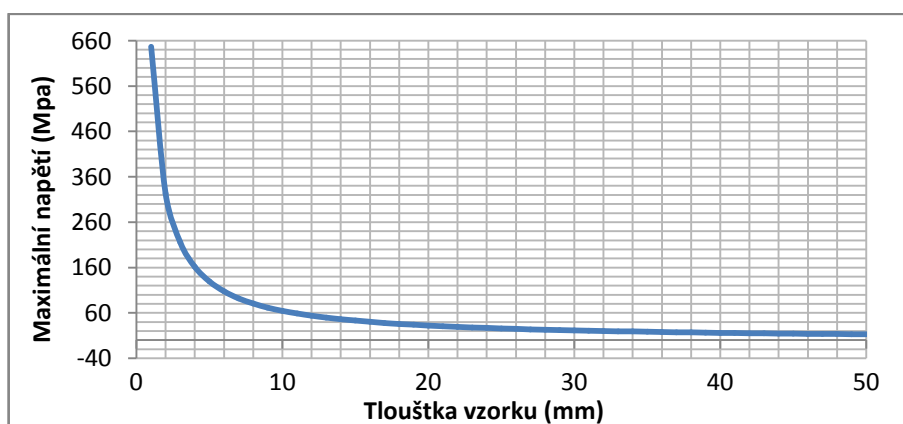


Obrázek 37 - typické porušení vzorku

Jak už bylo zmiňováno u plastového vzorku byli větší normálové deformace v podélném směru a bylo by tomu tak u všech isotropních materiálů. Je to způsobeno absencí jakékoliv vnitřní struktury materiálu. Vzorek se jednoduše poruší v místě nejmenšího průřezu. Vzorek se deformoval do doby překročení meze úměrnosti a poté došlo ke křehkému lomu, přímo u prostřed. Stejným způsobem došlo k porušení i vzorku s menším otvorem. Srovnání všech vzorků je uvedeno v kapitole (5.4 Shrnutí a srovnání výsledků). V tomto případě se podařilo ověřit správnost analytického výpočtu izotropního materiálu pomocí numerického modelu a správnost modelu byla ověřena reálným experimentem, pro to je možné jednoduše analyticky zjišťovat další závislosti viz (Obr. 38; 39)

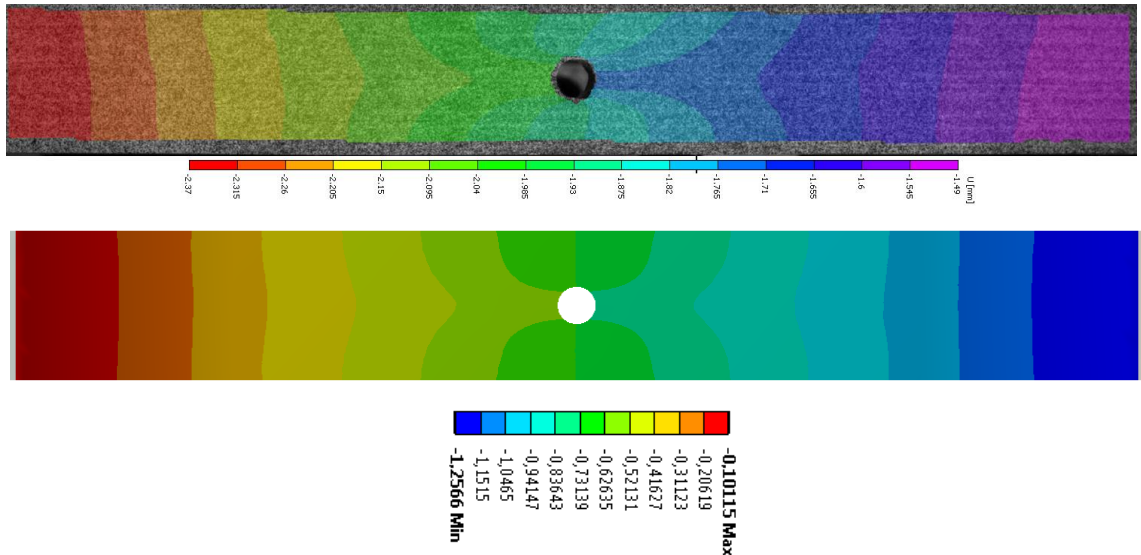


Obrázek 38 - Vliv průměru otvoru na napětí (při konstantní tloušťce 5mm)



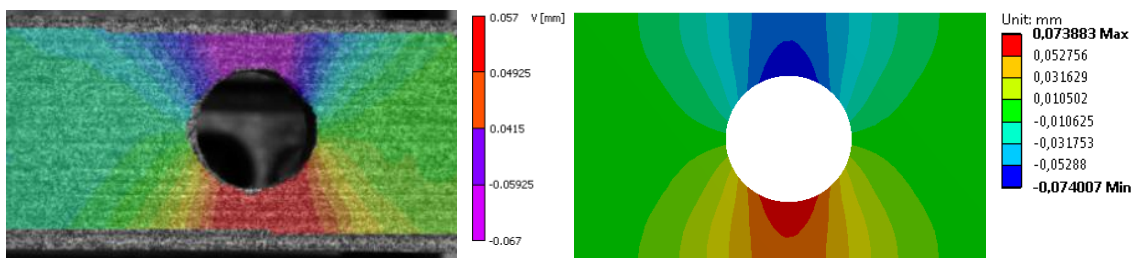
Obrázek 39 - Vliv tloušťky vzorku na napětí (při průměru otvoru 10mm)

V této práci bylo především provedeno několik zkoušek smrkových vzorků. Nejprve byly srovnány výsledky celkového posunutí, aby bylo možné obecně verifikovat výsledky před dalšími testy a vyvarovat se tak práci navíc.



Obrázek 40 - Celkové posunutí v podélném směru při $F=3000N$

Výsledky posunutí na stupnici nejsou srovnatelné, jelikož se většinou vzorek v upínacích čelistech o zhruba jeden milimetr v podélném směru pohne. Ovšem ve směru kolmo na osu zatížení by hodnoty posunutí měly být podobné.

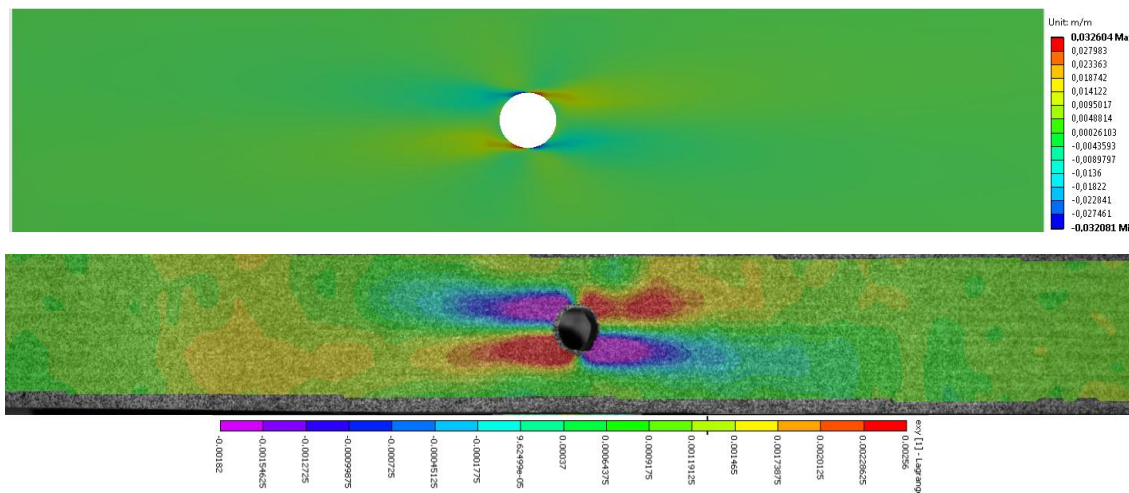


Obrázek 41 - Celkové posunutí ve směru kolmo na osu zatížení při $F=3000N$

Na Obrázku (41) je možné vidět typický jev tahové zkoušky, pokud u vzorku dojde k podélnému prodloužení, musí dojít i k příčnému zúžení (Poissonův efekt) a to je viditelné v prostřední části vzorku, kde je navíc oslabení v podobě otvoru, to bylo ověřeno simulací na modelu i reálným experimentem. Hodnoty posunutí v tomto směru jsou u obou metod řádově stejné, u simulace jsou čísla o pár setin milimetru větší a je to nejspíš způsobeno tím, že opět je největší posunutí na okraji otvoru, kde metoda DIC nedopočítá všechny pixely až k okraji. Každopádně se dá říct, že byl model úspěšně verifikován a trend a hodnoty získané simulací jsou srovnatelné s experimentem.

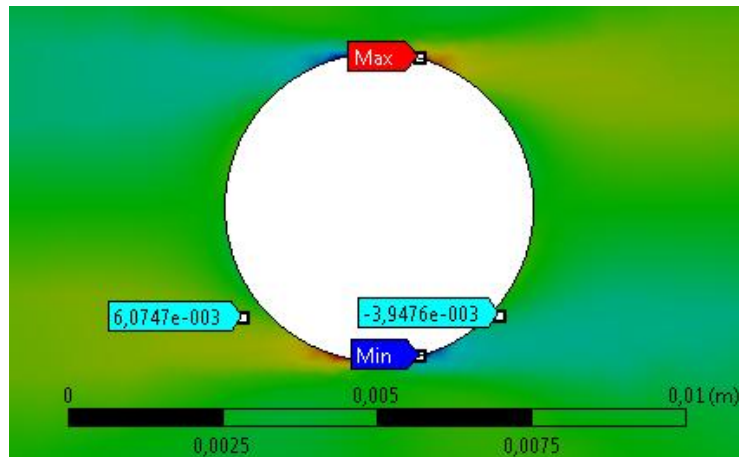
5.1. Výsledky vzorků s otvorem 5 mm

Pro tyto účely bylo otestováno 6 standardních vzorků na tah s otvorem o průměru 5 mm. Ze všech vzorků v této skupině byl vybrán jeden referenční obrázek pro srovnání s metodou konečných prvků, výsledky ostatních vzorků jsou uvedeny v příloze.



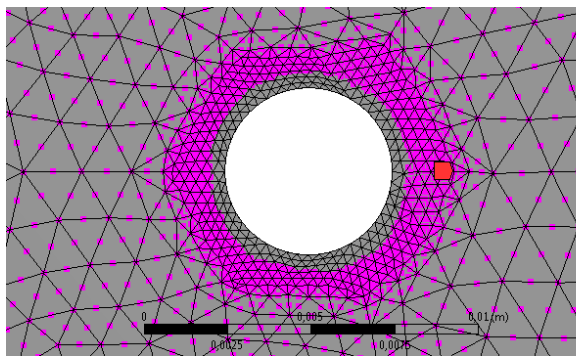
Obrázek 42 - Poměrná deformace ve smyku MKP; DIC při $F=3000N$

Na Obrázku (42) je vidět zásadní snímek obou metod, je to poměrná deformace ve smyku, tato deformace je ze všech největší a jelikož smyková deformace vede ke vzniku smykové trhliny a porušení meze pevnosti, je tento obrázek velmi důležitý. Na obrázku je vidět jak maximální deformace tvoří pomyslné písmeno X, kdy na jedné straně je deformace vždy o něco větší a právě zde se začíná šířit trhlina a následně porušení. Jsou zde uvedeny opět i stupnice maximální deformace, na simulaci byla změřena maximální smyková deformace kolem 3,2%, zatímco metodou DIC byla zjištěna průměrná maximální poměrná deformace u vzorků s otvorem 5mm jen, 0,35%, což je téměř desetinásobný rozdíl, je to opět způsobeno tím, že metoda DIC nedopočítá všechny pixely až k okraji otvoru, kde je tato deformace největší. Pokud jsou na model v software Ansys umístěny body (Probe), které zjistí deformaci, na místě je u metody DIC maximální napětí viz (Obr. 43), jsou zde alespoň řádově stejné hodnoty deformace.

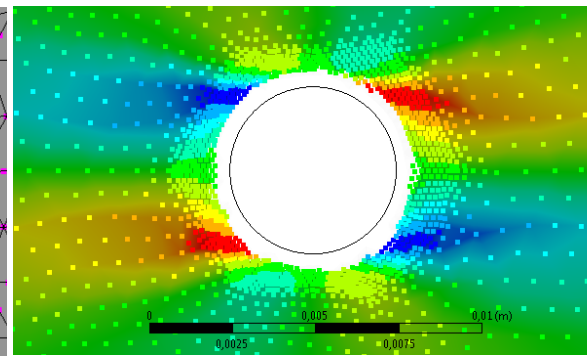


Obrázek 43 - Lokální hodnoty deformace (m/m) při $F=3000N$

Problém se netýká pouze hodnot ale také grafiky, pokud je zde na okraji násobně větší hodnota deformace na velmi malé ploše v poměru se zbytkem zkoumané plochy, ostatní menší deformace nejsou viditelné vůbec, nebo jsou zobrazeny velmi nevýraznou barvou. Pro lepší grafické porovnání těchto metod jsou manuálně vybrány všechny uzlové body ve zkoumané ploše kromě dvou vrstev sítě kolem otvoru, viz (Obr. 44; 45). Výsledkem je, že i původně menší deformace jsou zde zobrazeny jako maximální, když ve výběru není lokální extrémní deformace na hraně otvoru.

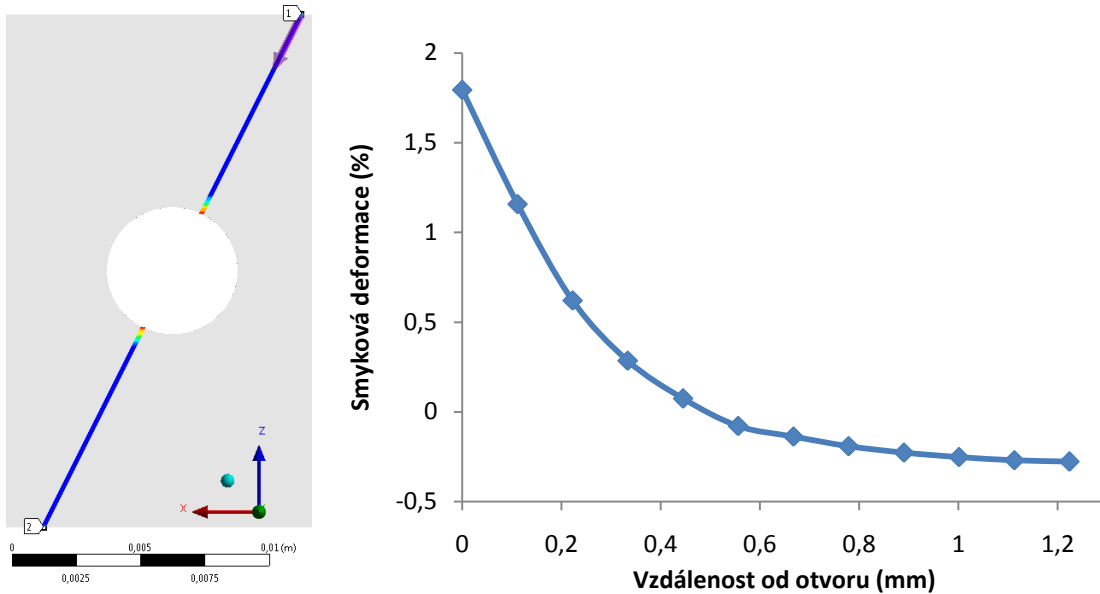


Obrázek 44 - vybrané uzlové body



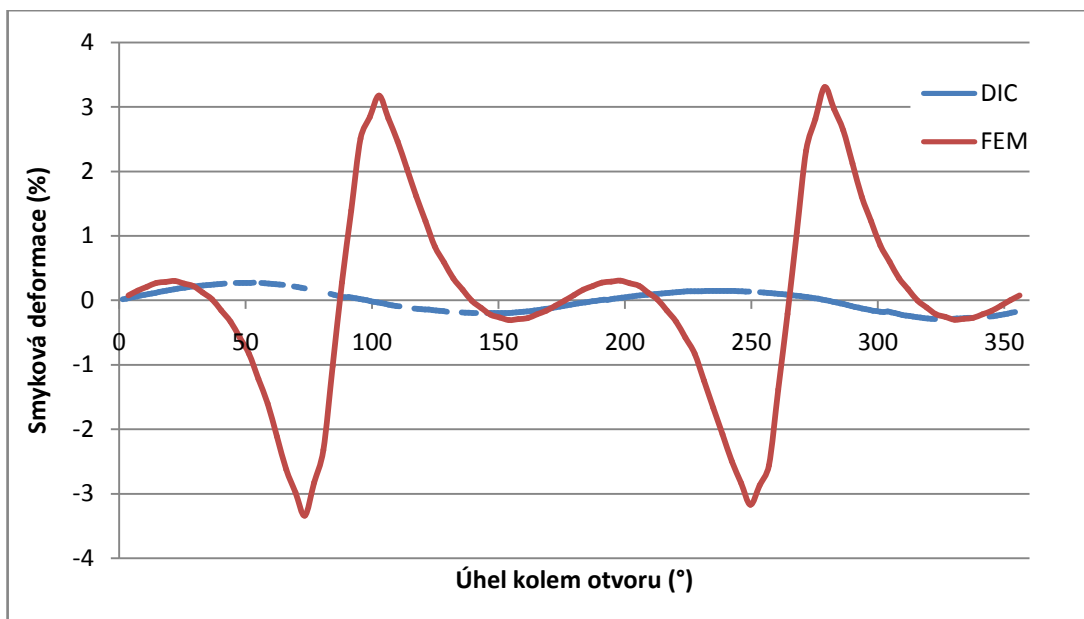
Obrázek 45 - výpočet uzlových bodů

Pro lepší znázornění, jaký je vliv vzdálenosti od okraje otvoru na maximální smykovou deformaci, byl vytvořen jednoduchý test na numerickém modelu, který na grafu viz (Obr. 46) ukazuje významnost vzdálenosti od otvoru.



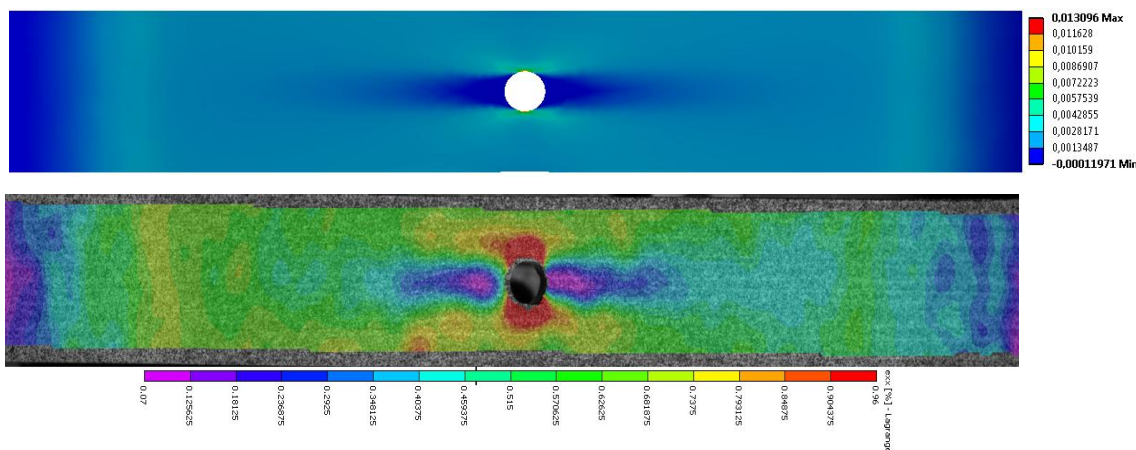
Obrázek 46 - Vliv vzdálenosti od otvoru na smykovou deformaci při $F=3000N$

Jak je viditelné na grafu viz (Obr. 46), stačí deformace zjišťovat jen několik desetin milimetru od okraje otvoru a hodnoty smykové deformace jsou několika násobně menší, proto metodou DIC nelze zjistit přesné maximální hodnoty, což je možné vidět i na grafu viz (Obr. 47). Zde jsou zobrazeny smykové deformace ve 360 stupních kolem otvoru, způsobem jaký je uveden v metodice viz (Obr. 16). Z těchto výsledků vyplývá, že je možné metodami srovnat trend, rozsah a lokalitu smykové deformace a hodnoty deformace v jednotlivých bodech, nikoliv však maximální hodnoty deformace, které jsou výrazně závislé na vzdálenosti od otvoru respektive na vzdálenosti dopočítané plochy od otvoru. Tento problém se týká všech vzorků.



Obrázek 47 - smykové napětí kolem otvoru při $F=3000N$

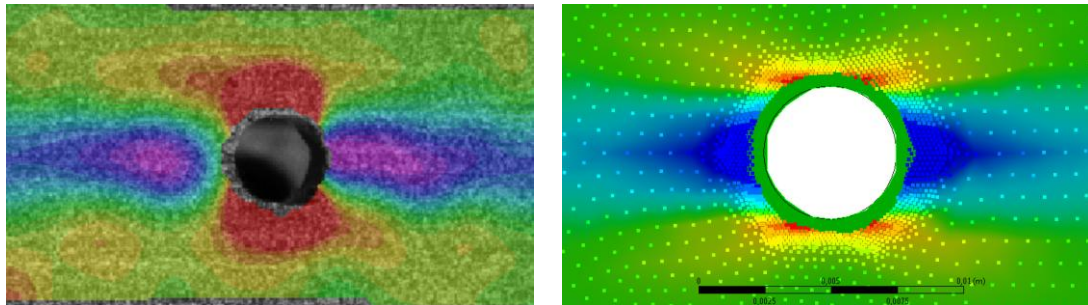
Dalším způsobem srovnání hodnot jednotlivých metod je zjištění deformací v podélném směru na přímce vedené přes otvor, kolmo k podélnému směru. Hodnoty této deformace jsou menší než smykové, tudíž nezpůsobí porušení vzorku. Přesto jsou důležitým ukazatelem, znázorňujícím tahovou deformaci, slouží také jako další varianta srovnání hodnot obou metod, která by měla být přesnější.



Obrázek 48 - Poměrná deformace v podélném směru MKP; DIC při $F=3000N$

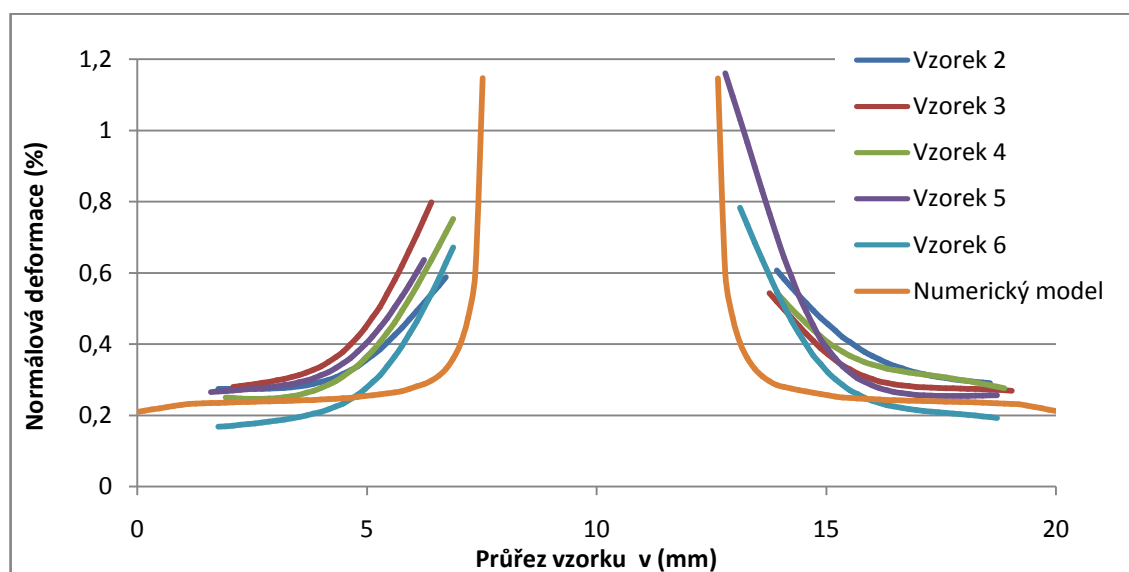
Na obrázku (48) je možno vidět srovnání dvou metod, tentokrát deformace v podélném směru, nebo-li tahové deformace. Trend deformace je srovnatelný, je vidět maximální napětí u otvoru v ose kolmé k podélnému směru, kde dochází k největšímu protažení, naopak u otvoru v podélném směru je deformace téměř nulová. Díky otvoru zde nedochází k přenášení tahového zatížení.

Jelikož i deformace v podélném směru má své maximální hodnoty na úplném okraji otvoru, pro lepší grafické srovnání je zde vhodné si opět vybrat uzlové body, které nejsou přímo na hraně otvoru, viz (Obr. 49).



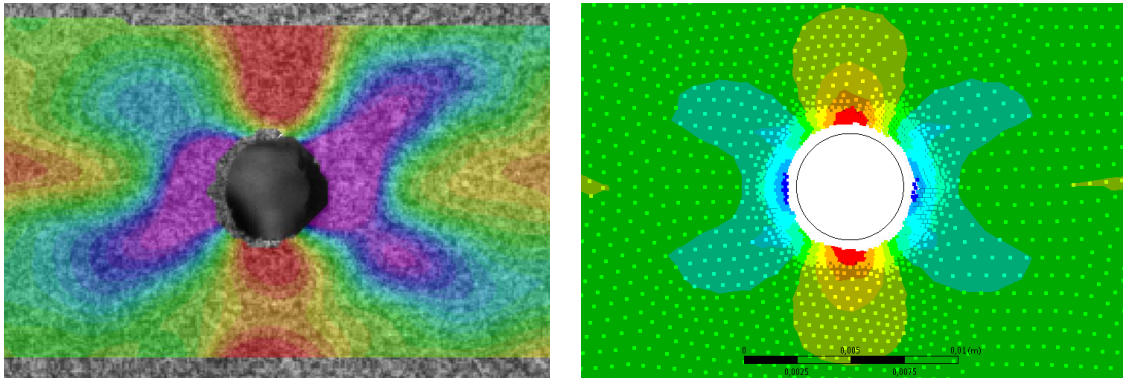
Obrázek 49 - Grafické srovnání deformace v podélném směru při $F=3000N$

V podélném směru je také možno poměrně snadno a přesně srovnat hodnoty deformace. Vynesemím přímky, jak je uvedeno v metodice na obrázku (30), jsou získány hodnoty deformací v několika bodech pro jednotlivé vzorky, tyto hodnoty jsou vyneseny na graf viz (Obr. 50) společně s hodnotami na stejném místě v numerickém modelu. Nejenže trend křivky a hodnoty jsou mezi vzorky velmi podobné, ale především se poměrně přesně shodují i s numerickým modelem. V reálném experimentu je narůstající trend křivky deformace mírně pozvolnější než je tomu u modelu. Je to způsobeno anatomickou stavbou dřeva, to, že se hodnoty shodují, značí o perfektním materiálovém modelu a síťování, numerický model ale není zatížen anatomickou strukturou, která pravděpodobně způsobuje tento pozvolnější nárůst deformace.



Obrázek 50 - Srovnání deformace v podélném směru při $F=3000N$

Jako další důkaz shody těchto dvou metod je možné, zde jen okrajově uvést i deformace ve směru kolmém k ose zatížení, tedy poměrné zúžení vzorku. Tato deformace není tak podstatná, maximální hodnoty dosahují jen několik desetin procent. Pro srovnání metod je však vhodné ji zde uvést. Jak je vidět na obrázku (51), shoduje se grafická interpretace a maximální deformace, jsou v obou případech pouze kolem 0,4%.



Obrázek 51 - Grafické srovnání deformace ve směru kolmém na osu zatížení při $F=3000N$

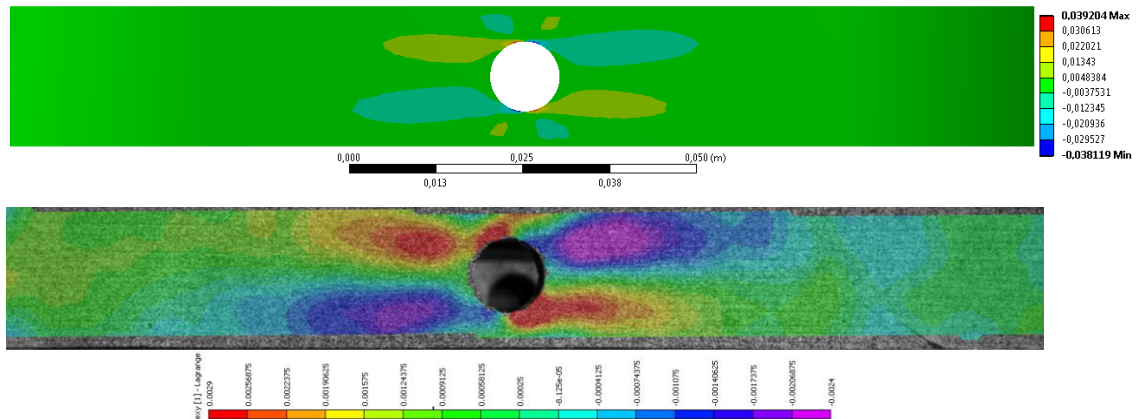
Na snímku viz (Obr. 52) je vidět typické porušení u vzorku s malým otvorem, bez odklonu. Porušení způsobené především smykem a na koncích smykové trhliny, vláknitý lom způsobený tahem. Zjištěné smykové deformace jsou při síle na konci elastické části pracovního diagramu téměř trojnásobné oproti normálovým deformacím.



Obrázek 52 - typické porušení vzorku

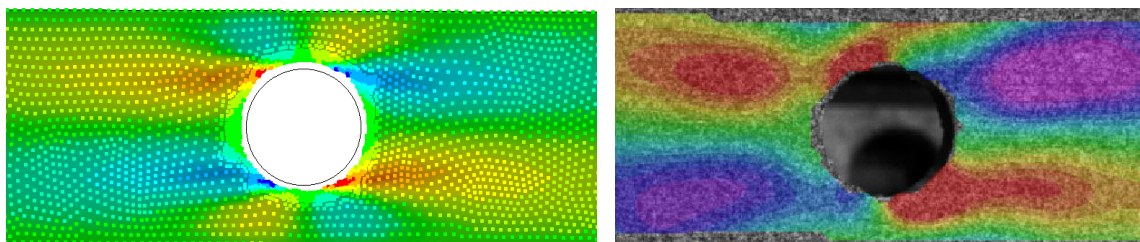
5.2. Výsledky vzorků s otvorem 10 mm

Vzorky s větším otvorem, konkrétně 10 mm jsou vyrobeny a zkoušeny stejným způsobem jako vzorky s menším otvorem v předchozí kapitole. Předpokladem těchto vzorků je menší pevnost, kvůli méně materiálu a menšímu počtu dřevních vláken v podélném směru, které přenáší největší zatížení. Největší hodnoty deformace jsou opět ve smyku v podélné rovině. Grafické znázornění smykové deformace viz (Obr. 53).



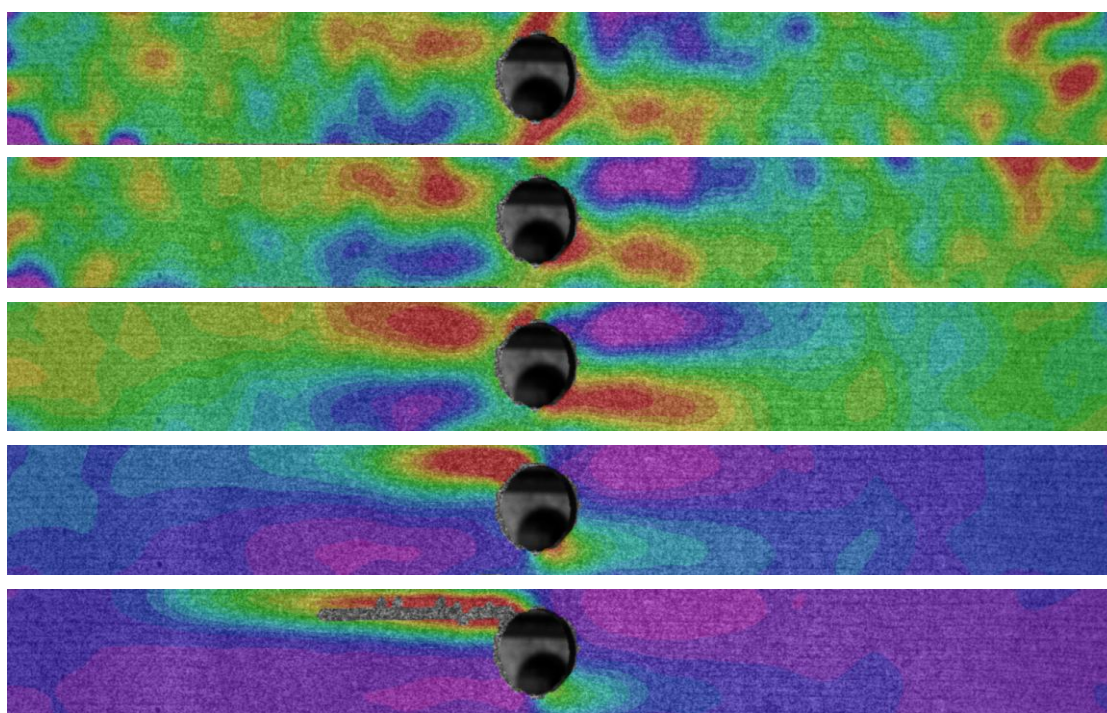
Obrázek 53 - Poměrná deformace ve smyku FEM;DIC při $F=3000N$

Z obrázku je patrné, že distribuce deformací v numerickém modelu odpovídá experimentu, v obrázku z DIC je vidět nepatrně větší nesymetrie deformací, než tomu bylo u vzorku s menším otvorem. Je to způsobeno tím, že menší průřezová plocha vzorku, která musí přenášet zatížení, je více ovlivněna anatomickou stavbou dřeva. To znamená, že i menší nesymetrie ve stavbě dřeva ovlivní výsledný tvar a rozložení deformací. Jak už bylo zmiňováno, hodnoty maximální deformace nelze přímo porovnávat, každopádně průměrná hodnota maximální deformace u vzorků s velkým otvorem při síle 3000N je 0,48% opět je to téměř desetinásobek toho co bylo zjištěno simulací na numerickém modelu. Důvody této neshody jsou uvedeny v předchozí kapitole. Pro lepší grafické porovnání byl vytvořen test uzlových bodů na zkoumané ploše, bez bodů které bezprostředně sousedí s hranou otvoru metodou viz (Obr. 44).



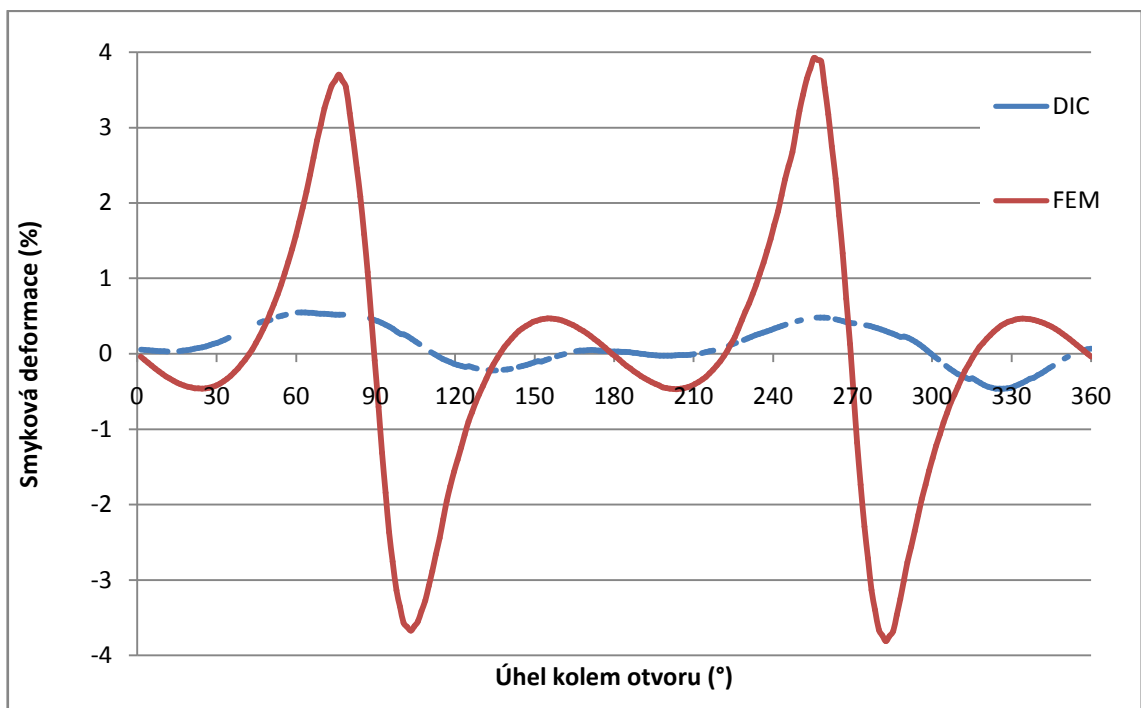
Obrázek 54 - Grafické srovnání deformace ve smyku

Všechny uvedené obrázky deformací jsou při stejné síle 3000N. Důležitý je i vývoj těchto deformací, na obrázku (55) je uveden vývoj smykových deformací v čase. Nejprve v elastické části pracovního diagramu dochází k formování deformací do tvaru X, které se skládá s kladných a záporných smykových deformací, které by stejně jako na numerickém modelu měli být přibližně stejně velké, to by platilo v případě dokonale symetrického a dokonale speciálně ortotropního vzorku bez vad. Jelikož je dřevo přírodní materiál, nikdy není přesně symetrické, obsahuje různě široké letokruhy s různým procentuálním podílem jarního a letního dřeva, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky a podobně. I když bylo při výrobě dbáno na maximální přesnost a eliminaci všech vad, vždy při zatížení vznikají mírné rozdíly v hodnotách deformace. Na straně ,kde je dřevo poddajnější, vzniká deformace větší, což je možno vidět na předposledním obrázku v sérii. V této fázi začínají vznikat plastické deformace a v místě největší deformace vzniká trhлина.

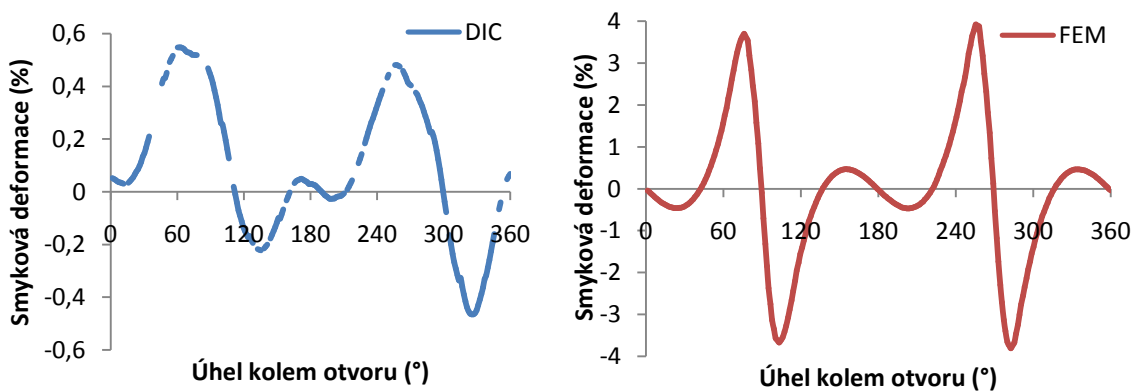


Obrázek 55 - Vývoj smykové deformace v čase

Hodnoty smykové deformace jsou zobrazeny na grafu viz (Obr. 56) ve 360 stupních kolem otvoru, způsobem jaký je uveden v metodice viz (Obr. 30). Z těchto výsledků vyplývá, že je možné metodami srovnat trend, rozsah a lokalitu smykové deformace a hodnoty deformace v jednotlivých bodech, nikoliv však maximální hodnoty deformace, které jsou výrazně závislé na vzdálenosti od otvoru respektive na vzdálenosti dopočítané plochy od otvoru. Hodnoty jsou násobně rozdílné, na grafu, kde jsou vyneseny hodnoty deformací obou metod, je možné získat přehled o rozdílnosti maximálních smykových deformací, pro srovnání trendu je lepší vynést hodnoty jednotlivých metod na jednotlivé grafy viz srovnání na Obrázku (57).

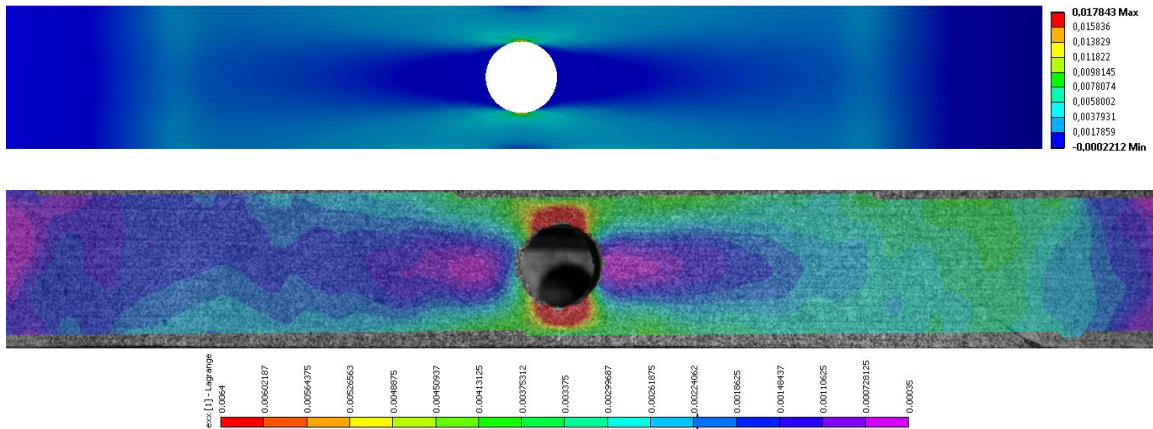


Obrázek 56 - smykové napětí kolem otvoru

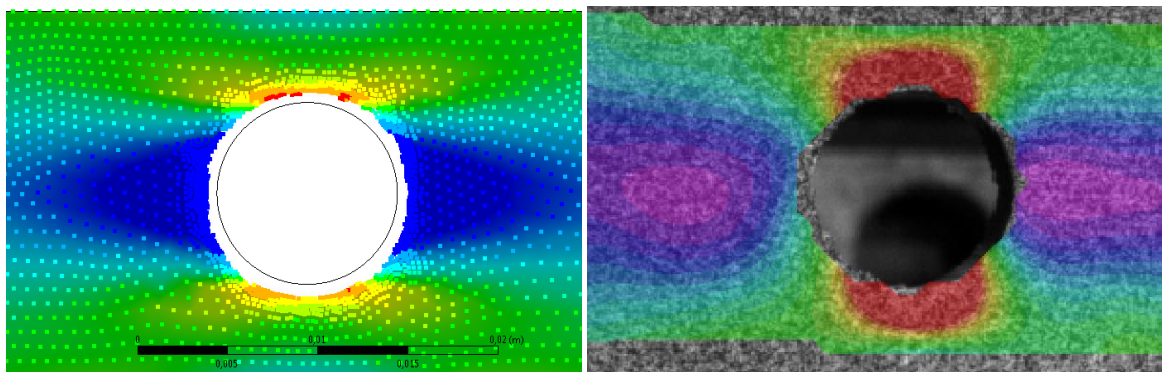


Obrázek 57 - Srovnání trendu hodnot smykové deformace

Pro vytvoření grafů smykového napětí kolem otvoru byl použit referenční vzorek, který zhruba odpovídá průměrným hodnotám naměřeným u skupiny vzorků s velkým otvorem a zároveň neobsahuje žádné extrémní hodnoty. Jelikož smyková deformace vychází z rozdílů deformací normálových, je třeba uvést a srovnat i právě tyto deformace.



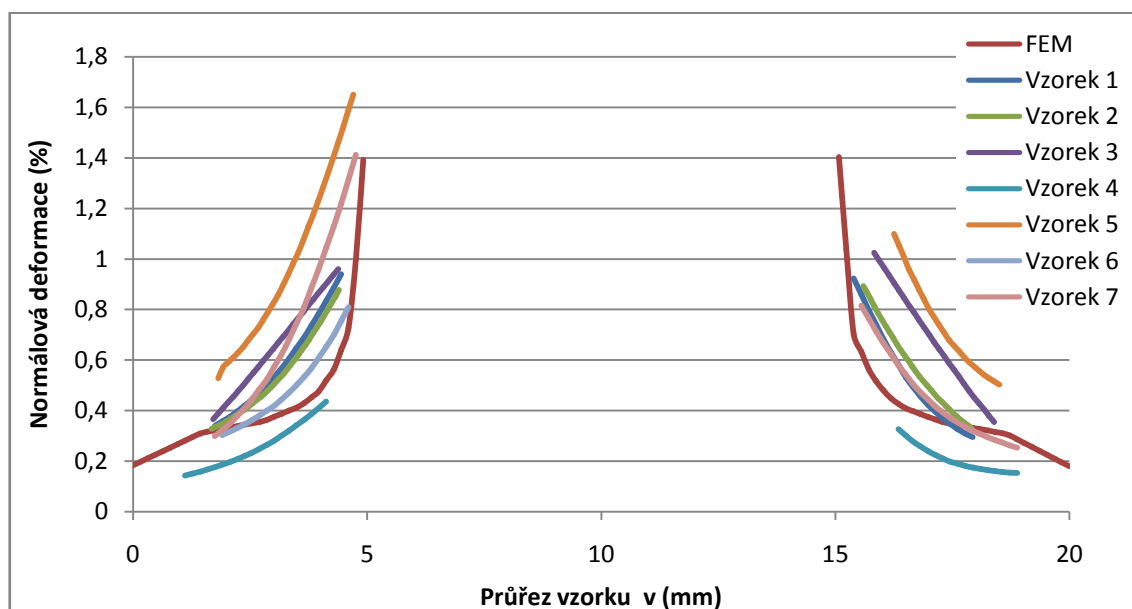
Obrázek 58 - Srovnání deformací v podélném směru DIC; MKP při $F=3000N$



Obrázek 59 - Grafické srovnání deformací v podélném směru při $F=3000N$

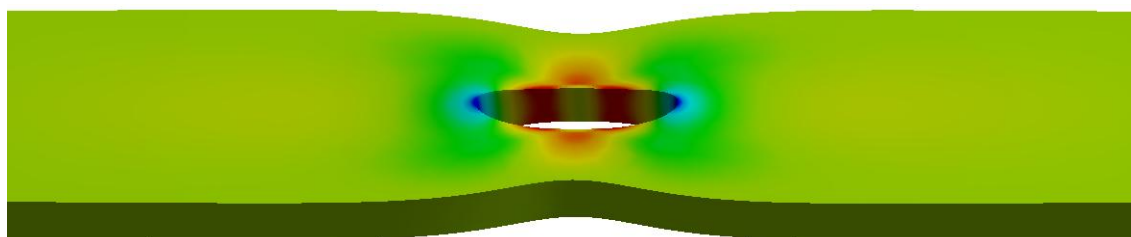
Trend normálové deformace v podélním směru je srovnatelný, je vidět maximální napětí u otvoru v ose kolmé k podélnému směru, kde dochází k největšímu protažení, naopak u otvoru v podélném směru je deformace téměř nulová, stejně jako v případě vzorečku s menším otvorem. Díky otvoru zde nedochází k přenášení tahového zatížení. V podélném směru byly zjištěné hodnoty deformace na přímce, vedené přes otvor, vyneseny na graf, viz (Obr. 60), stejným způsobem jako je uvedeno v předchozí kapitole. Z grafu vyplývá, že trend hodnot jednotlivých metod je srovnatelný, velikost hodnot deformace numerického modelu jsou na rozdíl od smykových mírně nižší. Je to způsobeno tím, že v reálném modelu jsou při síle 3000N větší deformace normálové v podélném směru než smykové, tyto deformace s přibývajícím silou už dále tolik nerostou

o proti smykovým deformacím, které s přibývajícím silou rostou exponenciálně. Především je, ale potřeba upozornit, že data smykových a normálových deformací jsou zjišťována v jiných místech a jak už bylo několikrát uvedeno, maximální hodnoty deformací není možné srovnávat.

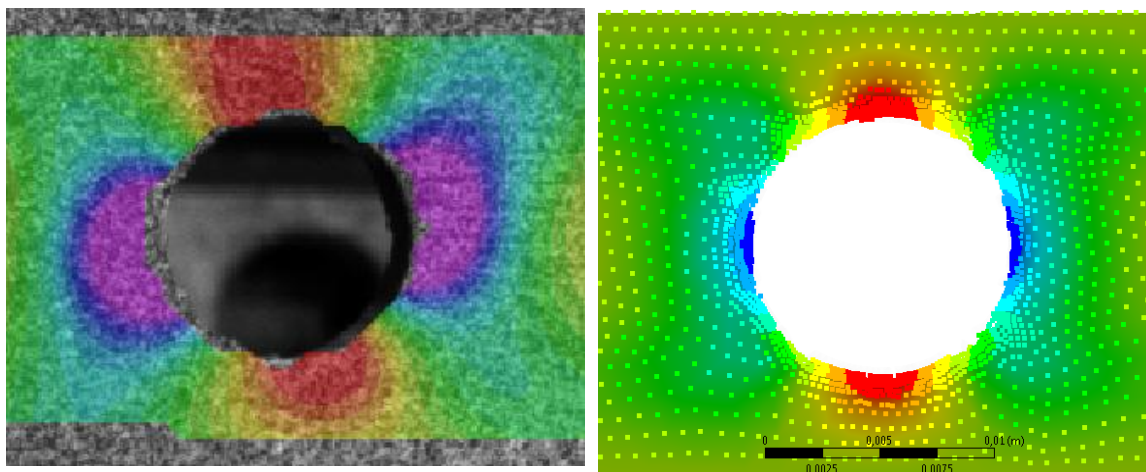


Obrázek 60 - Srovnání deformace v podélném směru

Dalším grafickým srovnáním je normálová deformace v ose kolmé na osu zatížení, stejně jako v předchozí kapitole u menšího otvoru, jsou zde maximální hodnoty velmi malé, u obou metod pouze kolem 0,5%. Tato deformace představuje především příčné zúžení, tato deformace je malá a okem nepozorovatelná, proto je zde obrázek (61), který představuje čtyřiceti násobně zvětšenou deformaci numerického modelu a na obrázku (62) je uvedeno grafické srovnání.



Obrázek 61 - 40x zvětšená deformace



Obrázek 62 - Grafické srovnání deformace ve směru kolmém na osu zatížení při $F=3000N$

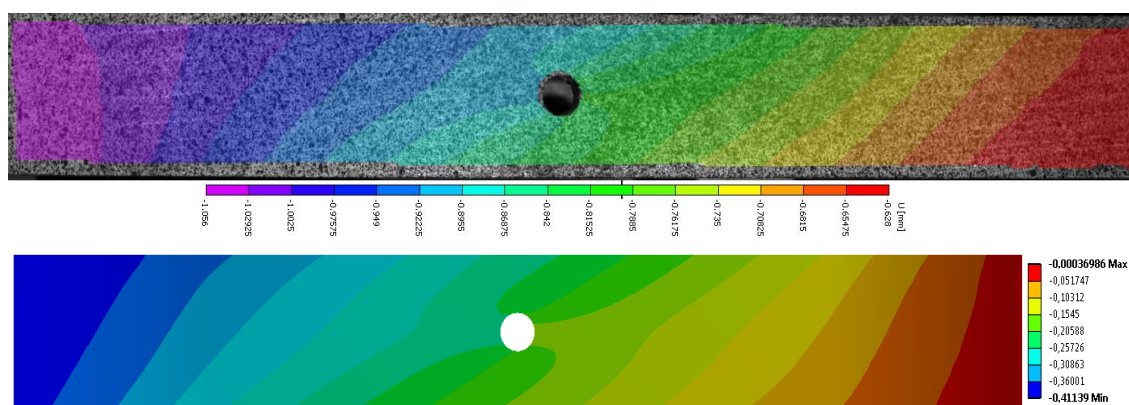


Obrázek 63 - typické porušení vzorku

Po překročení meze pevnosti došlo k porušení struktury dřeva vlivem smykového napětí v místě maximální smykové deformace. Je možno říct, že předpoklad a počítačová simulace numerického modelu v velkém otvorem byla správná a úspěšně ověřena experimentem. Srovnání a další výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.4 Shrnutí a srovnání výsledků.

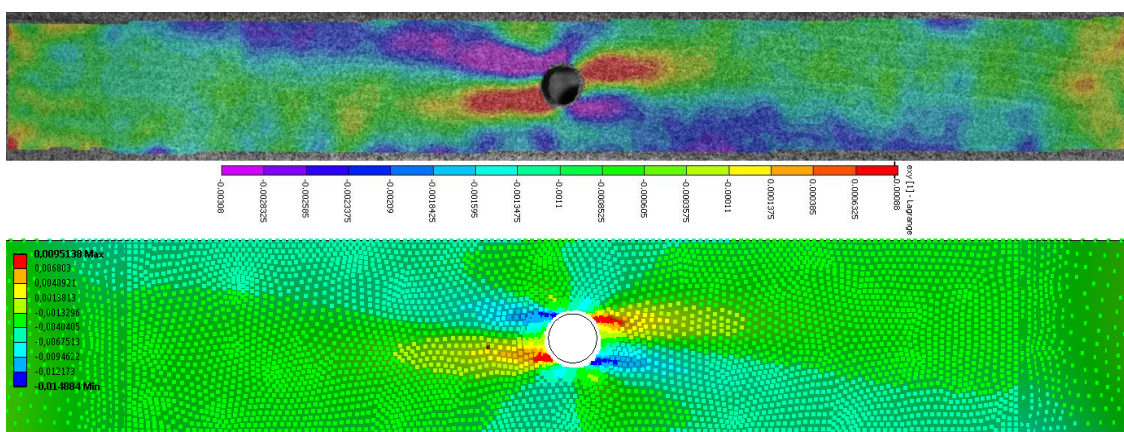
5.3. Výsledky vzorků s odklonem vláken

Vzorky s odklonem vláken mají stejný rozměr jako ostatní vzorky, je do nich vrtán otvor 5mm a odklon vláken od podélné roviny je 5°. Předpokladem pro tyto vzorky je výrazně nižší mez pevnosti. Předpoklad vychází z anatomické stavby dřeva, velmi pevná vlákna, spojená v podélném směru pomocí pevných kovalentních vazeb přenášejí většinu takového napětí. Pokud jsou tyto pevné vlákna uspořádána pod určitým úhlem vzhledem ke směru zatížení, je možné že většina nebo veškeré vlákna nevedou přes celou délku vzorky, čemuž nepomáhá ani vrtaný otvor. Tím pádem musí tahové napětí částečně přenášet i velmi slabé vodíkové můstky a pevnost tím výrazně klesá. Vliv odklonu je viditelný už i na celkovém posunutí viz (Obr. 64).



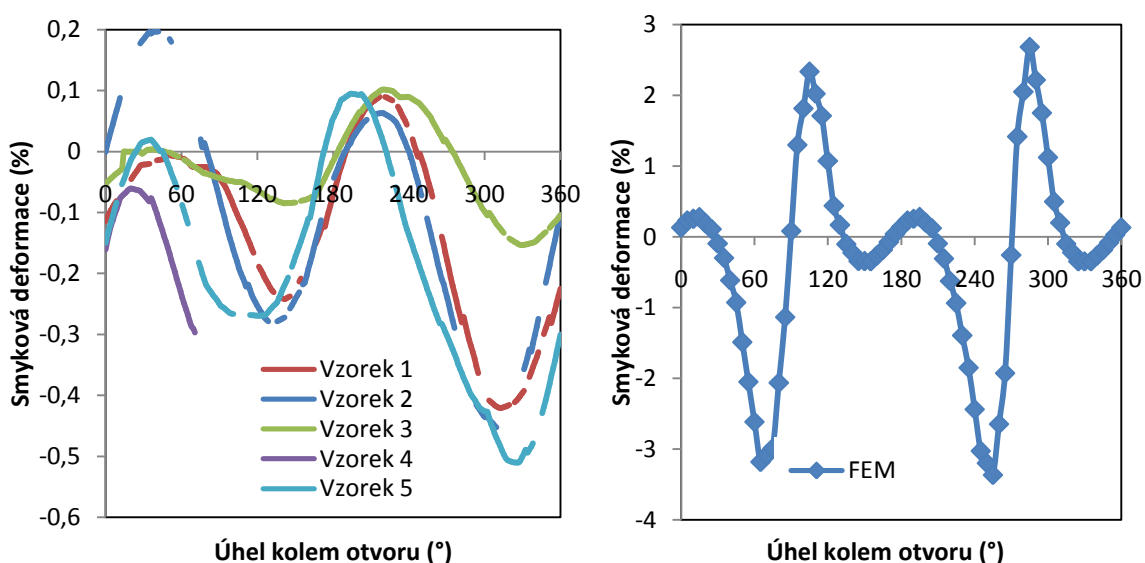
Obrázek 64 - Celkové posunutí v podélném směru u vzorku s odklonem při $F=3000N$

Na obrázku (64) je možno vidět naklonění jednotlivých barevných vrstev posunutí u obou metod, což je způsobeno právě odklonem vláken, u numerického modelu nebylo naklonění tak výrazné, namísto toho se celý model ohýbal. To bylo způsobeno nedostatečným podepřením, model byl upraven podepřením na konci vzorku, kde působí tahová síla speciální podpěrou (*Frictionless support*), která umožňuje posunutí jen v jednom směru a v dalších směrech posunutí omezuje bez jakékoliv třecí síly. Toto nastavení věrněji popisuje reálný experiment, kde jsou vzorky pevně upevněné na obou koncích v upínacích čelistech. Ovšem u modelů bez odklonu vláken tohle nastavení nebylo potřeba, žádný jiný model se tímto způsobem neohýbal. Touto zkouškou se předešlo dalším případným neshodám modelu s experimentem. Je viditelné že grafické srovnání posunutí modelu s experimentem je velmi podobné a tak je možné přejít k dalším zkouškám, například smykové deformace v podélné rovině, viz (Obr. 65).



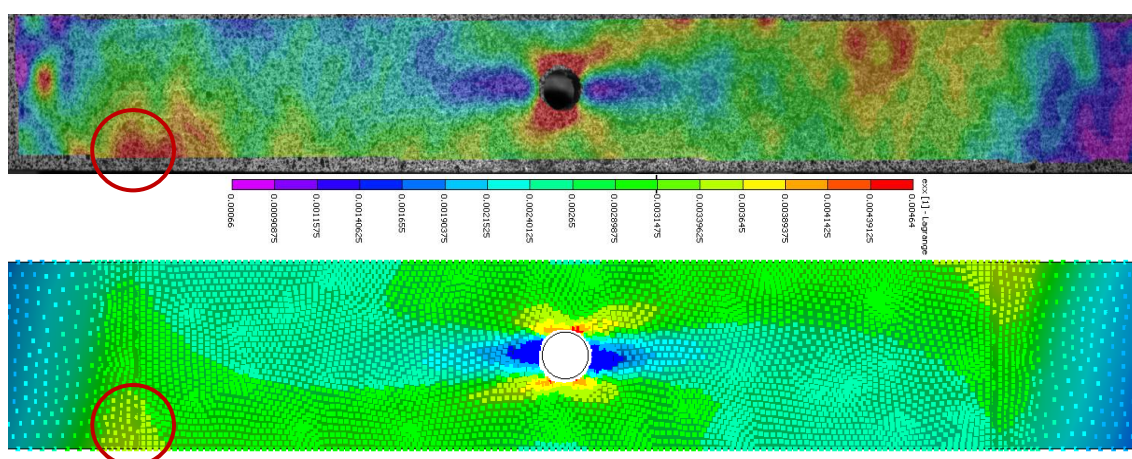
Obrázek 65 - Poměrná deformace ve smyku MKP; DIC při $F=3000N$

I když jsou hodnoty maximální smykové deformace obou metod rozdílné, což je způsobeno tím, že numerický model je zjednodušený od anatomické stavby dřeva, vazebných sil a podobně, je trend deformace graficky velmi podobný, viz (Obr. 65). Rozdíl oproti vzorkům bez odklonu je patrný na první pohled, zatímco u speciálně ortotropních vzorků a modelů jsou kladné a záporné hodnoty smykové deformace téměř stejné, u vzorků s odklonem je jedna strana smykové deformace výrazně větší a rozsáhlejší, konkrétně zde je to záporná deformace, značená v modrých odstínech. To je způsobeno právě odklonem vláken, větší záporná deformace se šíří, jednoduše s úhlem odklonu "po vlákněch", naopak kladná, červeně značená deformace jde "proti vláknům" a nemá takový rozsah ani hodnotu. Záporná smyková deformace je poměrově tak velká, že zde u všech vzorků bez výjimky dojde ke stejnému porušení.



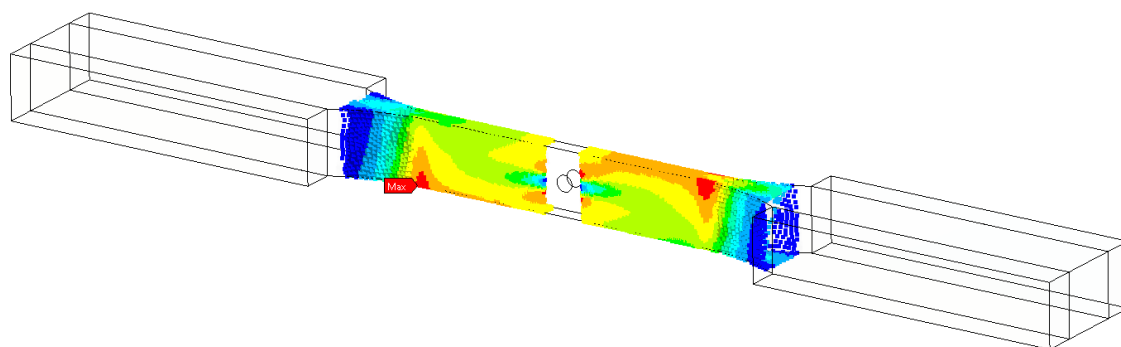
Obrázek 66 - Smyková deformace kolem otvoru DIC; MKP při $F=3000N$

Hodnoty smykové deformace jsou mezi jednotlivými vzorky velmi podobné ovšem při srovnání s hodnotami numerického modelu v grafu viz (Obr. 66), tak hodnoty, ale i trend jsou rozdílné. To je způsobeno tím, že obzvláště u vzorku s odklonem vláken se s přibývajícím vzdáleností od otvoru exponenciálně snižují hodnoty deformace stejně jako u speciálně ortotropního vzorku a na rozdíl od speciálně ortotropního vzorku se významně mění i trend deformací. Co je ovšem viditelné na grafech obou metod je, že záporná smyková deformace je větší než kladná, jak už bylo zjištěno z grafického srovnání.

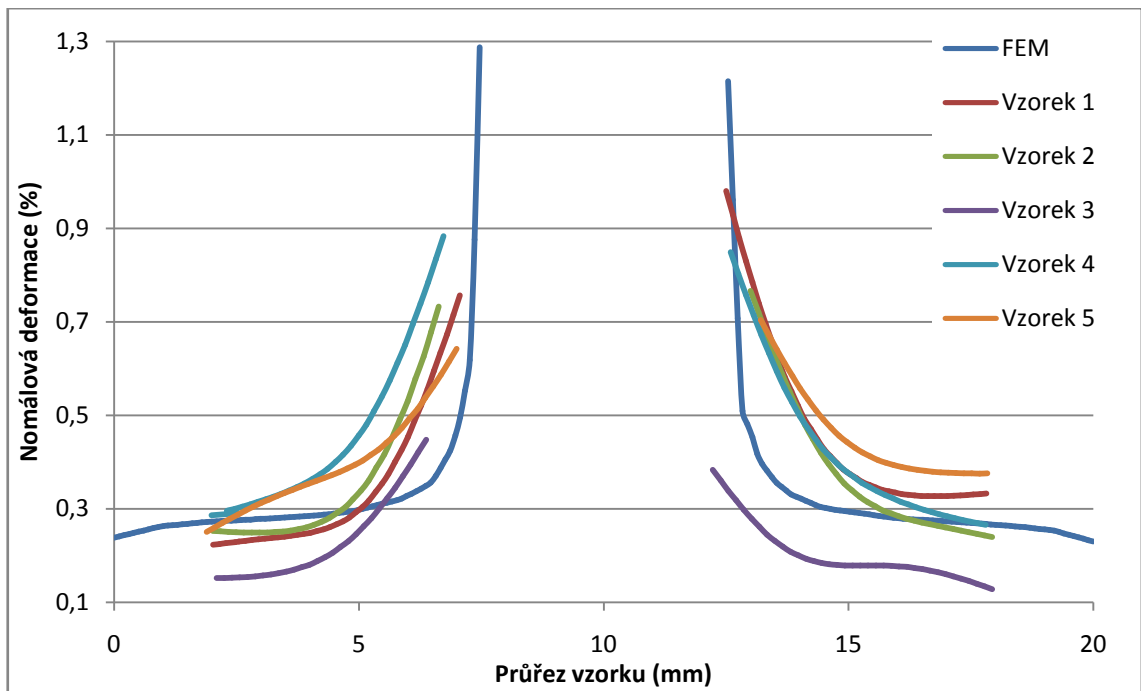


Obrázek 67 - Srovnání deformací v podélném směru DIC; MKP při $F=3000N$

Grafické srovnání normálové deformace v podélném směru u vzorků s odklonem vláken je taktéž odlišná od speciálně ortotropních vzorků bez odklonu a to zejména v tom, že se na obou krajích zúžené části vzorku objevují viditelné deformace zvýrazněné červeným kruhem viz (Obr. 67). To je viditelné u obou metod. U numerického modelu jsem tyto deformace dobře viditelné při vykreslení výsledků bez prostřední části s otvorem, viz (Obr. 68). Celkově jsou, ale normálové deformace u vzorků s odklonem velmi malé oproti smykovým.

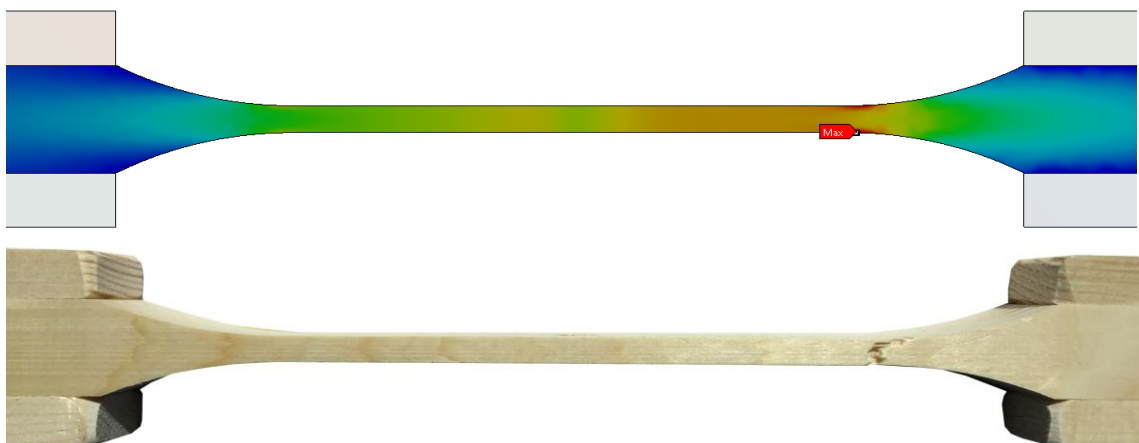


Obrázek 68 - Normálové deformace bez prostřední části s otvorem při $F=3000N$



Obrázek 69 - Srovnání deformace v podélném směru při $F=3000N$

Na grafu srovnání hodnot deformací na přímce je možné pozorovat stejný trend a velmi podobné hodnoty deformace, to vše značí o tom, že i numerický model s odklonem byl úspěšně ověřen experimentálně. O tom také svědčí další snímek, viz (Obr. 70), kde je vidět maximální poměrná deformace na spodní straně vzorku v porovnání s porušením v reálném experimentu. U všech vzorků došlo k porušení na téměř přesně tomhle místě, což značí jednak o přesnosti výroby zkušebních vzorků, ale také o velmi dobře nastaveném numerickém modelu.



Obrázek 70 - Srovnání normálové deformace u modelu s porušením u vzorku

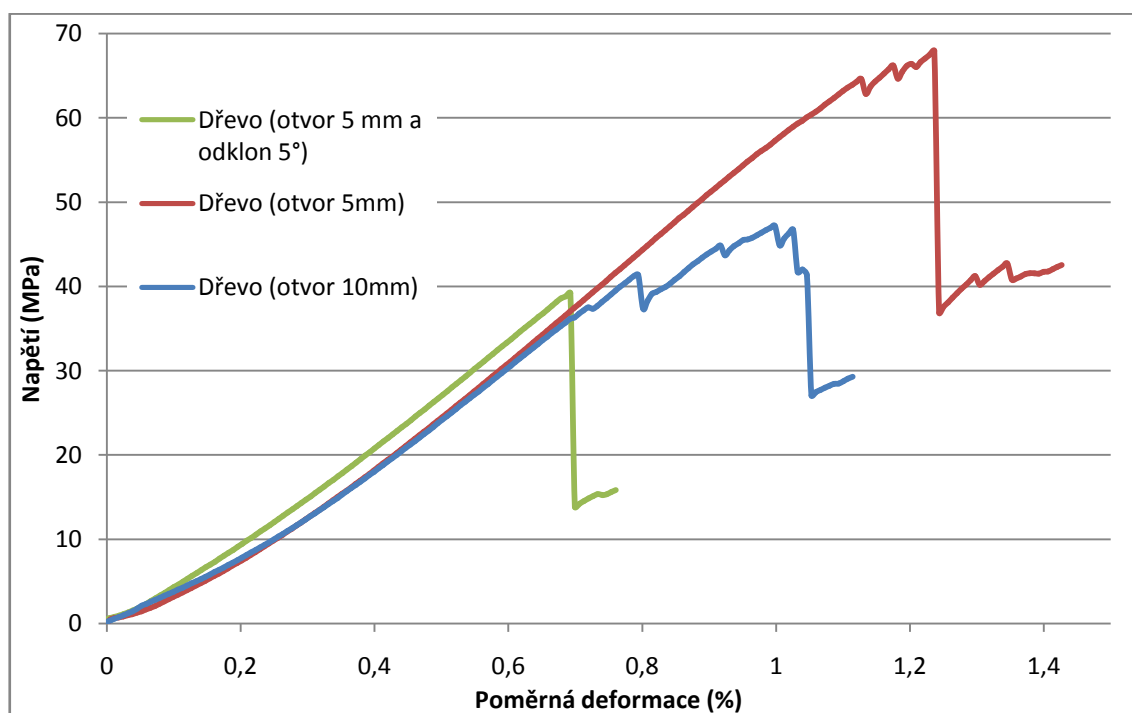
Na obrázku (71) je vidět typické porušení vzorku s odklonem vláken 5° , na rozdíl od speciálně ortotropních vzorků bez odklonu, kde byla viditelná smyková trhlina vedená od okraje otvoru rovnoběžně s osou zatížení a na konci trhliny vláknitý lom, způsobený tahem, na vzorku s odklonem je pouze, čistě smyková trhlina vedená rovnoběžně s anatomickým směrem vláken. Všechny tyto vzorky jsou porušeny stejným způsobem.



Obrázek 71 - typické porušení vzorku s odklonem vláken

5.4. Shrnutí a srovnání výsledků

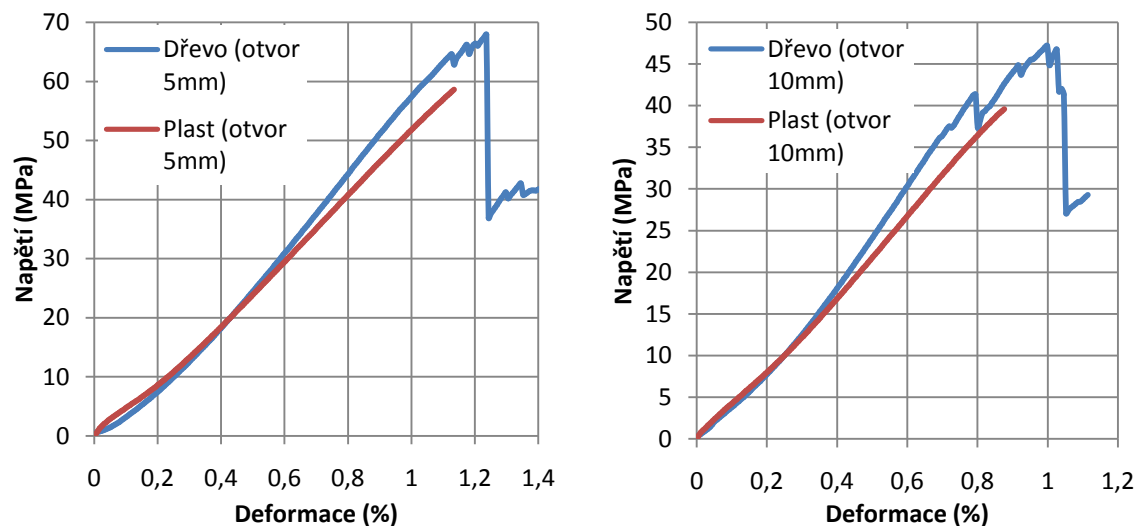
Všechny výsledky numerického modelu se podařilo verifikovat experimentem a nyní je možné je mezi sebou porovnat. V předchozích kapitolách byli popsány jednotlivé typy vzorků a srovnání metod. V této kapitole bude srovnání typů vzorků mezi sebou, aby bylo viditelné jaký má vliv rozdílný průměr otvoru, odklon vláken a také rozdíl mezi izotropním dřevem a anizotropním, homogenním plastem. Nejprve je znázorněno srovnání napěťově-deformační analýzy jednotlivých typů vzorků metodou, kdy se z každé skupiny vzorků vytvoří průměrná hodnoty meze pevnosti a úměrnosti a vzorek, který se nejvíce přibližuje tomuto průměru je použit jako referenční pro toto srovnání, viz (Obr. 72).



Obrázek 72 - Srovnání pracovních diagramů dřevěných vzorků

Na grafu je hezky vidět, jaký má vliv odklon vláken o 5° i když je průměr otvoru menší, pouze 5 mm vzorek s odklonem má výrazně menší pevnost než vzorek se stejným průměrem otvoru, bez odklonu. Navíc je také vidět jiný trend hodnot na konci plastické části pracovního diagramu, zatímco vzorky bez odklonu zde mají schodovitý trend, jelikož dochází k postupnému praskání jednotlivých vláken vlivem tahu a až poté dojde k úplné ztrátě pevnosti, u vzorku s odklonem dojde k úplnému porušení okamžitě po překročení plastické části, je to způsobeno tím, že u vzorků s odklonem dojde k porušení pouze smykem podél vláken. Vzorky bez odklonu, které se liší pouze

průměrem otvoru, mají velmi podobný trend lineární, plastické části tudíž budou mít i podobnou tuhost a liší se pouze mezi pevnosti a to poměrně výrazně, v průměru o 47%. dalo by se tedy říct, že dvojnásobným zvětšením vrtaného otvoru došlo k téměř poloviční redukci pevnosti. Podobných výsledků pevnosti bylo dosaženo i na PE plastových vzorcích, jelikož ale nebyl dostatek těchto vzorků k určení průměrných hodnot, nemusí být výsledky jednoznačné a je třeba je brát s možnou malou odchylkou.



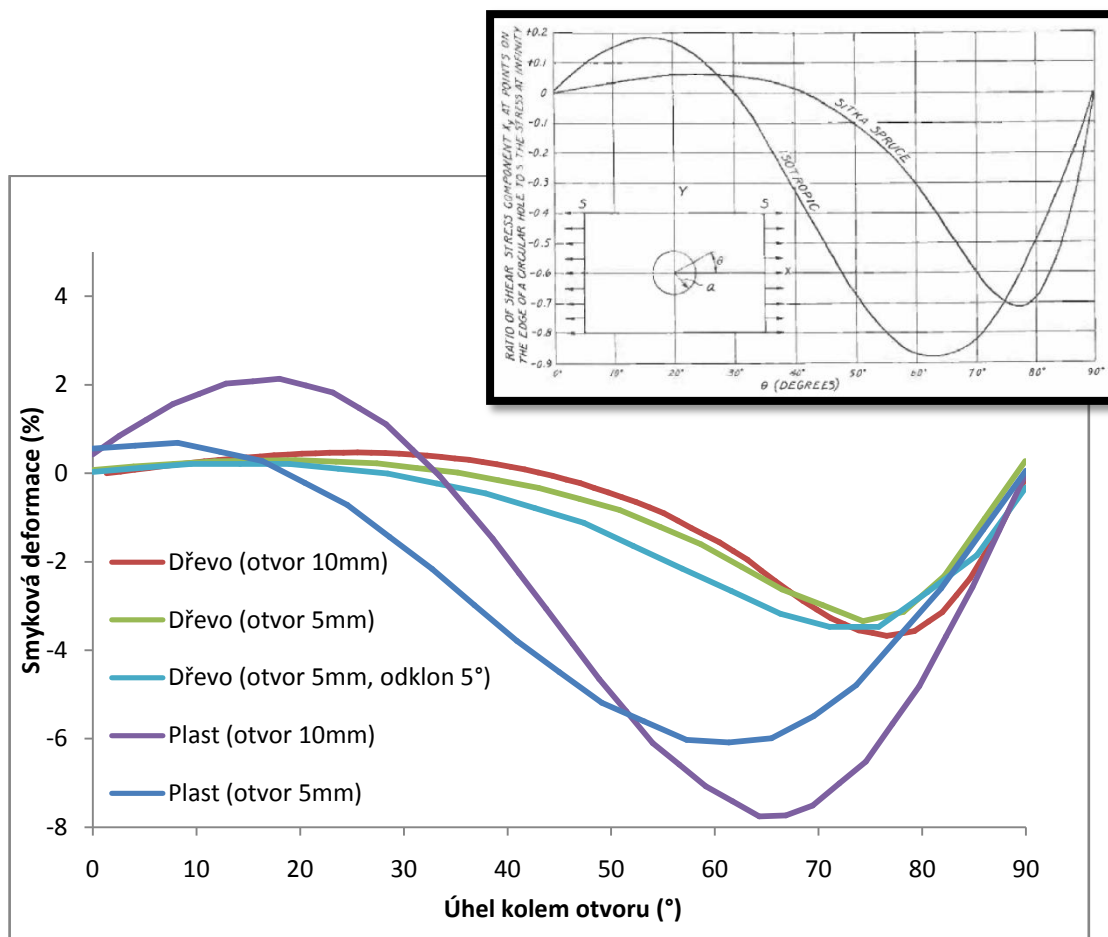
Obrázek 73 - Srovnání pracovních diagramů dřevěných vzorků s plastem

Na grafech srovnání pracovních diagramů dřeva a PE plastu viz (Obr. 73) je vidět že mají oba materiály téměř stejnou pevnost v tahu. Trend hodnot plastových vzorků je více lineární, to je způsobeno absencí složité vnitřní struktury oproti dřevu, po překročení lineární části dojde okamžitě k porušení. Viditelně jiný úhel lineární části pracovního diagramu značí o rozdílné tuhosti, plastový vzorek se při stejném napětí více deformuje, což je vzhledem k materiálovým vlastnostem pochopitelné i předvídatelné.

Tabulka 7 - Srovnání meze pevnosti

Vzorek	Průměrná hodnota meze pevnosti (MPa)
SM bez otvoru (uváděno v literatuře)	103
SM bez otvoru (naměřeno na lab. cvičení)	89,6
SM s otvorem 5mm	64,5
PE s otvorem 5mm	58,6
PE s otvorem 10mm	39,6
SM s otvorem 5mm a odklonem 5°	37,3
SM s otvorem 10mm	34

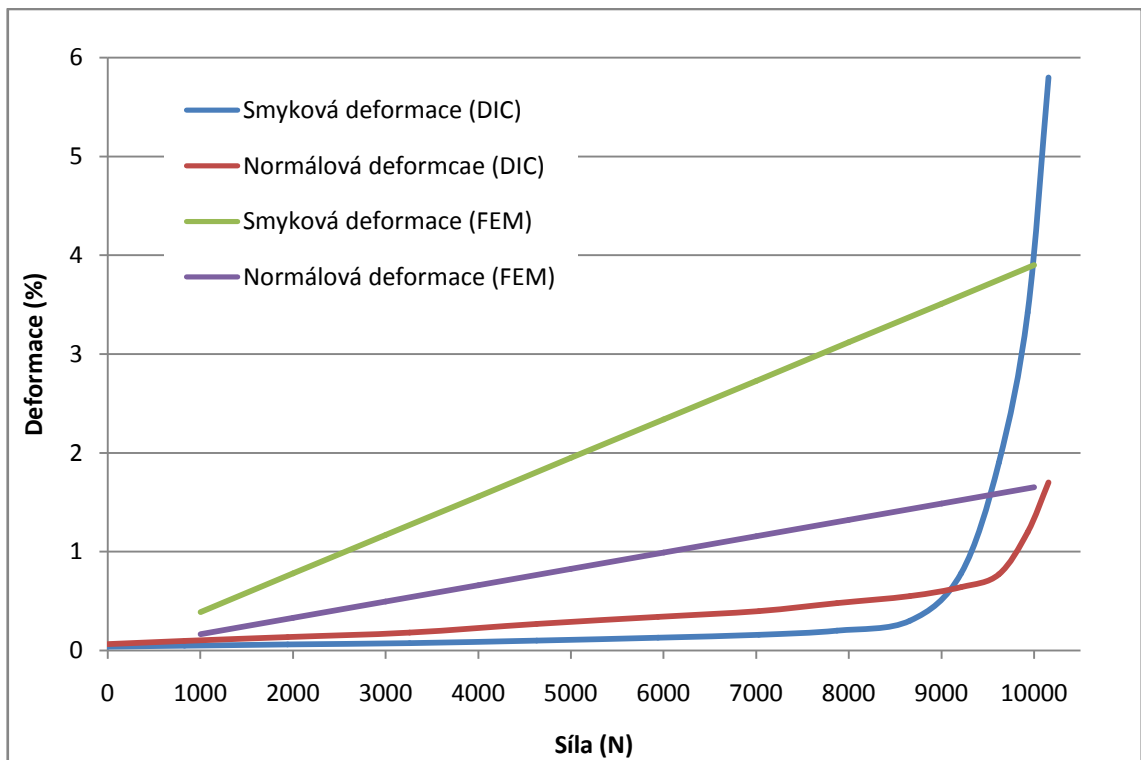
Vhodným způsobem srovnání verifikovaných numerických modelů jednotlivých typů vzorků s literaturou je pomocí smykové deformace kolem otvoru, kde Smith (1956) ve svém experimentu uvádí správně tyto deformace na grafu ve srovnání analyticky vypočítaného smykové deformace obecného izotropního modelu a smykové deformace zjištěné pomocí tenzometrů na hraně otvoru u dřeva smrku sitka, jak je uvedeno i v kapitole literární přehled.



Obrázek 74 - smyková deformace kolem otvoru

Výsledky zjištěné moderní metodou konečných prvků se téměř naprosto přesně shoduje s výsledky z 60 let starého experimentu. Zejména rozdíl mezi izotropním a anizotropním materiálem je viditelný na první pohled. Je zde zobrazen také rozdíl trendu smykových deformací jednotlivých typů modelů. Ze srovnání vyplývá, že je metoda konečných prvků velmi účinná a při správně zadaném modelu jsou i výsledky a trend výsledků velmi přesný ve srovnání s literaturou, s konkrétním experimentem i analytickým výpočtem.

Dále bylo z experimentu zjištěno, že s přibývajícím silou, má maximální normálová deformace rychleji stoupající trend než maximální smyková deformace, neboli nejdříve se dřevo natahuje a vlivem rozdílů normálových deformací pomalu stoupá smyková deformace. Ke konci elastické části pracovního diagramu dochází k výraznému růstu maximálních hodnot smykové deformace a následně porušení smykem, tento trend je uveden na obrázku (75). U metody konečných prvků je zde trend jiný, vzhledem k materiálovému modelu je trend pouze lineární, kde čím je větší síla, tím je lineárně větší normálová i smyková deformace, ale smyková deformace má rychleji stoupající trend. Tím se vysvětluje, proč je při síle 3000N u snímků numerického modelu vždy větší smyková deformace a u metody DIC je tomu naopak.



Obrázek 75 - Závislost maximální deformace na síle zatížení

6. ZÁVĚR

V této práci bylo cílem porovnat dvě poměrně moderní metody zjišťování deformací a to počítačovou simulací, metodou konečných prvků a experimentálně, metodu digitální korelace obrazu. Při té příležitosti se také podařilo ověřit analytickou metodu výpočtu maximálního napětí kolem otvoru u izotropního materiálu, konkrétně v tomto případě polyethylen plastu, ze kterého byly také zhotoveny a experimentálně otestovány vzorky. Tato analytická metoda se osvědčila při přesné citlivostní analýze hustoty sítě numerického modelu, kde ve výsledné podobě sítě vyšlo maximální napětí v porovnání s analytickým výpočtem s relativní odchylkou pouze 0,3%.

Dále byli graficky srovnávány deformace jednotlivých typů vzorků modelu s experimentem, trendy deformací graficky obou metod byly shodné, ale rozsah barevného znázornění deformací, ani maximální hodnota deformace neodpovídaly, u experimentu byl rozsah větší a lépe zobrazený, naopak u modelu byly maximální hodnoty násobně větší a rozsah byl graficky menší. Bylo zjištěno, stejně jako udává literatura (McGinty, 2014, Smith, 1956), že s přibývajícím vzdáleností od okraje otvoru exponenciálně klesá deformace i napětí. Jelikož metoda DIC nedokáže dopočítat všechny pixely až k úplnému okraji otvoru, jsou u těchto výsledků jiné maximální hodnoty deformace a jiný barevný rozsah. Aby bylo možné lépe graficky srovnat výsledky obou metod, byla u modelu manuálně vybraná plocha pro výpočet, která nedosahuje, až k úplnému okraji a výsledky jsou tak lépe srovnatelné. Stejného problému se týká i srovnání hodnot smykových deformací na okraji otvoru, trend hodnot je srovnatelný ale maximální hodnoty jsou u numerického modelu opět větší. Jinak je tomu u srovnání hodnot normálového napětí na vynesené přímce, zjišťované hodnoty i trend ve stejném místě jsou si velmi podobné.

Z toho vyplývá, že hlavním nedostatkem metody DIC je v tomto konkrétním experimentu nemožnost zjistit deformaci na okraji vzorku, obzvláště když je zde maximální. Vhodné je tyto metody kombinovat, u metody konečných prvků je zase model zjednodušený a nezohledňuje anatomickou stavbu dřeva, střídání jarního, letního dřeva a podobně, nelze také zjistit výsledný tvar porušení a mez pevnosti. Dalším ze zjištění byl také vývoj smykových a normálových deformací v závislosti na síle, normálové deformace mají ze začátku rychleji rostoucí trend než smykové a u konce elastické části výrazně vzrostou smykové deformace a dojde k porušení vlivem smyku.

7. SUMMARY

In this work there was first in the chapter literary review general information about mechanical behavior of the wood and the overview of basic concepts. Afterwards this subchapter is specifically devoted to the behavior of wood in tension. General information about the strength, behavior and types of violations of the wood in the tension was obtained here. The method of digital image correlation is indirectly destructive, because the method itself does not disturb the wood, as well as the finite element method is only a virtual calculation of the model behavior. For this reason, there was included a chapter dealing with the non-destructive testing and its historical development. Below there are details about the actual methods used in work, their related problems and their practical use in the field. At the end of the literature review there is specific information about the tension around the hole in the tension, together with a method for identifying stress around the hole. The method is analytical for isotropic material and examples of the difference between isotropic and orthotropic material.

A specific methodical procedure is described in the next chapter, at first a formation of a numerical model to define material properties, networking solutions and boundary conditions. Furthermore, guidelines for proper measurement and evaluation of the experiment samples from production, through actual measurements to various methods of determining the results and methods of comparison the results.

In the final section first an analytical method of calculating the maximum stress on the edge of the hole in the isotropic material is validated. The calculated results were verified by numerical simulations with PE plastic material model, the final values matched only with a small deviation and the model was verified on the real experiment of PE plastic by the DIC method. This way certified result was also used for sensitivity analysis of net density of the numerical model. The result section also contains a comparison of both methods of sample types, always here appearing a graphic comparison of nominal and shear deformation and subsequently a comparison of the values of deformation on the charts, including the comments. In the final chapter there are compared working diagrams of various sample types where you can see the influence of hole size and the diversion of fibers. Subsequently the obtained and the measured data of strength limits from the literature and from the experiment are

summarized in the table. There is also a graph of the resulting values of shear deformation of isotropic and orthotropic materials around the hole compared with the experiment reported in the literature. Finally, it is possible to say that all the results have been verified and the work was successful.

8. POUŽITÁ LITERATURA

BODIG, J. - JAYNE, B A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar, Fla.: Krieger Pub., 1982. 712 s. ISBN 0-89464-777-6.

HUTTON, D V. *Fundamentals of finite element analysis*. Boston: McGraw-Hill, 2004. 494 s. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 0-07-112231-1.

ŠPANIEL, M., - HORÁK, Z. *Úvod do metody konečných prvků*. České vysoké učení technické v Praze 2011 ISBN 978-80-01-04665-4

POŽGAJ, A. - CHOVANEC, D. - KURJATKO, S. - BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda, Bratislava, 1997 ISBN 80-07-00960-4

GANDELOVÁ, L. - HORÁČEK, P. - ŠLEZINGEROVÁ, J *Nauka o dřevě*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1996 , 184 s. ISBN 80-7157-194-6.

Ross, Robert J., and Roy F. Pellerin. *Nondestructive Evaluation of Wood—Past, Present, and Future*. Springer US, 1991.

DOUGLAS R. *Wood Handbook, Chapter 07: Stress Grades and Design Properties for Lumber, Round Timber, and Ties*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory

UGOLEV, V.N. *Drevesinovedenje s onovami lesnovo tovarovedenija*. Moskva 1986

Kirsch, E.G., "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre," *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, (1898)

Pilkey, Walter D. "Stress and Strain." *Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices*, Second Edition (1974)

Jahoda J., Valach Jaroslav, Image data sequentiality influence on measurement precision of the image correlation method, In *Technical Computing Prague 2009*. Praha : Humusoft, s.r.o, (2009)

Sutton, M. A., J. J. Orteu, and H. W. Schreier. "Image correlation for shape, motion and displacement measurement." (2009).

Pan, Bing, et al. "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review." *Measurement science and technology* 20.6 (2009)

Zink, Audrey G., Robert W. Davidson, and Robert B. Hanna. "Strain measurement in wood using a digital image correlation technique." *Wood and fiber science* 27.4 (1995)

Schreier, Hubert W., and Michael A. Sutton. "Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions." *Experimental Mechanics* 42.3 (2002)

Godara, A., et al. "Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation." *Composites Science and Technology* 69.2 (2009)

Lecompte, D., et al. "Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation." *Optics and lasers in Engineering* 44.11 (2006): 1132-1145.

Wattrisse, B., et al. "Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation." *Experimental Mechanics* 41.1 (2001)

Pan, Bing, et al. "High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 C." *Measurement science and technology* 22.1 (2010)

Hörig, H. "Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz." *Archive of Applied Mechanics* 6.1 (1935)

Kollmann, F. "(Technology of wood and wood based materials. V. 1)." (1951)

Barducci, Italo, and Gioacchino Pasqualini. "Misura dell'attrito interno e delle costanti elastiche del legno." *Il Nuovo Cimento (1943-1954)* 5.5 (1948)

Youngquist, John A., and Thomas E. Hamilton. "Wood product utilization: A call for reflection and innovation." *Forest products journal* 49.11/12 (1999)

Yoshikawa-Fukada, Masako, Tetsuo Fukada, and Yoshimi Kawade. "Characterization of rapidly labeled ribonucleic acid of animal cells in culture." *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Nucleic Acids and Protein Synthesis* 103.3 (1965)

Jiří Drozda, et. al. *Příručka ANSYS Workbench*, Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT 2012, ISBN: 978-80-01-05175-7

Smith, C. B. "Effect of elliptic or circular holes on the stress distribution in plates of wood or plywood considered as orthotropic materials." (1944)

Adrian, Ronald J., and Jerry Westerweel. *Particle image velocimetry*. Cambridge University Press, 2011.

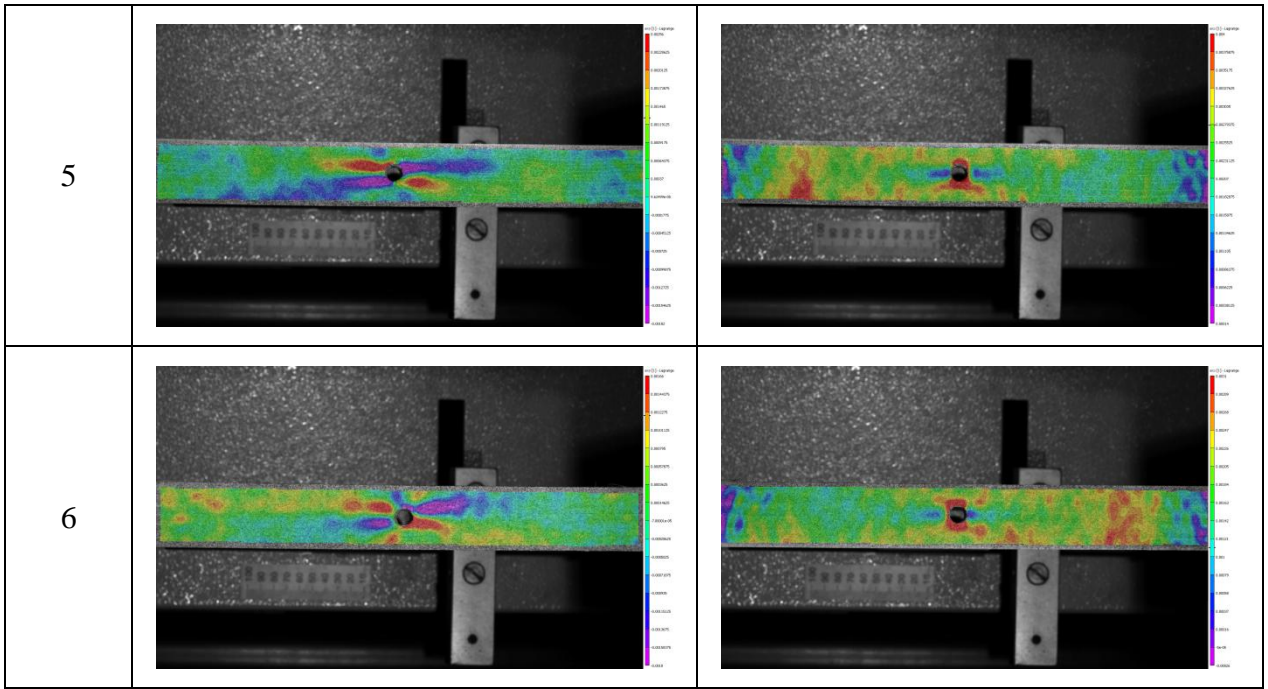
Bob McGinty, October 2014 (<http://www.fracturemechanics.org/>)

ČSN 490113 - Metóda zisťovania pevnosti v ťahu pozdĺž vlákien 1992-04-01

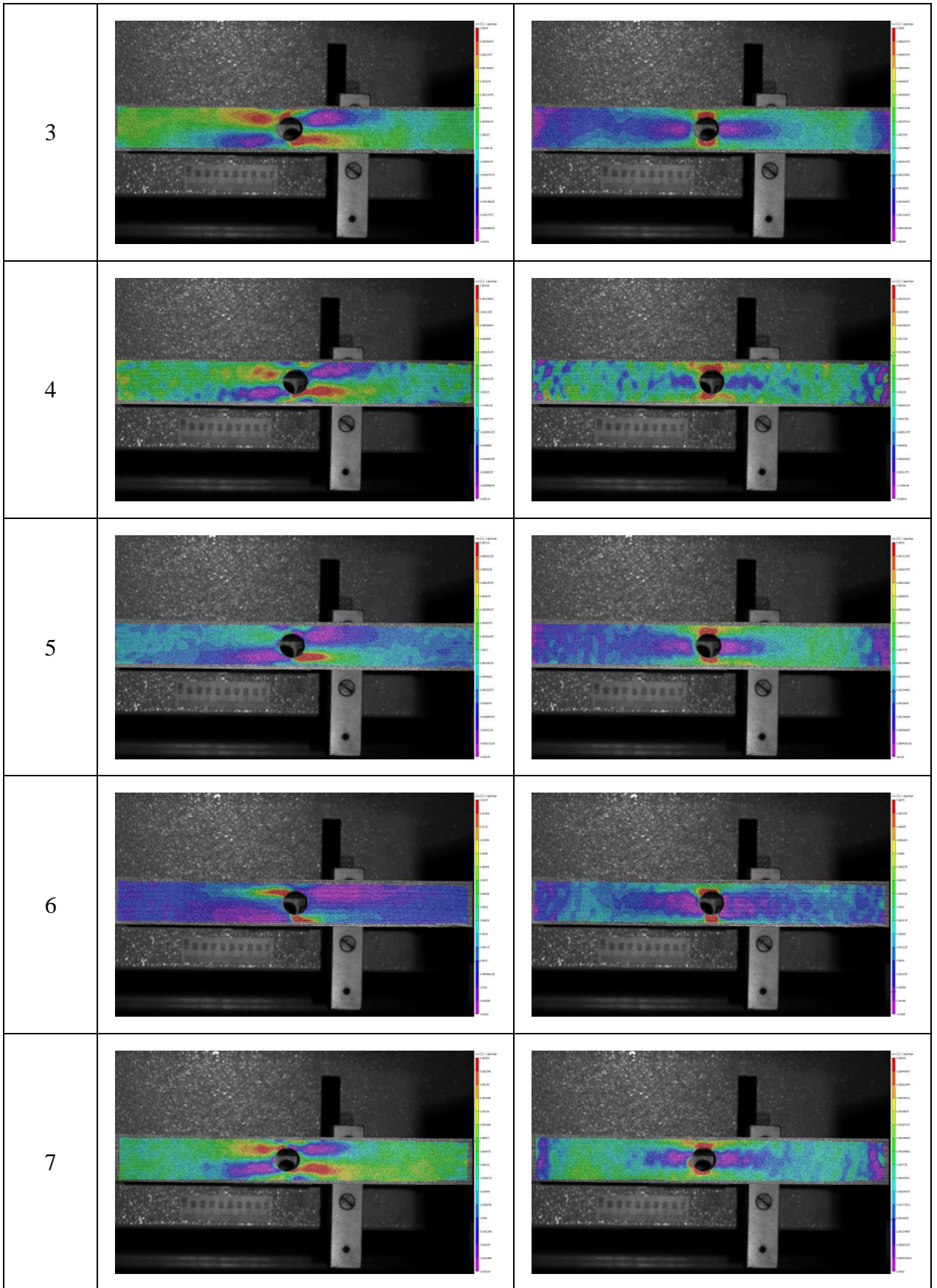
ČSN 73 2824-1 - Třídění dřeva podle pevnosti - Část 1: Jehličnaté řezivo 2011

Příloha:

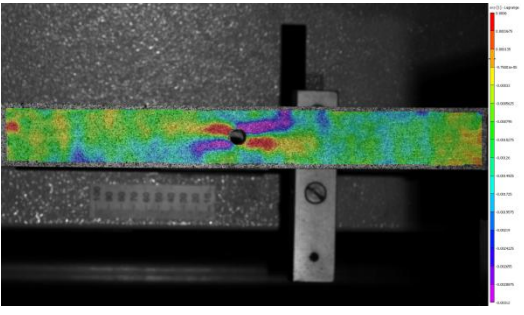
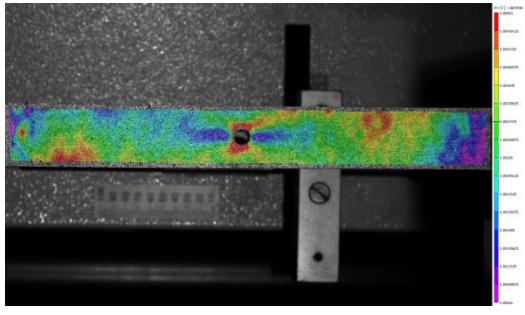
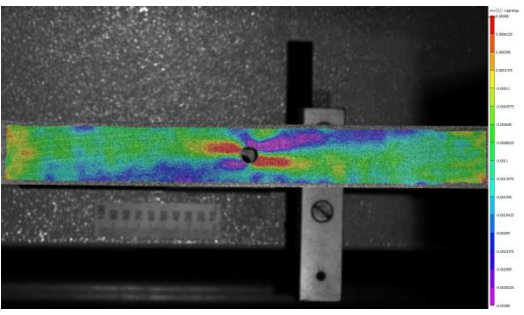
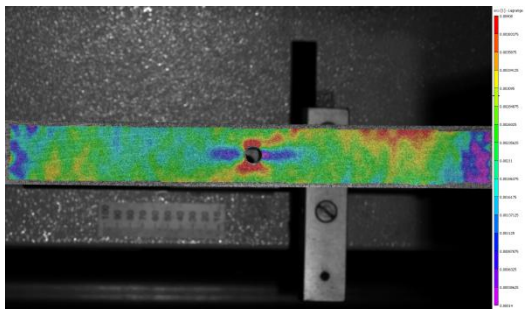
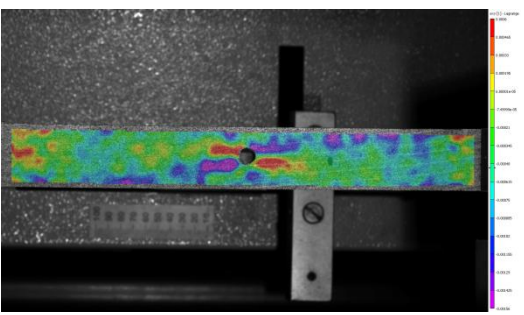
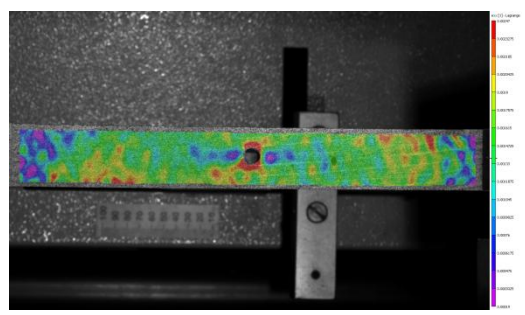
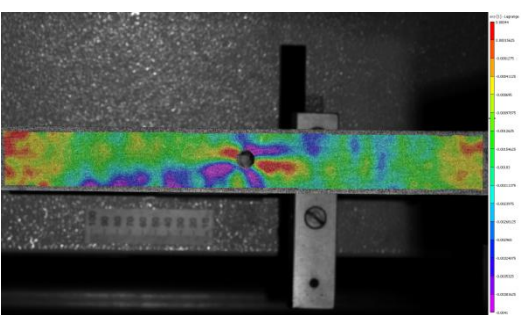
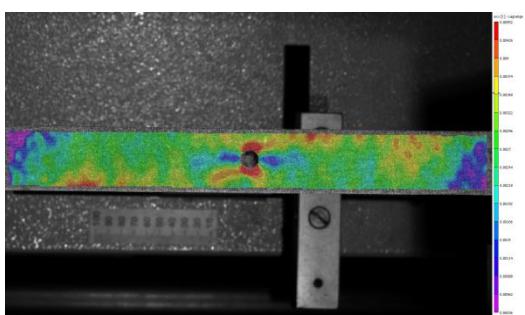
Vzorky s otvorem 5mm při F= 3000N		
Číslo vzorku:	Smyková deformace	Normálová deformace v podélném směru
1		
2		
3		
4		

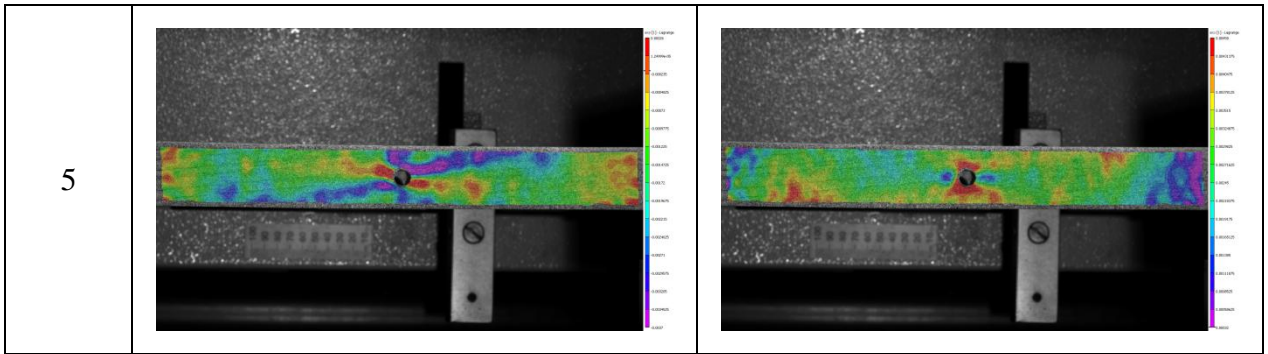


Vzorky s otvorem 10 mm při $F= 3000N$		
Číslo vzorku:	Smyková deformace	Normálová deformace v podélném směru
1		
2		



Vzorky s otvorem 5 mm a odklonem 5° při F= 3000N

Číslo vzorku:	Smyková deformace	Normálová deformace v podélném směru
1	 <p>Shear deformation map for sample 1. The image shows a horizontal specimen with a central hole. A color scale on the right indicates shear strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>	 <p>Normal deformation map for sample 1. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates normal strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>
2	 <p>Shear deformation map for sample 2. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates shear strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>	 <p>Normal deformation map for sample 2. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates normal strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>
3	 <p>Shear deformation map for sample 3. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates shear strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>	 <p>Normal deformation map for sample 3. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates normal strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>
4	 <p>Shear deformation map for sample 4. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates shear strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>	 <p>Normal deformation map for sample 4. The image shows the same specimen. A color scale on the right indicates normal strain values from 0.00000 to 0.00005. The deformation is localized around the hole.</p>



Vzorek PE plastu s otvorem 5 mm při F= 3000N

Číslo vzorku:	Smyková deformace	Normálová deformace v podélném směru
1		

Vzorek PE plastu s otvorem 10 mm při F= 3000N

Číslo vzorku:	Smyková deformace	Normálová deformace v podélném směru
1		