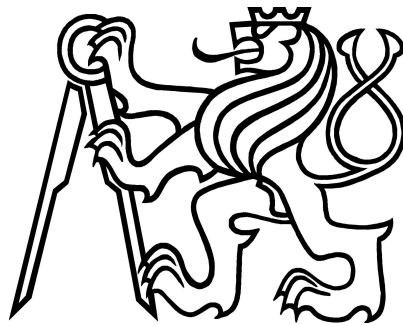


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

FAKULTA DOPRAVNÍ

**ÚSTAV MECHANIKY A MATERIÁLŮ**



**MECHANICKÉ VLASTNOSTI AUXETICKÝCH  
STRUKTUR URČENÉ KVAZI-STATICKÝMI  
ZKOUŠKAMI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

*Autor :*

Michaela Neuhäuserová

*Vedoucí práce:*

Ing. Daniel KYTÝŘ, Ph.D.

Ing. Petr KOUDELKA

Praha, 24. srpna 2015



**K618 .....Ústav mechaniky a materiálů**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Michaela Neuhäuserová**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – AUT – Automatizace a informatika**

Název tématu (česky): **Mechanické vlastnosti auxetických struktur určené kvazi-statickými zkouškami**

Název tématu (anglicky): Mechanical properties of auxetic structures determined by quasi-static testing

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Mechanické vlastnosti auxetických materiálů (materiálů se záporným Poissonovým číslem) umožňují pohlcení velkého množství deformační energie při extrémních způsobech zatěžování, vč. výbuchů a nárazů vysokou rychlostí se pohybujících objektů, za současného žádoucího zachování nízké hmotnosti konstrukčních prvků.
- Cílem bakalářské práce je popis deformačního chování známých auxetických struktur a zhodnocení jejich schopnosti pohltit deformační energii na základě kvazi-statických mechanických zkoušek.
- Rozložení pole deformace na povrchu zkoumaných vzorků vyhodnoťte pomocí metody digitální korelace obrazu (DIC).
- Vytvořte softwarový nástroj pro vyhodnocení jak deformačních vlastností zkoumaných struktur, zejména množství pohlcené deformační energie, tak pro popis závislosti Poissonova čísla na velikosti deformace.
- Výsledky srovnajte s analytickými modely popisujícími průběh Poissonovy funkce.

Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího

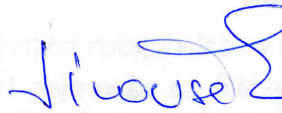

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Lakes, R.: Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, Science, 235(1987), 1038-1040  
Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J., Rogers, S. C.: Molecular network design, Nature 353(1991), 124  
B. D. Lucas, T., Kanade, Proceedings of Imaging Understanding Workshop (1981), 121-130


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Kytýř Ph.D.**  
**Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání bakalářské práce: **12. září 2014**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **24. srpna 2015**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

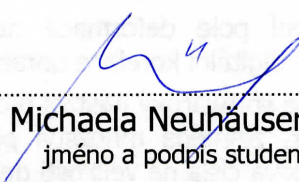
  


prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu mechaniky a materiálů



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

  
Michaela Neuhäuserová  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 12. září 2014

# Prohlášení

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. srpna 2015

Podpis:

# Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Danielu Kytýřovi, Ph.D. a Ing. Petru Koudelkovi za jejich odborné vedení a cenné rady, náměty a připomínky, které mi v průběhu psaní této práce poskytovali. Děkuji též Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i., který mi zajistil potřebné zázemí pro realizaci experimentální části této práce.

Poděkování patří také mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou nejen při psaní této práce, ale i po celou dobu mého studia.

Práce vznikla za podpory rozvojového grantu ČVUT číslo 1051505F014 RPMT 2015 43e, grantu Grantové agentury České Republiky číslo 15-15480S a institucionální podpory ÚTAM AV ČR, v. v. i. RVO:68378297.

V Praze, 24. srpna 2015  
Michaela Neuhäuserová

**Název práce:** Mechanické vlastnosti auxetických struktur určené kvazi-statickými zkouškami

**Autor:** Michaela Neuhäuserová

**Studijní program:** Technika a technologie v dopravě a spojích

**Obor:** Automatizace a informatika

**Druh práce:** Bakalářská práce

**Vedoucí práce:** Ing. Daniel Kytýř, Ph.D.  
Ing. Petr Koudelka

**Abstrakt:**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vývojem experimentální metody pro studium deformačního chování auxetických struktur (porézniích materiálů vykazujících záporné Poissonovo číslo) při kvazi-statickém zatěžování. Vzhledem k charakteru odezvy zkoumaných mikrostruktur na tlakové zatížení jsou mechanické charakteristiky odvozovány z vysoce přesného měření síly během experimentů a optického vyhodnocení deformace na povrchu vzorků s použitím metody digitální korelace obrazu (2D-DIC) se subpixelovou přesností. V práci byly zkoumány vzorky tří druhů auxetických mikrostruktur s analyticky dobře popsanou deformační odezvou a teoretickým průběhem Poissonovy funkce (závislosti Poissonova čísla na deformaci) v uspořádáních odpovídajících jak rovinnému, tak volumetrickému charakteru auxetických vlastností. Pro výrobu vzorků byl využit přímý 3D tisk metodou mnohatryskového modelování s vysokým rozlišením. Z naměřených dat byly s použitím vlastního softwarového nástroje vytvořeného v programovacím prostředí Matlab stanoveny závislosti skutečné napětí - skutečná deformace, Poissonovo číslo - skutečná deformace, poměrný Youngův modul pružnosti a hustota pohlcené deformační energie. Bylo ukázáno, že předkládaná metoda je vhodná pro studium mechanických vlastností auxetických materiálů na makroúrovni, což umožní verifikaci analytických a numerických optimalizačních procedur sloužících pro návrh auxetické mikrostruktury přizpůsobené pro konkrétní aplikaci.

**Klíčová slova:** auxetické struktury, kvazi-statické zkoušky, digitální korelace obrazu, Poissonova funkce, hustota deformační energie

**Title:** Mechanical properties of auxetic structures determined by quasi-static testing

**Abstract:**

This thesis deals with development of experimental method for investigation of deformation behaviour of auxetic structures (porous solids with negative Poisson's ratio) subjected to quasi-static loading. Mechanical characteristics are derived from precise force measurement during experiments and optical evaluation of deformation on the samples' surface using digital image correlation method (2D-DIC) with sub-pixel accuracy. Samples of three different types of auxetic microstructures with analytically well defined Poisson's function (strain dependant Poisson's ratio) were experimentally investigated. Arrangement of unit-cells in each structure was selected in order to achieve in-plane and volumetric auxetic characteristics. The samples were produced using high resolution multi-jet modelling method of direct 3D printing. From the measured data true stress - true strain and Poisson's ratio - true strain relationships together with values of relative Young's modulus and energy absorption capacity were established using custom-developed software tool created in Matlab programming environment. It was shown that the described method is suitable for investigation of mechanical properties of auxetic structures on macro-level. This enables verification of analytical and numerical optimization procedures used for design of auxetic microstructure according to intended application.

**Key words:** auxetic structures, quasi-static testing, digital image correlation, Poisson's function, energy absorption capacity

# Seznam vybraných veličin

---

symbol	jednotka	veličina
$A$	[%]	Tažnost
$E$	[Pa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
$F$	[N]	Síla
$G$	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku (Coulombův modul)
$K$	[Pa]	Objemový modul pružnosti
$L$	[m]	Měrná délka zkušebního tělesa
$M_o$	[Nm]	Ohybový moment
$R_e$	[Pa]	Mez kluzu
$R_m$	[Pa]	Mez pevnosti
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Průřezová plocha zkušebního tělesa
$U$	[J]	Deformační energie
$W_o$	[m <sup>3</sup> ]	Modul průřezu
$Z$	[%]	Kontrakce
$\epsilon$	[-]	poměrné prodloužení
$\epsilon_{sk}$	[-]	skutečné poměrné prodloužení
$\lambda$	[J/m <sup>3</sup> ]	Hustota deformační energie
$\nu$	[-]	Poissonovo číslo
$\sigma$	[Pa]	smluvní napětí
$\sigma_{sk}$	[Pa]	skutečné napětí

---



# Seznam použitých zkratek a pojmů

**CAD:** počítačem podporované navrhování (Computer Aided Design)

**CCD:** elektronická součástka snímající obrazové informace (Charged Coupled Device)

**DIC:** digitální korelace obrazu (Digital Image Correlation)

**DPI:** počet bodů na palec (Dots Per Inch)

**fps:** počet snímků za sekundu (Frames Per Second)

**GigE vision:** standard pro vysokorychlostní přenos snímků (až 125 MB/s)

**LinuxCNC:** softwarový systém sloužící k počítačovému řízení např. obráběcích strojů

**Matlab:** matematický software

**OpenCV:** knihovna programovacích funkcí pro manipulaci s obrazem v reálném čase

**open-source:** označení programů, jejichž zdrojový kód je přístupný dalším vývojářům

**pixel:** plošný element obrazu, dále nedělitelný

**real-time:** označení programů, které pracují v reálném čase, resp. s minimální dobou odezvy

**Python:** programovací jazyk

**SolidWorks:** 3D CAD software pro navrhování výrobků a modelů

**STL:** souborový formát používaný pro 3D tisk (STereoLitography)

**synklastický:** kupolovitý

**telecentrický objektiv:** objektiv snímající pouze paprsky přicházející rovnoběžně s optickou osou

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>15</b>
<b>I</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Auxetické struktury</b>	<b>18</b>
2.1	Poissonovo číslo . . . . .	18
2.2	Historický vývoj . . . . .	20
2.3	Strukturální modely . . . . .	21
2.3.1	Šestiúhelníkové elementy . . . . .	22
2.3.2	Čtyřúhelníkové elementy . . . . .	24
2.3.3	Trojúhelníkové elementy . . . . .	26
2.4	Výroba . . . . .	27
2.4.1	Modifikace neauxetických struktur . . . . .	27
2.4.2	Stereolitografie . . . . .	29
2.4.3	Selektivní laserové spékání/tavení . . . . .	30
2.4.4	Mnohatryskové modelování . . . . .	30
2.5	Aplikace auxetických struktur . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Zkoušení mechanických vlastností materiálu</b>	<b>34</b>
3.1	Kvazi-statické zkoušky . . . . .	35
3.1.1	Zatěžovací zařízení . . . . .	35

3.1.2	Diagram napětí – deformace . . . . .	36
3.1.3	Zkouška tahem . . . . .	37
3.1.4	Zkouška tlakem . . . . .	40
3.1.5	Zkouška ohybem . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Digitální korelace obrazu</b>	<b>43</b>
4.1	Základní principy 2D DIC . . . . .	44
<b>II</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Popis experimentu</b>	<b>50</b>
5.1	Příprava vzorků . . . . .	50
5.1.1	Vybrané geometrie . . . . .	51
5.1.2	Výroba . . . . .	52
5.2	Experimentální zařízení . . . . .	53
5.3	Postup měření . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení experimentu</b>	<b>57</b>
6.1	DIC . . . . .	58
6.2	Vyhodnocovací skript . . . . .	59
6.2.1	Vstupní data . . . . .	60
6.2.2	Popis skriptu . . . . .	60
6.2.3	Zadání vstupních parametrů . . . . .	61
6.2.4	Zpracování vstupních dat pomocí funkce <code>AuxStressStrain</code> . . . . .	62
6.2.5	Diagram skutečné napětí – skutečná deformace . . . . .	63
6.2.6	Výpočty . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Experimentální výsledky</b>	<b>68</b>
7.1	<i>Cut missing-rib</i> struktura . . . . .	68
7.2	2D <i>inverted honeycomb</i> struktura . . . . .	70

7.3	3D <i>inverted honeycomb</i> struktura . . . . .	72
7.4	Shrnutí výsledků . . . . .	74
<b>8</b>	<b>Závěr</b> . . . . .	<b>77</b>
8.1	Zhodnocení výsledků . . . . .	77
8.2	Další vývoj . . . . .	78
	Literatura . . . . .	79

# Seznam obrázků

2.1	Deformační chování běžného a auxetického materiálu . . . . .	20
2.2	Schéma neauxetické a auxetické šestiúhelníkové buňky . . . . .	22
2.3	Deformační chování struktur s šestiúhelníkovými buňkami . . . . .	23
2.4	Struktura s buňkami typu <i>chiral honeycomb</i> . . . . .	24
2.5	Deformační chování auxetické struktury složené z tuhých čtverců . . . . .	25
2.6	Cut missing-rib struktura . . . . .	26
2.7	Deformační chování auxetické struktury z tuhých trojúhelníků . . . . .	26
2.8	Idealizovaná 3D <i>inverted (re-entrant)</i> buňka . . . . .	28
2.9	Schéma digitálního mikro-zrcadlového zařízení . . . . .	29
3.1	Diagramy napětí – deformace . . . . .	37
3.2	Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku tahem . . . . .	38
3.3	Schéma tříbodového a čtyřbodového ohybu . . . . .	42
4.1	Schéma experimentu vyhodnocovaného metodou DIC . . . . .	44
4.2	Vzorek s vyznačenou korelační mřížkou . . . . .	46
5.1	Geometrie elementárních buněk vzorků struktur . . . . .	51
5.2	Vizualizace vzorků jednotlivých struktur . . . . .	52
5.3	Zatěžovací a snímací zařízení použité při experimentu . . . . .	55
6.1	Význam volených parametrů DIC . . . . .	59
6.2	Vývojový diagram vyhodnocovacího skriptu <code>AuxEvaluation</code> . . . . .	61

6.3	Dialogové okno pro nastavení požadovaných parametrů . . . . .	62
6.4	Vývojový diagram funkce <code>AuxStressStrain</code> . . . . .	64
6.5	Odhad lineární oblasti diagramu . . . . .	65
6.6	Výběr lineární oblasti diagramu . . . . .	66
6.7	Zobrazení vybrané lineární oblasti . . . . .	66
7.1	Diagramy $\sigma_{sk} - \epsilon_{sk}$ pro vzorky <i>cut missing-rib</i> struktury . . . . .	69
7.2	Průběh Poissonovy funkce u vzorků <i>cut missing-rib</i> struktury . . . . .	70
7.3	Diagramy $\sigma_{sk} - \epsilon_{sk}$ vzorků 2D <i>inverted honeycomb</i> struktury . . . . .	71
7.4	Průběh Poissonovy funkce u vzorků 2D <i>inverted honeycomb</i> struktury . . .	72
7.5	Diagram $\sigma_{sk} - \epsilon_{sk}$ pro vzorek 3D <i>inverted honeycomb</i> struktury . . . . .	73
7.6	Průběh Poissonovy funkce u vzorku 3D <i>inverted honeycomb</i> struktury . . .	74

# Seznam tabulek

2.1	Přehled aplikací auxetických materiálů . . . . .	33
4.1	Matematický popis základních korelačních kritérií . . . . .	47
5.1	Základní parametry vzorků jednotlivých struktur . . . . .	52
5.2	Vlastnosti materiálu VisiJet EX200 . . . . .	53
6.1	Zvolené korelační mřížky u jednotlivých vzorků struktur . . . . .	58
7.1	Tabulka výsledků . . . . .	75

# Kapitola 1

## Úvod

Již od nepaměti se lidé inspiřují přírodou a mnoho technických objevů je na této inspiraci přímo založeno. Není tomu jinak ani u uměle vyráběných porézních pevných materiálů (např. kovových pěn). Pórovitá struktura se totiž objevuje v organických konstrukcích jako jsou stonky rostlin, kmeny stromů, tělesné schránky živočichů či kosti, které jsou v důsledku ní pevné a přitom lehké. Právě z těchto důvodů jsou vyvíjeny různé pěnové materiály, jejichž použití v konstrukčních prvcích umožňuje zachování nízké hmotnosti těchto prvků za současného zvýšení jejich pevnosti a tedy i schopnosti pohlcení deformační energie. Běžně používané pěny s otevřenými či uzavřenými buňkami (včetně kovových pěn) mají však svá omezení a pro případy zatěžování extrémními způsoby, jako například výbuchy či nárazy vysokou rychlostí pohybujících se objektů, kdy je zapotřebí aplikace materiálu s relativně vysokou pevností v tlaku, není jejich použití možné nebo efektivní. Z toho důvodu je třeba zaměřit pozornost na vývoj nových materiálů.

Jedním z přístupů je vytvoření optimalizované porézní struktury vykazující záporné Poissonovo číslo [1]. Takové struktury se nazývají auxetické. Jejich deformační chování se vyznačuje tím, že příčná deformace má stejný smysl jako podélné zatížení tuto deformaci vyvolávající, což teoreticky zvyšuje množství deformační energie, které jsou tyto materiály schopny pohltit. Jejich další jedinečné vlastnosti, jako je například tendence k syn-



klastickému zakřivení, zvýšená odolnost vůči povrchovému poškození či proměnná velikost pórů, je předurčující k využití v různých oblastech, mezi které se řadí biomedicínské inženýrství, stavební inženýrství, strojírenství či sensorika [2]. Přirozeně se auxetické materiály vyskytují spíše unikátně, vyvíjejí a vyrábějí se tedy uměle za účelem využití jejich jedinečných vlastností.

Tato práce se zmíněnou tematikou zabývá ve dvou hlavních částech a to v teoretické a experimentální části. První ze zmiňovaných si klade za cíl seznámit čtenáře s potřebnou teorií týkající se řešené problematiky a je rozdělena do tří kapitol, přičemž první referuje o auxetických strukturách, jejich vlastnostech, historickém vývoji, základních strukturálních modelech sloužících jako podklad pro jejich přímou výrobu, metodami výroby a nakonec o několika konkrétních příkladech jejich použití. Druhá z kapitol je věnována mechanickým zkouškám materiálu, na základě kterých lze popsat vlastnosti vytvořené struktury. Poslední kapitola pak přináší informace o metodě vyhodnocování deformací vzorku materiálu podrobenému mechanické zkoušce založené na digitální korelaci obrazu.

Cílem experimentální části je popis deformačního chování známých auxetických struktur a zhodnocení jejich schopnosti pohltit deformační energii. Za tímto účelem byly vyrobeny a testovány vzorky určitých vybraných struktur vykazujících záporné Poissonovo číslo v jedné rovině či v celém objemu. Celý proces prováděného experimentu a jeho vyhodnocení je popsán v jednotlivých kapitolách experimentální části věnujících se postupně popisu přípravy vzorků, procesu zatěžování, metodám vyhodnocení naměřených dat a zhodnocení dosažených výsledků. Mezi hlavní záměry práce lze zahrnout též zhodnocení vhodnosti použité metody výroby auxetických struktur, stejně jako způsob testování a vyhodnocení jejich deformačního chování, za účelem verifikace analytických a numerických modelů.

# Část I

## Teoretická část

# Kapitola 2

## Auxetické struktury

Výraz auxetický materiál byl zaveden roku 1991, přičemž pojem auxetický vychází z řeckého slova *auxetos* odkazujícího na nárůst šířky či objemu v závislosti na kladném protažení. Dále se lze setkat i s označením *anti-rubber material* vyjadřujícím opačnou povahu oproti pryžovým materiálům, či *dilatational material*, které opět odkazuje na deformační charakter materiálu ve smyslu „rozpínání se“. Všechna tato označení přesně vystihují základní deformační vlastnost těchto materiálů, v důsledku které jejich Poissonovo číslo nabývá záporných hodnot. Tento charakteristický znak je dán strukturou materiálu a na základě teorie elasticity lze tvrdit, že dokonce bez ohledu na to, jakou velikost mají jednotlivé póry. Auxetickou strukturu je možné rozpoznat tedy i na molekulární úrovni (například (1,4)-reflexyne) [3]. V této práci bude ovšem pozornost věnována auxetickým strukturám s makrobuňkami velikosti v řádu jednotek milimetrů.

### 2.1 Poissonovo číslo

Jak bylo již výše zmíněno, pro auxetické struktury nabývá Poissonovo číslo  $\nu$  záporných hodnot. Tato konstanta charakterizující deformační chování je dána záporným podílem příčného poměrného prodloužení (kolmé na směr zatěžování) a podélného poměrného prodloužení (ve směru zatěžování) vzorku materiálu. Pokud tyto deformace označíme postupně

$\epsilon_x$  a  $\epsilon_y$ , potom pro Poissonovo číslo  $\nu_{yx}$  platí následující vztah:

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.1)$$

přičemž hodnota tohoto poměru má vliv na další charakteristiky materiálu. Obecně je deformační chování materiálu v elastické oblasti popsáno ještě dalšími třemi základními konstantami: modul pružnosti v tahu (též Youngův modul)  $E$ , modul pružnosti ve smyku (též Coulombův modul)  $G$  a objemový modul pružnosti  $K$ . Pro izotropický materiál, tzn. materiál, jehož vlastnosti jsou ve všech směrech shodné, platí mezi těmito charakteristikami vztahy 2.2 – 2.5 [4].

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} = \nu \quad (2.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

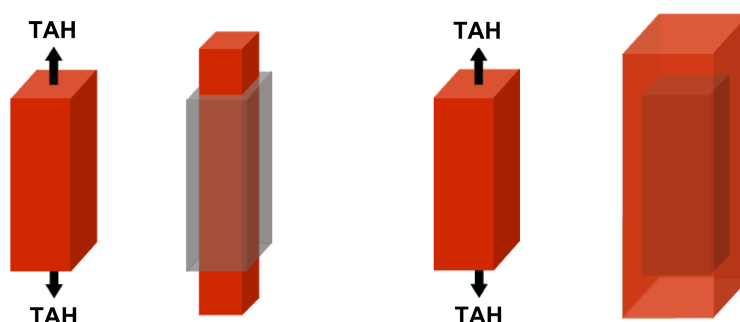
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.4)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2.5)$$

Teoreticky je rozsah přípustných hodnot Poissonova čísla pro izotropický materiál od -1 do 0,5, Reálně však pro drtivou většinu materiálů nabývá kladných hodnot. V takovém případě z definičního vztahu vyjádřeného rovnicí 2.1 vyplývá, že při podélném protažení dochází k příčnému stažení a naopak při podélném stlačení dochází k příčnému roztažení vzorků. Pro běžné porézní pevné látky (například polymerní pěny) nabývá tato konstanta hodnoty přibližně od 0,1 do 0,4 [5, 6].

Záporná hodnota Poissonova čísla odpovídá takovému deformačnímu chování, při kterém se na základě podélného protažení vzorek materiálu příčně roztáhne a naopak při podélném

stlačení se příčně stáhne. Takové materiály se přirozeně téměř nevyskytují. Znamé případy jsou vždy spojeny s přítomností vysokého stupně anizotropie v látce, v důsledku čehož se efekt záporného Poissonova čísla projeví pouze v některých směrech [6]. Auxetické struktury jsou tedy vyráběny zejména uměle za účelem využití jejich jedinečných vlastností. Rozdíl mezi deformačním chováním materiálu s kladným a záporným Poissonovým číslem je patrný na obrázku 2.1. Lze si povšimnout různého smyslu deformací ve směrech kolmých na směr zatěžování.



Obrázek 2.1: Rozdíl deformačního chování běžného (vlevo) a auxetického materiálu (vpravo) při namáhání tahem, převzato z [2]

## 2.2 Historický vývoj

Poprvé byla struktura se záporným Poissonovým číslem popsána koncem 20. let 20. století na monokrystalu železného pyritu, přičemž specifické deformační chování bylo přisuzováno krystalickému dvojčatění. Později, v 70. a 80. letech téhož století, bylo na tuto tematiku publikováno několik dalších odborných prací, které prokázaly, že v přírodních látkách se záporné Poissonovo číslo vyskytuje spíše jen v unikátních případech [1].

Důležitým mezníkem je ve zmiňované problematice rok 1987, tedy rok, kdy byla poprvé uměle vyrobena struktura vykazující záporné Poissonovo číslo. Postup výroby spočíval v modifikaci běžně dostupné polymerní pěny s otevřenými buňkami (viz kap. 2.4.1) a u vý-

sledné struktury bylo určeno Poissonovo číslo nabývající hodnoty  $\nu = -0,7$  [6]. V následujících letech byly auxetické materiály vyráběny obvykle obdobným způsobem, který ovšem poskytuje relativně nízkou úroveň kontroly nad mechanickými a strukturálními vlastnostmi koncového produktu.

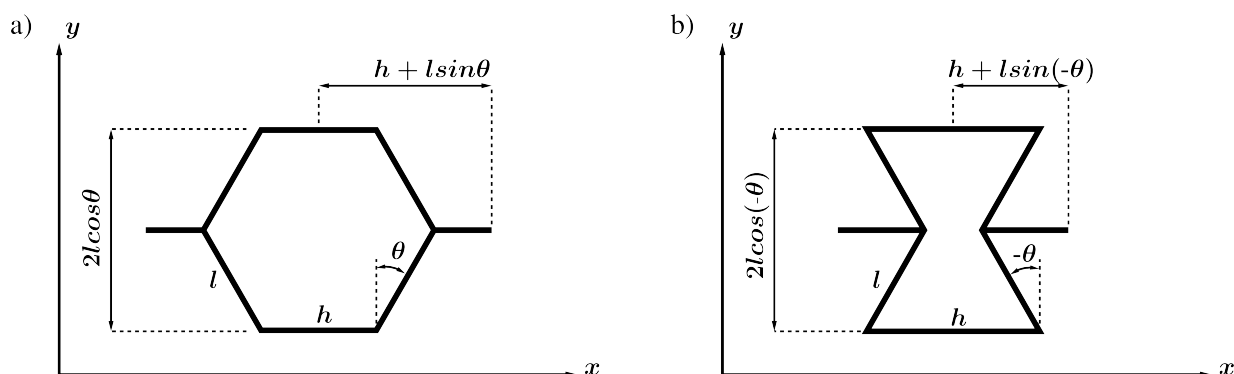
V současnosti je pozornost v souvislosti s auxetiky zaměřena na vývoj a přímou výrobu struktur v závislosti na požadovaných vlastnostech, přičemž jsou využívány známé geometrické modely. Tyto modely vznikaly prvotně pro analytický popis deformačního chování auxetických struktur vyrobených modifikací neauxetické pěny. Vždy byly však založeny na jisté úrovni idealizace. Teprve modernější výrobní technologie, například 3D tisk resp. aditivní výroba, umožňují vytvořit strukturu přesně odpovídající vybranému modelu. Volbou základních parametrů, jako jsou rozměry či vzájemné úhlové natočení jednotlivých elementů ve struktuře, lze pak dosáhnout celého spektra výsledných charakteristik.

## 2.3 Strukturální modely

Modely popisující auxetické struktury lze jednoduše členit na dvoudimenzionální (2D) a třídímní (3D). 2D modely auxetických struktur standardně vycházejí ze základních geometrických útvarů, například šestiúhelníků, čtyřúhelníků či trojúhelníků. Elementy těchto tvarů jsou modifikovány nebo vzájemně orientovány tak, aby výsledné uskupení vykazovalo deformační chování odpovídající zápornému Poissonovu číslu. 3D modely často vznikají prostorovým uspořádáním a propojením elementárních auxetických buněk popsanych 2D modely, například tak, že tvoří povrch dvanáctistěny. Auxetickou povahu také slibují 3D modely založené na prostorovém uspořádání kulovitých elementů, například *ball-link* model či *thin shell* model, blíže popsane v [7]. Experimentální část této práce se zabývá zkoumáním deformačního chování struktur vzniklých na základě 2D modelů, a proto budou dále přiblíženy základní druhy pouze těchto modelů, které vycházejí z různých geometrických elementů.

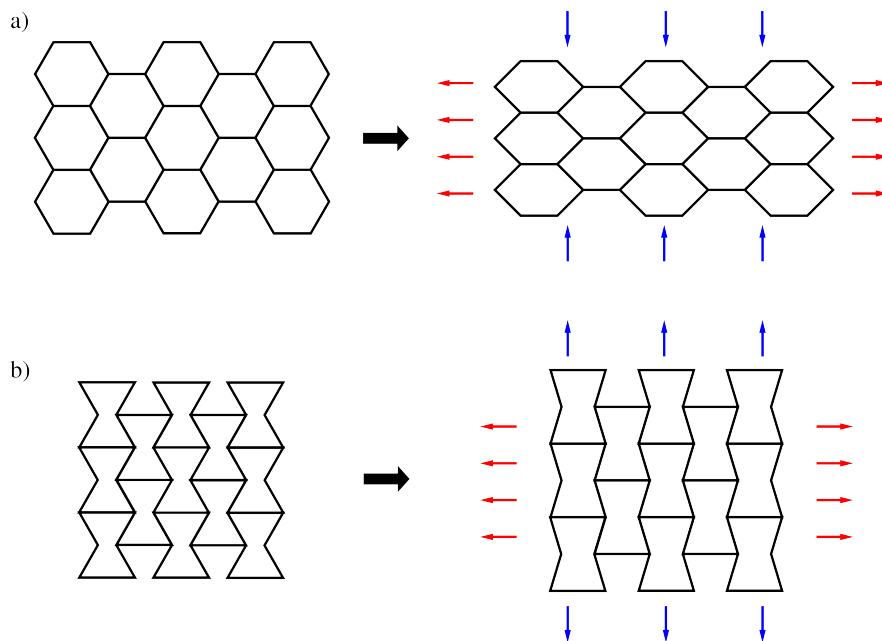
### 2.3.1 Šestiúhelníkové elementy

Struktury s šestiúhelníkovými buňkami lze pozorovat i u přírodních materiálů. Stačí si představit například včelí plástev, ve které mají jednotlivé buňky tvar pravidelných šestiúhelníků, viz obr. 2.2a). Na základě této asociace se pro označení takových buněk vžil pojem *honeycomb*. Buňky tvaru obyčejného pravidelného šestiúhelníku však ještě netvoří auxetickou strukturu. Aby bylo dosaženo deformačního chování typického pro auxetika musí být takové buňky vhodným způsobem modifikovány. Typicky dochází ke změně velikosti vnitřních úhlů, přičemž se ve výsledné buňce nacházejí i tzv. konkávní úhly, tedy úhly větší než  $180^\circ$ , viz obr. 2.2b). V důsledku toho strany, které tyto úhly svírají, vstupují do vnitřního prostoru buňky, což se v používané terminologii vystihuje pojmy *inverted* či *re-entrant* v názvu buněk. Vzniká tak ustálený výraz *inverted (re-entrant) honeycomb*.



Obrázek 2.2: a) neauxetická šestiúhelníková buňka „*honeycomb*“, b) auxetická šestiúhelníková buňka „*inverted (re-entrant) honeycomb*“

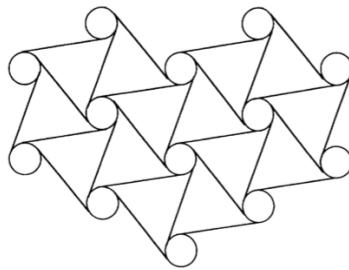
Analytické modely popisující deformační chování struktury vzniklé periodickým uspořádáním šestiúhelníkových elementů předpokládají tři různé druhy deformací vznikajících na jednotkové buňce, a to ohyb, prodloužení a vzájemné pootočení stran v bodech jejich spojení. Ve všech případech závisí přesné hodnoty materiálových charakteristik struktury na poměru velikosti dílčích rozměrů  $h$  a  $l$  jednotkové buňky a na velikosti úhlu  $\theta$  [8], viz obr. 2.2. Z toho vyplývá, že vhodnou volbou těchto parametrů můžeme teoreticky vyrobit struktury s konkrétními požadovanými vlastnostmi. Obecně odpovídá smysl deformací neauxetické a auxetické šestiúhelníkové buňky již zavedené teorii. Pro lepší představu je deformační chování struktur vzniklých z těchto buněk na obr. 2.3. Pokud obě shodně namáháme tahem v horizontálním směru (vyjádřeno červenými šipkami), ve směru vertikálním dochází k deformacím, které mají u neauxetické a auxetické struktury opačný smysl (vyjádřeno modrými šipkami).



Obrázek 2.3: Deformační chování struktury s šestiúhelníkovými a) neauxetickými a b) auxetickými elementárními buňkami při tahovém namáhání v horizontálním směru (vyjádřeno červenými šipkami)



Další variantou auxetické buňky vycházející z šestiúhelníkového tvaru, je tzv. *chiral honeycomb*. Výraz chirální v tomto případě vystihuje strukturu, která se neztotožňuje se svým zrcadlovým obrazem [9]. Periodické uspořádání jednotlivých buněk *chiral honeycomb* tvořící auxetickou strukturu je na obrázku 2.4. Deformace, ke kterým v této struktuře dochází jsou rotace kruhovitých elementů a ohyb rovných částí spojujících tyto elementy. Dle analytického modelu lze výsledné deformační chování struktury opět optimalizovat vhodnou volbou dílčích rozměrů či úhlů natočení elementů ve struktuře [10].

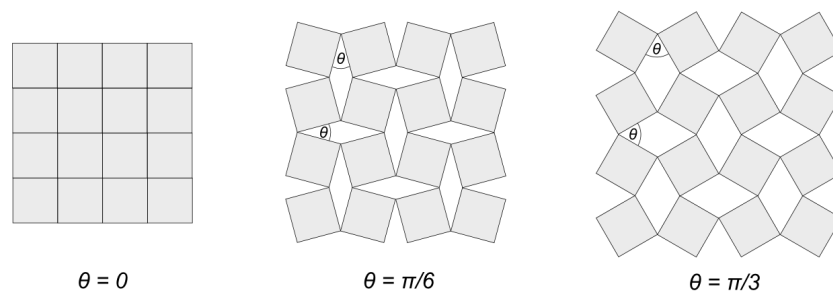


Obrázek 2.4: Struktura obsahující buňky typu *chiral honeycomb*

### 2.3.2 Čtyřúhelníkové elementy

V porovnání s předchozím přístupem se u modelů založených na čtyřúhelnících zpravidla liší princip rozložení materiálu. Zmiňovanými čtyřúhelníkovými elementy nejsou myšleny přímo buňky porézní struktury (ačkoliv mívají také tvar čtyřúhelníku), ale bloky tuhého materiálu mezi kterými póry vznikají.

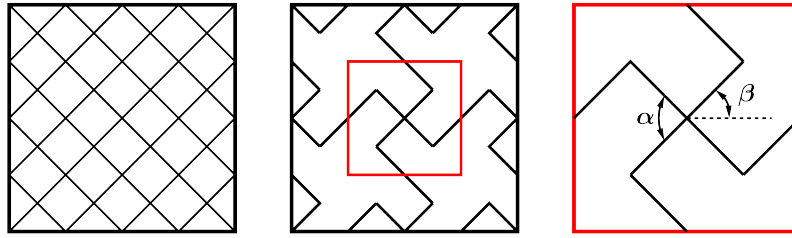
Jedno z možných řešení využívá stejně veliké tuhé čtverce, které jsou spojené v rozích pod určitým úhlem vzájemného natočení v rozsahu od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Spojení mezi elementy umožňuje rotaci, na základě které se v důsledku zatížení mění velikost a tvar pórů ve struktuře tak, že je splněna podmínka auxeticity, viz obr. 2.5. V používané anglické terminologii se tato struktura nazývá *rotating-squares*, což souvisí s podstatou deformace, ke které dochází, tedy rotaci čtverců [11].



Obrázek 2.5: Deformační chování auxetické struktury založené na vzájemné rotaci tuhých čtvercových elementů shodných rozměrů

Alternativním přístupem může být i použití čtverců, které mají navzájem různé rozměry, přičemž podstata jejich uspořádání i deformace je totožná jako u čtverců shodných rozměrů. Dalšími variantami je obdobné uspořádání tuhých obdélníků, kosočtverců či rovnoběžníků, které mohou mít navzájem opět buď shodné či různé rozměry. Deformační chování je vždy založeno na stejném principu jako u rotujících čtverců. Z analytických modelů vyplývá, že velikost deformací a tudíž i hodnota Poissonova čísla závisí na velikostech dílčích rozměrů zmíněných útvarů a úhlu jejich vzájemného natočení [12]. Vhodnou volbou těchto parametrů lze tedy teoreticky vytvořit strukturu na základě předem stanovených požadovaných vlastností.

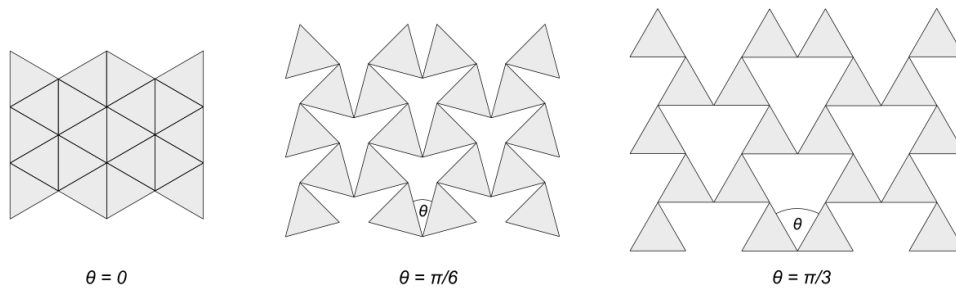
Neopomenutelným modelem založeným na čtyřúhelníkových buňkách je také tzv. *missing-rib foam model*. V tomto případě se vracíme k původnímu pojetí základního geometrického útvaru jako tvaru samotné buňky. Jedná se tedy o mřížovitou strukturu, která vzniká na základě periodického uspořádání buněk tvaru čtverců (případně kosočtverců) potočených o úhel  $45^\circ$ . Aby bylo dosaženo auxetické povahy výsledné struktury, je nutné z tohoto uspořádání ještě odstranit vybraná „žebra“ představující ohraničení buněk, viz obr. 2.6. Z analytického modelu této struktury vyplývá, že změnou úhlu mezi stranami buněk lze ovlivnit výsledné charakteristiky deformačního chování. Budeme-li tedy vycházet z různých kosočtverců, výsledné hodnoty příslušných konstant budou také různé [13].



Obrázek 2.6: Podstata vzniku struktury cut missing-rib a její elementární buňka (vpravo)

### 2.3.3 Trojúhelníkové elementy

Geometrické modely využívající trojúhelníkové elementy vzešly z modelů rotujících čtverců. Základním předpokladem pro deformační chování odpovídající zápornému Poissonovu číslu je tedy spojení jednotlivých tuhých trojúhelníků umožňující rotaci viz obr. 2.7. Z analytického modelu deformačního chování takto vzniklé struktury vyplývá, že materiálové charakteristiky opět závisí na velikosti dílčích rozměrů a úhlu vzájemného pootočení trojúhelníků [14].



Obrázek 2.7: Deformační chování struktury s rotujícími tuhými trojúhelníkovými elementy

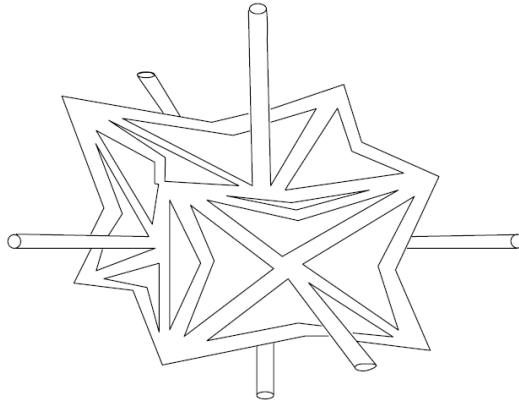
## 2.4 Výroba

Aby bylo možné využít potenciál, který se nabízí v auxetických materiálech, je nutné vyrobit takovou strukturu, která co nejvíce odpovídá některému z geometrických modelů. První přístupy výroby pěn se záporným Poissonovým číslem spočívaly v modifikaci neauxetických pěn, přičemž však nebylo možné zcela ovlivnit výsledný tvar buněk. Proto jsou v analytických modelech těchto struktur základní elementy do značné míry idealizovány. Teprve pozdější technologie zahrnující různé metody 3D tisku, respektive aditivní výroby, například stereolitografii (SLA), selektivní laserové spékání (s označením SLS z anglického *Selective Laser Sintering* nebo SLM z anglického *Selective Laser Melting*) či mnohatrýskové modelování neboli *multi-jet-modelling* (MJM) umožnily přímou výrobu struktury na základě předem vybraného modelu.

### 2.4.1 Modifikace neauxetických struktur

Historicky první auxetická struktura byla uměle vyrobena roku 1987 na Wisconsinské univerzitě Rodericem Lakesem a jeho kolegy právě modifikací struktury neauxetické. Vzorky běžně dostupné polymerní pěny s otevřenými buňkami byly po přibližně 30% kompresi ve třech ortogonálních směrech vloženy do formy, zahřáty na teplotu skelného přechodu a následně ochlazeny na pokojovou teplotu. Obdobnému procesu, který však nezahrnoval zahřívání, byly při pokojové teplotě vystaveny také vzorky kovové pěny. V obou zmínovaných případech došlo k modifikaci buňkových elementů struktury tak, že jednotlivá „žebra“ vstupují a znovu vystupují do/z vnitřního prostoru buňky. Takové buňky se, jak již bylo zavedeno v kapitole 2.3.1, označují pojmem *inverted* resp. *re-entrant* [6]. Idealizovaný buněčný element tohoto typu je na obrázku 2.8.

V 90. letech byl popsán postup rozvíjen i dalšími vědeckými týmy. Vznikl tak například výrobní proces zahrnující vyjmutí vzorku z formy ještě před jeho vychladnutím, za účelem rychlého protažení a opětovného navrácení do formy. Tímto bylo omezeno propojení jed-



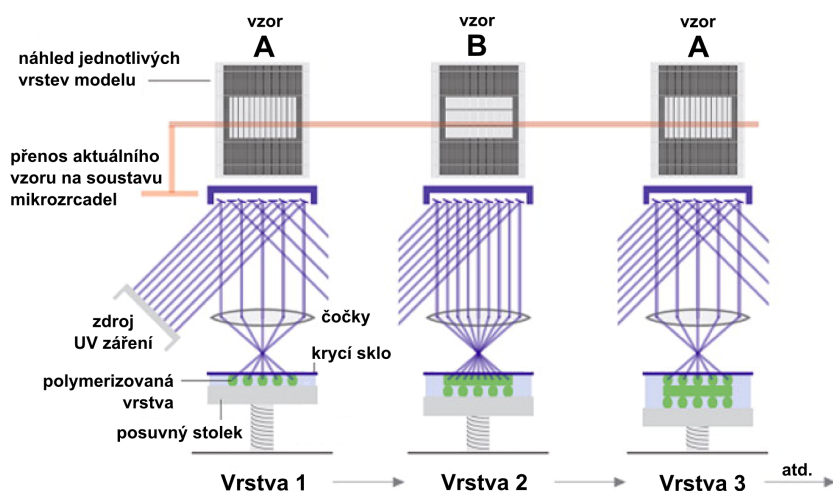
Obrázek 2.8: Idealizovaný model 3D *inverted (re-entrant)* buňky [11]

notlivých „žeber“ ve struktuře [13]. Nejnovějším trendem v tomto přístupu je použití rozpouštědel namísto procesu zahřívání. Vzorek pěny je při takovém postupu nejprve navlhčen vhodným rozpouštědlem a následně vystaven objemové kompresi opět přibližně o 30%. Po důkladném vyschnutí je vzorek uvolněn a v jeho struktuře lze pozorovat *re-entrant* elementy [2].

Všemi zmíněnými postupy lze sice vyrobit auxetické materiály, ale úroveň kontroly nad vznikajícími strukturami je vždy relativně malá. V důsledku toho je také náročné analyticky přesně popsat deformační chování takto vzniklých struktur, protože jejich geometrické modely jsou vždy vytvořeny s určitou mírou idealizace. Bylo též prokázáno že těmito postupy nevzniká auxetická struktura trvale, ale po určité době (dokonce v řádu týdnů) se buňky navracejí do původního tvaru [15]. Z těchto důvodů je výhodnější využít jiných metod výroby, které umožňují vytvořit stálou strukturu na základě předem stanoveného modelu.

## 2.4.2 Stereolitografie

Jedna z metod používající se pro přímou výrobu auxetických struktur je stereolitografie. Její princip spočívá v postupném vytvrzování tenkých vrstev (cca 100  $\mu\text{m}$ ) fotopolymerního materiálu ultrafialovým (UV) zářením podle vzoru definovaného počítačově vytvořeným modelem struktury. Vytvrzování materiálu je možné realizovat dvěma různými způsoby, a proto hovoříme buď o laserové stereolitografii nebo stereolitografii digitální projekcí. První ze zmíněných způsobů je založen na generování UV laserového paprsku, který je počítačem zaměřován do míst, kde má být vytvrzen materiál. Při druhém způsobu je využívána projekce pomocí digitálního mikro-zrcadlového zařízení. Podle řezu modelu odpovídajícího aktuálně vytvrzované vrstvě dochází na tomto zařízení k pootočení odpovídajících mikrozrcadel rozmístěných do plochy o určitém rozlišení, čímž jsou usměrnovány paprsky dopadajícího UV záření. Pro lepší představu je schéma tohoto zařízení a naznačení postupu výroby na obrázku 2.9. Při tvorbě složitějších tvarů s převýšenými částmi či většími dutinami je při této metodě nutné využít tzv. dočasných podpor. To znamená, že je třeba vytvářet bloky vytvrzeného materiálu i v místech, kde ve výsledku být nemá, a ty je proto třeba následně odstranit, což může být při tvorbě složitějších struktur velmi obtížné [16, 17].



Obrázek 2.9: Schéma digitálního mikro-zrcadlového zařízení, převzato z [17]

### 2.4.3 Selektivní laserové spékání/tavení

Selektivní laserové spékání/tavení je metoda, při níž dochází k postupnému tavení jemných vrstev práškového materiálu (například plastu, kovu, keramiky nebo skla) laserovým paprskem. Přesnost produktu přitom závisí nepřímo úměrně na tloušťce těchto vrstev. Má-li být tedy dosaženo co nejvyšší přesnosti, musí být vrstva prášku co nejtenčí. Samotný výrobek vzniká podle počítačového 3D modelu konvertovaného do standardního formátu STL, ve kterém je 3D model reprezentován sítí trojúhelníků s orientovanými normálami. V každém kroku tisku je prášek materiálu nanesen na celou plochu stavěcí platformy, ale laser ho taví pouze v místech odpovídajících příslušnému řezu v modelu. Tím se při tvorbě porézních struktur eliminuje potřeba dočasných podpor [18].

### 2.4.4 Mnohatryskové modelování

Technologie mnohatryskového modelování neboli *multijet-modelling* se v oblasti 3D tisku řadí mezi ta nejpokročilejší řešení. Tisková hlava používaného zařízení obsahuje velké množství trysek, z nichž je nanášen materiál a pohybuje se pouze v jednom z horizontálních směrů, čímž pokrývá celou pracovní plochu. Platforma, na kterou je materiál nanášen, se naopak pohybuje vertikálně směrem dolů vždy o šířku jedné nanášené vrstvy. Výroba struktury opět probíhá po jednotlivých vrstvách odpovídajících počítačovému modelu. Nespornou výhodou této metody je, že pro tvorbu dočasných podpor využívá voskového materiálu, který je nanášen současně s hlavním stavebním materiálem vytvářené konstrukce. Tím bývá opět UV vytvrditelný fotopolymer vhodný pro 3D tisk ve vysokém rozlišení. Pohyblivá hlava s tryskami proto obsahuje též zdroj UV záření, kterým je téměř okamžitě po nanesení materiál vytvrzován. Jelikož je teplota tání voskového materiálu nižší než použitého fotopolymerního materiálu, je velmi snadné odstranit dočasné podpory zahřátím výsledného produktu na tuto teplotu. V důsledku toho lze vytvořit komplexní struktury s vysokou přesností [19, 20].

## 2.5 Aplikace auxetických struktur

Jedinečné vlastnosti auxetických struktur lze využít v relativně širokém spektru aplikací. Jednou z oblastí, kde nacházejí své uplatnění je biomedicínské inženýrství. Například již patentované auxetické textilie je možné použít na výrobu tzv. chytrých obvazů, které podle úrovně tlaku vyvíjeného otokem rány mohou využít své deformační mechanismy ke zvýšení dávky léčiv, za účelem urychlení procesu hojení. Významné postavení mají materiály se záporným Poissonovým číslem také v tkáňovém inženýrství, jelikož byl prokázán auxetický charakter některých tkání v lidském organismu. Jedním z příkladů je arteriální endotel, tedy tkáň pokrývající vnitřní stěny krevních i lymfatických cév a srdce. Proto je vhodné používat právě auxetické materiály pro angioplastické zásahy. Neopomenutelnou aplikací v rámci této oblasti je také konstrukce kloubních a kosterních náhrad, pro kterou mají auxetické materiály předpoklad na základě své zvýšené pevnosti při zachování relativně nízké hmotnosti [21, 35].

Jelikož dokáží auxetické materiály pohltit velké množství deformační energie, nabízí se jejich využití při výrobě různých ochranných prvků a konstrukcí, od karoserií a nárazníků vozidel po potřeby osobní ochrany jako jsou helmy a chrániče kloubů. Balistické vesty mohou být též vyráběny s auxetickými výstužemi za účelem zvýšení jejich efektivity. Bylo též prokázáno, že auxetika dokáží pohltit akustické a vibrační signály, a proto jsou vhodnými materiály pro výrobu tlumících prvků. Výhodné vlastnosti vykazují tyto materiály i při pohlcování tepelné energie, a proto je lze použít při realizaci tepelné izolace [11, 23].

Mezi další inženýrské aplikace se řadí například použití auxetických struktur k výrobě tzv. chytrých filtrů. Takové filtry se liší od těch běžných především možností snadno odstranit částice, které jsou větší než standardní velikost pórů a tudíž způsobují ucpání. Senzory a aktuátory mohou být také vytvořeny na základě auxetických struktur. Ty se v tomto případě používají jako matrice doplněné piezoelektrickými keramickými vlákny v kompozitním konstrukčním materiálu. Vlivem svého deformačního chování zvyšuje au-



xetická matrice efektivitu elektromechanické vazby snímacího zařízení, a tak se zvyšuje i jeho citlivost. Vhodné se auxetické struktury jeví též při návrhu hmoždinek. Vložení hmoždinky do zdírky může být usnadněno příčným stažením auxetického materiálu při tlakovém namáhání, a naopak vlivem příčného roztažení při tahovém namáhání lze dosáhnout vysoké odolnosti proti vyjmutí hmoždinky. Dále je možné zmínit například patentovaný návrh projektilu obsahujícího auxetickou strukturu. Ten se zakládá na kombinaci běžného a auxetického materiálu, vlivem které může být dosaženo celkově nulového Poissonova čísla. Tím se redukuje příčná expanze tohoto projektilu, a je tak usnadněn jeho průchod hlavní zbraně [11, 4].

Své využití nacházejí auxetické struktury i v textilním průmyslu. Byly navrženy a testovány textilie vyrobené s vlákny utkanými tak, že vykazují auxetický charakter a představují tak aktivní činitele. Tím je možné vytvořit tzv. inteligentní látky, které dokáží například pohlcovat zápach [23]. Auxetické pěny se jeví též vhodné pro výrobu matrací a výplní do sedadel. Analytické studie potvrzují, že auxetické pěny mohou v těchto aplikacích sloužit k prevenci proti otláčeninám a proleženinám [15, 4]. Zmíněné konkrétní případy aplikací naznačují, že auxetické materiály mají výhodné vlastnosti využitelné v mnoha různých oblastech. Pro přehlednost je stručné shrnutí i dalších možných aplikací uvedeno v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Přehled existujících a potenciálních aplikací auxetických materiálů [23]

Oblast	Aplikace
Letectví	Lopatky pro plynové turbíny, tepelná izolace, zvukové a vibrační tlumiče, panely křídel, nýty
Automobilový průmysl	Nárazníky, tlumiče, tepelná izolace, hmoždinky
Biomedicínské inženýrství	Obvazy, tlakové polštáře, dentální nitě, umělé cévy, umělá kůže, protézy, upevnění vazivových tkání
Kompozitní materiály	Vláknové výstuže
Senzorika	Piezoelektrická zařízení, hydrofony
Textilní průmysl	Funkční textilie
Osobní ochrana	Helmy, balistické vesty, chrániče kloubů

## Kapitola 3

# Zkoušení mechanických vlastností materiálu

Znalost vlastností materiálu je stěžejní pro rozhodnutí o jeho použití například k výrobě různých součástí nebo stavbě konstrukcí. Obecně lze posuzovat vlastnosti mechanické, technologické, fyzikální či chemické, konkrétně je ale nutné zabývat se především těmi, které jsou pro vybraný účel nejdůležitější. Auxetické struktury se vyznačují jedinečnými mechanickými vlastnostmi, a proto jim bude věnována další pozornost.

Mechanické vlastnosti materiálu jsou dány jeho chováním při mechanickém namáhání a kvantifikují se dílčími charakteristickými veličinami. Číselné hodnoty charakteristik jsou určovány na základě mechanických zkoušek, a proto je nutné si uvědomit, že vždy do jisté míry závisí na podmínkách zkoušky a nejsou tedy absolutními konstantami materiálu. Výsledky zkoušek nicméně slouží jako nejvhodnější podklad k určení vlastností materiálu. Ty ke své práci potřebují znát v první řadě výrobci konstrukčních či strojírenských materiálů, pro které je materiál konečným produktem a musí splňovat stanovená kritéria. Mechanické charakteristiky jsou také důležitými ukazateli pro konstruktéry, jejichž hlavní motivací je bezpečnost konstrukcí. V neposlední řadě je zde materiálový výzkum, který se na základě výsledků zkoušek snaží pochopit a vysvětlit chování materiálu [24, 25].

Mechanické zkoušky můžeme dělit podle několika kritérií:

- charakteru zatěžování (statické, kvazi-statické a dynamické)
- zjišťované vlastnosti či souboru vlastností (např. tvrdost, pevnostní vlastnosti, atp.)
- druhu namáhání (tlak, tah, ohyb, atp.)
- teploty a prostředí

Zabývat se všemi těmito druhy zkoušek by značně překročilo rozsah této práce, a z toho důvodu budou dále teoreticky přiblíženy pouze kvazi-statické zkoušky, které jsou také prakticky využity v experimentální části.

## 3.1 Kvazi-statické zkoušky

Kvazi-statické zkoušky jsou založeny na principu namáhání zkušební tělesa definovaným zatížením malými rychlostmi deformace v rozsahu cca od  $10^{-5}$  do  $10^{-1} s^{-1}$  [26]. Mezi tyto zkoušky můžeme zařadit zkoušky pevnosti (např. v tahu, tlaku a ohybu), či zkoušky tvrdosti. Cílem této práce je posouzení auxetických struktur z hlediska pevnosti, a proto je dále věnována pozornost pouze základním pevnostním zkouškám.

### 3.1.1 Zatěžovací zařízení

Nejběžněji realizovanými mechanickými zkouškami pevnosti jsou zkoušky tahem, tlakem a ohybem. K jejich provedení se využívá jednoúčelové či univerzální elektromechanické (příp. hydraulické) zařízení, které se skládá z pevného rámu a pohyblivého příčnicku. Mezi tyto dvě části je umístěn vzorek způsobem odpovídajícím vybranému druhu zkoušky.

Pohyblivý díl se posouvá a zatěžuje tak vzorek silou, jejíž velikost je zaznamenávána počítačem, který slouží též k ovládní stroje a registrování vznikající deformace na vzorku. Prodloužení resp stlačení či prohnutí vzorku je primárně snímáno z posuvu příčnicku, přesnější měření však probíhá s použitím extenzometrů či optických zařízení.

### 3.1.2 Diagram napětí – deformace

Pro provedení rozboru deformačního chování je stěžejní závislost napětí vznikajícího v zatěženém vzorku a jeho poměrné deformace. Při zkouškách však prvotně získáváme závislost působící síly a absolutního prodloužení vzorku, tedy tzv. pracovní diagram. Tyto veličiny je třeba vhodným způsobem přepočítat na ty požadované relativní, které umožňují vzájemné porovnání mechanických vlastností z jednotlivých zkoušek nezávisle na geometrii a rozměrech vzorku. Smluvní napětí  $\sigma$  a poměrná deformace  $\epsilon$  jsou určeny následujícími vztahy:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3.1)$$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

kde  $F$  je působící síla,  $S_0$  plocha původního průřezu zkušební tělesa,  $L_0$  původní měrná délka zkušební tělesa,  $\Delta L$ , dané výrazem  $L - L_0$ , vyjadřuje přírůstek délky  $L_0$  a  $L$  je měrná délka vzorku po proběhnutí zkoušky.

Smluvní napětí a poměrnou deformaci je však možné použít pouze pro malé deformace, kdy dochází jen k malým změnám rozměrů zkušební tělesa. Pro pevnostní výpočty primárně zahrnující analýzu plastické oblasti deformační odezvy materiálu, a tedy i oblast velkých deformací, je často třeba pracovat s diagramem skutečné napětí  $\sigma_{sk}$  – skutečná deformace  $\epsilon_{sk}$ . Tyto veličiny jsou postupně určeny vztahy:

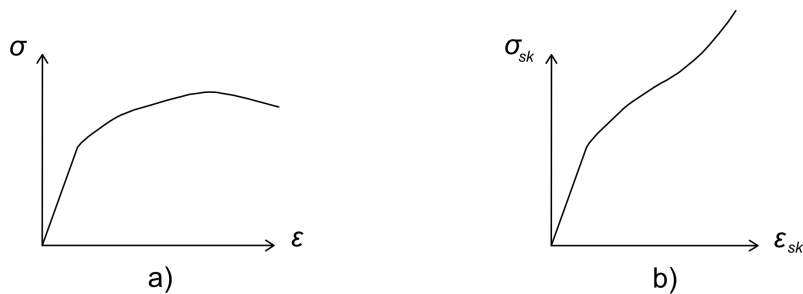
$$\sigma_{sk} = \frac{F}{S} = \sigma \frac{S_0}{S} = \sigma (1 + \epsilon) \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{sk} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \left( \frac{L}{L_0} \right) = \ln (1 + \epsilon) \quad (3.4)$$

kde  $S$  je okamžitý průřez zkušební tělesa.

Na obr. 3.1 jsou diagramy smluvní napětí – poměrná deformace a skutečné napětí – skutečná deformace. Počáteční úsek, v obou případech lineární, odpovídá elastické deformaci a je popsán Hookovým zákonem, tedy rovnicí 3.5. Youngův modul pružnosti  $E$  představuje směrnici přímky, kterou lze tímto úsekem proložit. V další části, kdy dochází k odklonu od zmíněné přímky určené dle Hookova zákona, již nastávají plastické deformace [24].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.5)$$

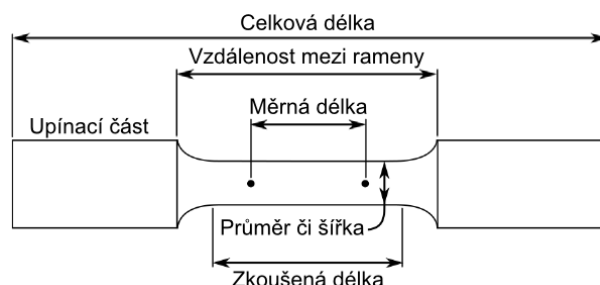


Obrázek 3.1: a) Smluvní diagram napětí – deformace, b) diagram skutečné napětí – skutečná deformace

### 3.1.3 Zkouška tahem

Tahová zkouška je nejrozšířenější kvazi-statickou zkouškou a provádí se téměř u všech technických materiálů. Základním principem je tahové namáhání zkušební tyče až do přetržení

a následně stanovení mechanických charakteristik materiálu. Na obrázku 3.2 je schéma typického zkušebního tělesa, jehož průřez je standardně obdélníkový nebo kruhový.



Obrázek 3.2: Základní schéma zkušebního tělesa pro zkoušku tahem

Na základě tahové zkoušky se vyhodnocují následující charakteristiky:

- **Mez kluzu v tahu** může být definována dvěma různými způsoby, což se odvíjí od průběhu závislosti síly na protažení tedy tzv. pracovního diagramu získávaného během zkoušky. Rozlišujeme diagramy s výraznou mezí kluzu a s nevýraznou mezí kluzu. U prvního ze zmíněných je konec elastické oblasti charakterizován různě dlouhou oblastí s konstantním průběhem síly či dokonce jejím poklesem. Dosažená síla, při které vzniká tato prodleva, se nazývá síla na mezi kluzu  $F_e$ . V druhém případě hovoříme o diagramu s nevýraznou mezí kluzu, u kterého je konec elastické oblasti ukončen při smluvní trvalé deformaci 0,2 % původní měřené délky  $L_0$ . Síla odpovídající této deformaci se nazývá smluvní síla na mezi kluzu  $F_{p0,2}$ . Mez kluzu je pak smluvní napětí, které je určeno poměrem příslušné síly na mezi kluzu a plochy původního průřezu dle následujících vztahů:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (3.6)$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (3.7)$$

- **Mez pevnosti v tahu**  $R_m$ , což je napětí, odpovídající největšímu zatížení  $F_m$ , které předchází porušení tyče, definované vztahem:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (3.8)$$

- **Tažnost**  $A$  udává poměrnou podélnou deformaci po přetržení vzorku v % dle vztahu:

$$A = \frac{(L - L_0)}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \quad (3.9)$$

- **Kontrakce**  $Z$  charakterizuje poměrné zúžení v místě lomu po přetržení v % následovně:

$$Z = \frac{(S - S_0)}{S_0} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad (3.10)$$

První dvě zmíněné charakteristiky se nazývají napěťové a jsou vyhodnoceny ze závislosti smluvního napětí a poměrné deformace. Mez kluzu představuje napětí, při kterém začíná vznikat plastická deformace. Smluvní mez pevnosti odpovídá největšímu dosaženému napětí. Pro zkoušku tahem se tato veličina často uvádí jako základní mechanická charakteristika, ale ve skutečnosti přesně nevystihuje pevnost materiálu. Smluvní mez pevnosti vyjadřuje zatížení, které je materiál schopen přenést za velmi striktních podmínek jednoosé napjatosti, a proto nevystihuje únosnost součástí vystavených víceosé napjatosti. Při výpočtu konstrukcí se tedy používá spíše první ze zmíněných napěťových charakteristik. Tažnost a kontrakce jsou naproti tomu deformační charakteristiky stanovené z rozměrů zkušebního tělesa před a po zkoušce.

Za účelem posouzení schopnosti pohlcení deformační energie materiálu se z diagramu napětí – deformace vyhodnocuje **hustota deformační energie**  $\lambda$  dle vztahu 3.11. Tato veličina představuje velikost energie vynaložené na deformaci  $\epsilon'$  jednotkového objemu materiálu.



$$\lambda = \int_0^{\epsilon'} \sigma d\epsilon \quad (3.11)$$

Odpovídajícím způsobem je z pracovního diagramu, tedy závislosti působící síly na absolutním posunutí, vyhodnocena velikost mechanické práce  $W$  vykonané vnější silou  $F$  při posuvu o velikosti  $u'$ , která též v případě konzervativní soustavy odpovídá velikosti **deformační energie**  $U$ , viz vztah 3.12. Tu lze určit též z hustoty deformační energie jejím vynásobením velikostí celkového objemu testovaného vzorku.

$$W = U = \int_0^{u'} F du \quad (3.12)$$

Pro účely srovnání dosažených hodnot u různých vzorků se však používá spíše první ze zmíněných veličin, tedy hustota deformační energie, jelikož je to hodnota, která nezávisí na konkrétních rozměrech testovaných vzorků.

### 3.1.4 Zkouška tlakem

Pro zkoušky tlakem se používá zkušební těleso tvaru válce či kvádrů o výšce  $h_0$  a počátečním průřezem  $S_0$ . To se vloží mezi tlakové čelisti zatěžovacího zařízení, z nichž jednou je vzorek přitlačován proti druhé, která zůstává v klidu. V průběhu zatěžování je zaznamenávána působící tlaková síla a velikost stlačení. Obdobně jako v předchozím případě lze na základě závislosti napětí – deformace zjištěné experimentálně stanovit následující materiálové charakteristiky:

- **Mez kluzu v tlaku**  $R_{et}$  (resp.  $R_{p0, 2t}$ ), opět odpovídající velikosti napětí, při kterém již vzniká plastická deformace. To je určeno vztahy:

$$R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0} \quad (3.13)$$

$$R_{p0,2t} = \frac{F_{p0,2t}}{S_0} \quad (3.14)$$

- **Mez pevnosti v tlaku**  $R_{mt}$ , tedy napětí při kterém dojde k porušení vzorku, určené dle vztahu:

$$R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0} \quad (3.15)$$

- **Mezní poměrné stlačení**  $A_t$  dané výrazem:

$$A_t = \frac{(h_0 - h)}{h_0} \cdot 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \quad (3.16)$$

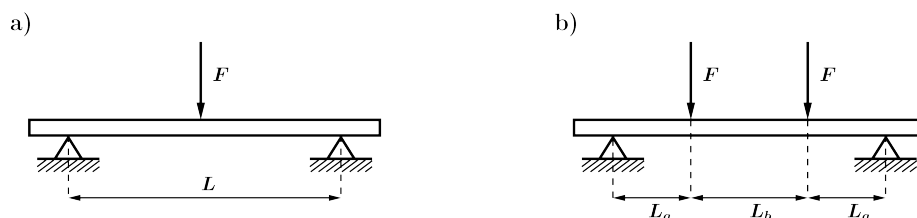
- **Mezní poměrné rozšíření**  $Z_t$  určené analogicky dle vztahu 3.9.

Při zkoušce tlakem je možné dosáhnout větších plastických deformací, než při tahové zkoušce, která je omezená okamžikem přetržení vzorku, a proto je tlaková zkouška vhodnější pro zkoumání plastické oblasti diagramu při velkých deformacích. Mimo to se též hojně používá při zkouškách materiálů, které jsou prvotně určeny pro konstrukce vystavené především namáhání v tlaku [24, 27].

### 3.1.5 Zkouška ohybem

Ohybová zkouška se používá pro hodnocení křehkých materiálů či je-li obtížné vyrobit z daného materiálu vzorky pro tahovou zkoušku. Aby mohly být po výpočet příslušných materiálových charakteristik aplikovány vztahy dle Bernoulliho teorie štíhlých nosníků, má zkušební těleso nejčastěji tvar štíhlého kvádrů (příp. tyče kruhového průřezu). Toto těleso je v zatěžovacím stroji umístěno na dvě pevné podpory a zatěžování je realizováno ve

stejném režimu jako při tlakové zkoušce. Pohyblivou částí stroje je vzorek ohýbán jedním trnem uprostřed (tříbodový ohyb) či dvěma trny umístěnými symetricky ke středu vzorku (čtyřbodový ohyb) viz obr. 3.3 [24].



Obrázek 3.3: Schéma zatěžování vzorků materiálu při a) tříbodovém ohybu, b) čtyřbodovém ohybu

Hlavním cílem ohybové zkoušky je stanovení **pevnosti v ohybu**, jež je dána vztahem:

$$R_{mo} = \frac{M_{o\max}}{W_0}, \quad (3.17)$$

kde  $M_{o\max}$  je maximální ohybový moment, určený v případě tříbodového ohybu vztahem 3.18 a 3.19 pro ohyb čtyřbodový.  $W_0$  je modul průřezu určený rovnicí 3.20 pro obdélníkový průřez výšky  $h$  a šířky  $b$  a 3.21 pro kruhovou tyč s průměrem  $d$ .

$$M_{o\max} = \frac{F \cdot L}{4} \quad (3.18)$$

$$M_{o\max} = F \cdot L_a \quad (3.19)$$

$$W_{o,\text{obdélík}} = \frac{bh^2}{6} \quad (3.20)$$

$$W_{o,\text{kruh}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (3.21)$$

# Kapitola 4

## Digitální korelace obrazu

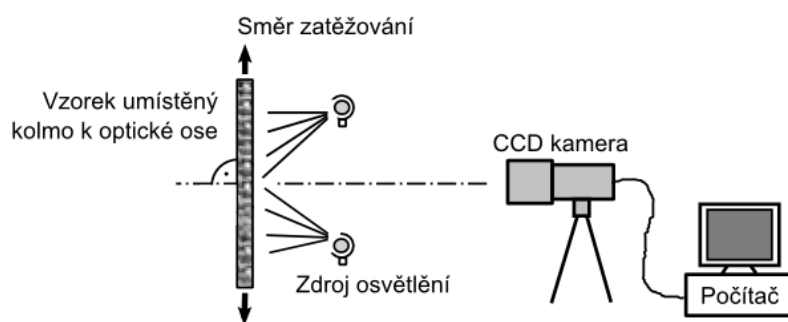
Digitální korelace obrazu (dále jen DIC z anglického *digital image correlation*) je bezkontaktní měřicí metoda používající se k vyhodnocení deformace vzorku při mechanických zkouškách. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.1, vznikající deformaci na zatěžovaném vzorku materiálu je možné registrovat pomocí optických zařízení a právě toho tato metoda využívá. Jejimi základními principy jsou zpracování obrazu a numerické výpočty, na základě kterých je určeno pole posunutí určitých bodů na snímaném povrchu vzorku.

Historicky začal vývoj této metody v 80. letech minulého století na *University of Southern Carolina*. V následujících letech poté docházelo k jejímu postupnému zdokonalování především za účelem redukování složitosti výpočtů a dosažení vysoké přesnosti při stanovení deformací. Nejběžněji používanou variantou se pak stala dvoudimenzionální (2D) DIC metoda využívající jedno fixní optické zařízení (fotoaparát, kamera), čímž je však umožněno měření pouze rovinné deformace na planárním povrchu vzorku. Pokud má měřený objekt zakřivený povrch, či je-li předpokládána výrazná prostorová deformace, je třeba využít třídimenzionální (3D) DIC metodu, založenou na binokulární stereovizi [28, 29]. Dále bude přiblížen teoretický základ prvního ze zmiňovaných přístupů, jelikož odpovídá metodě použité též v experimentální části této práce.

## 4.1 Základní principy 2D DIC

Implementace 2D DIC zahrnuje tři základní kroky, a to přípravu vzorku a experimentu, pořizování digitálních obrazů zvolené rovinné plochy vzorku před a po (příp. v průběhu) zatěžování a následné zpracování obrazů počítačovým programem za účelem získání požadovaných informací o deformačním posunutí [29].

Pro co nejpřesnější vyhodnocení deformace je při využití DIC nutné, aby byl na snímaném povrchu vzorku kontrastní stochasticky skvrnitý vzor. Ten se deformuje spolu se zatěžovaným vzorkem a je hlavním nositelem informace o vznikajících posunutích. Pokud dostatečnou diverzitu nevykazuje povrch materiálu přirozeně, lze potřebného vzoru dosáhnout nanesením barevné vrstvy. Tato vrstva musí vykazovat dobrou přilnavost k povrchu vzorku, aby bylo zajištěno, že se deformuje spolu se zatěžovaným vzorkem. Po umístění připraveného vzorku do zatěžovacího stroje je dále třeba správně nastavit optické zařízení k pořizování obrazů. Optická osa tohoto zařízení by měla představovat normálu ke snímané ploše vzorku, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. To je případně možné redukovat též využitím telecentrických systémů. Vždy je však důležité dbát na to, aby se zvolené optické zařízení v průběhu zkoušky nepohnulo [29, 30]. Na obrázku 4.1 je schéma výše popsaného vzájemného umístění měřeného vzorku a optického zařízení.

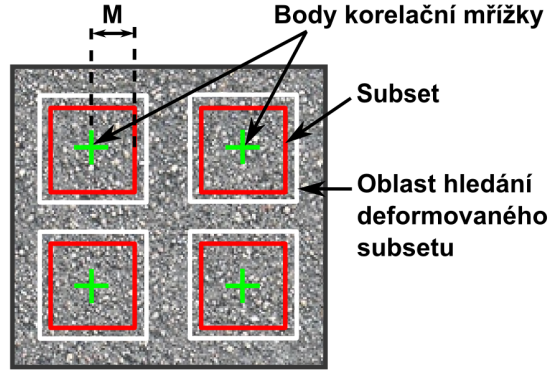


Obrázek 4.1: Schéma experimentu vyhodnocovaného metodou DIC

Pořizování digitálních snímků je možné realizovat v průběhu zatěžování či pouze před jeho začátkem a po jeho konci. V prvním případě je pak mapován postupný průběh posunutí (vhodné např. pro stanovení diagramu napětí – deformace), kdežto druhým přístupem získáme pouze výsledné posunutí. Základní princip metody 2D DIC je však v obou případech shodný, vzniklé posunutí povrchového vzoru je vyhodnoceno porovnáním dvou obrazů, které byly pořízeny v různých časových okamžicích a zachycují tedy různé stavy deformace. Dříve pořízený obraz je brán jako referenční.

Poslední fáze – zpracování pořízených obrazů – standardně začíná definováním výpočetní oblasti v referenčním obrazu. Tato oblast je rovnoměrně pokryta virtuální korelační mřížkou, představující množinu bodů resp. pixelů, u nichž je vyhodnocováno posunutí. To v podstatě spočívá v porovnání polohy stejného pixelu mezi dvěma digitálními obrazy pořízenými v různých okamžik deformace vzorku. Jelikož pixelů shodných s vybranými pixely z korelační mřížky, je v celém obrazu velké množství, jsou k nalezení jednoznačného řešení používány tzv. subsety. Subset lze definovat jako čtvercové pole o rozměrech  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  pixelů, jehož střed tvoří sledovaný bod korelační mřížky  $P(x_0, y_0)$ . Takové pole totiž, díky skvrnitému vzoru na povrchu vzorku, obsahuje unikátní vzor, který je možné rozpoznat i na deformovaném obraze. Provedení reálné analýzy přitom závisí na vhodně zvoleném parametru  $M$ , jelikož subsety musí být dostatečně velké, aby obsahovaly jedinečné vzory. Naproti tomu však s rostoucí velikostí subsetů roste doba potřebná na provedení výpočtů. Tu lze, na základě správné predikce vznikajícího posunutí bodů, optimalizovat volbou oblasti hledání, tedy jistého okolí každého referenčního subsetu, ve kterém je na obraze po deformaci hledán odpovídající vzor [29, 30], viz obr. 4.2.

Vlivem deformace vzorku dochází často ke změně tvaru referenčního čtvercového subsetu na deformovaném obraze. Libovolnému bodu  $Q(x_i, y_j)$  pro  $i, j \in \langle -M, M \rangle$  náležícímu do referenčního subsetu okolo bodu  $P(x_0, y_0)$ , je pak přiřazen odpovídající bod  $Q'(x'_i, y'_j)$  v deformovaném subsetu podle tzv. tvarových funkcí  $\xi$  a  $\eta$ :



Obrázek 4.2: Snímaný povrch vzorku se skvrnitým vzorem a vyznačenou korelační mřížkou (zeleně), subsety příslušícími jednotlivým bodům (červeně) a oblastmi hledání jednotlivých deformovaných subsetů (bíle)

$$x'_i = x_i + \xi(x_i, y_j) \quad y'_j = y_j + \eta(x_i, y_j). \quad (4.1)$$

Podle podstaty deformace rozlišujeme různé stupně tvarových funkcí. Funkce nultého řádu vyjádřené rovnicemi 4.2, platí, pokud dochází ke shodné změně polohy každého bodu subsetu. To znamená že deformovaný subset se pouze celý posune a žádným způsobem nezmění svůj tvar. Takové rovnice samozřejmě nestačí k popisu běžného deformačního chování, které se vyznačuje složitějšími procesy. Tvarovými funkcemi prvního řádu (4.3) lze popsat translační, rotační i smykové deformace a jejich libovolné kombinace. K takovým deformacím dochází nejčastěji, a proto jsou tyto funkce využívány nejvíce. Pro složitější deformační stavy se používají tvarové funkce druhého řádu (4.4).

$$\xi_0(x_i, y_j) = u \quad \eta_0(x_i, y_j) = v \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \xi_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
\xi_2(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_y \Delta x \Delta y \\
\eta_2(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_y \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{4.4}$$

V rovnicích 4.2 - 4.4 jsou jednotlivé proměnné definovány následovně:  $\Delta x = x_i - x_0$ ,  $\Delta y = y_i - y_0$ ,  $u, v$  jsou postupně složky posunutí středu subsetu ve směru osy  $x$  a  $y$ .  $u_x, u_y, v_x, v_y$  jsou gradienty posunutí referenčního subsetu prvního řádu a  $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$  jsou gradienty druhého řádu [29].

Hledání deformovaného subsetu je realizováno s využitím matematické operace korelace, kdy je umístění vzoru odpovídajícího referenčnímu subsetu na deformovaném obraze určeno z extrému korelačního koeficientu stanoveného dle předdefinovaného kritéria. Obecně je pro korelační analýzu možné použít více různých kritérií, které se dělí do dvou základních skupin. Jednu tvoří tzv. kritéria křížové korelace, označovaná CC podle anglického názvu *cross-correlation* a druhou jsou SSD (*sum-squared difference*) kritéria založená na součtu kvadrátu odchylek. Jejich základní matematická vyjádření jsou v tabulce 4.1, přičemž  $f(x_i, y_j)$  je hodnota barevné intenzity bodu  $(x_i, y_j)$  a  $g(x'_i, y'_j)$  je hodnota intenzity bodu  $(x'_i, y'_j)$  [29].

Tabulka 4.1: Matematický popis základních korelačních kritérií [29]

Korelační kritérium	Definice
CC kritérium	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)]$
SSD kritérium	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$

Vyhodnocování korelačních koeficientů mezi subsety se primárně provádí na pixelové úrovni. Pro přesnější stanovení vektoru posunutí jsou však často implementovány též registrační



algoritmy na tzv. sub-pixelové rozlišovací úrovni. Nejčastěji jsou tyto algoritmy založeny na interpolaci korelačního koeficientu fitovací metodou, Newton-Raphsonově iteraci či gradientních metodách. S jejich použitím lze při určení vektoru posunutí dosáhnout přesnosti v rozsahu od 0.5 až do 0.01 pixelu. Sub-pixelovým registračním algoritmům musí ale vždy předcházet mapovací algoritmy pracující na pixelové úrovni. Prvotní určení polohy deformovaného subsetu probíhá například pomocí konečného určování korelačního koeficientu pixel po pixelu nad celou vybranou oblastí hledání [29, 31].

Softwarový nástroj použitý pro vyhodnocení deformace v experimentální části této práce pracuje též na sub-pixelové úrovni pro určení přesné polohy bodů korelační mřížky na deformovaném obraze. Na pixelové úrovni je používáno korelační kritérium SSD uvedené v tabulce 4.1 a na sub-pixelové úrovni je aplikován algoritmus Lucas-Kanade (blíže popsany například v [28]) využívající korelační kritérium ZNSSD (*zero-normalised sum of squared differences*). Toto kritérium je definované vztahem 4.5, ve kterém jsou pomocné proměnné  $f_m$ ,  $g_m$ ,  $\Delta f$ ,  $\Delta g$  určené vztahy 4.6 - 4.9 [29].

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (4.5)$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) \quad (4.6)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j) \quad (4.7)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (4.8)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (4.9)$$

## Část II

# Experimentální část

# Kapitola 5

## Popis experimentu

Cílem experimentu byl popis deformačního chování vybraných auxetických struktur v elastické i plastické oblasti deformací. Vzorky byly vystaveny kvazi-statickému tlakovému namáhání a vznikající deformace byla zaznamenávána opticky, aby mohla být následně pro vyhodnocení deformací použita metoda 2D DIC. S použitím vlastního softwarového nástroje vytvořeného v prostředí Matlab (MatLab R2014b, MathWorks, Inc., Natick, USA) byly následně stanoveny vybrané mechanické charakteristiky, včetně hustoty pohlcené deformační energie a závislosti Poissonova čísla na velikosti deformace.

### 5.1 Příprava vzorků

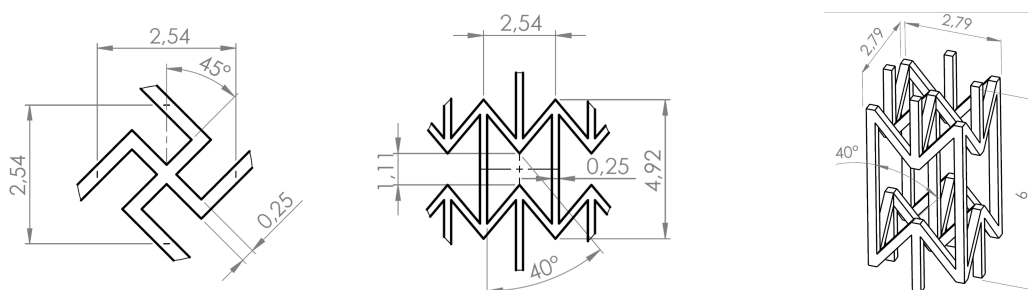
Vzorky pro realizaci experimentu byly vyrobeny mnohatrýskovou metodou přímého 3D tisku na základě vybraných strukturálních modelů s analyticky dobře popsanou Poissonovou funkcí (tj. závislost Poissonova čísla na deformaci). Byly vybrány dva 2D a jeden 3D geometrický model jednotkových buněk, které byly prostorově uspořádány tak, aby bylo u výsledné struktury dosaženo záporného na deformaci závislého Poissonova čísla v jedné rovině či v celém objemu.

### 5.1.1 Vybrané geometrie

Pro návrh testovaných struktur byly použity tři různé geometrie jednotkových buněk:

- 2D *cut missing-rib*
- 2D *inverted honeycomb*
- 3D *inverted honeycomb*

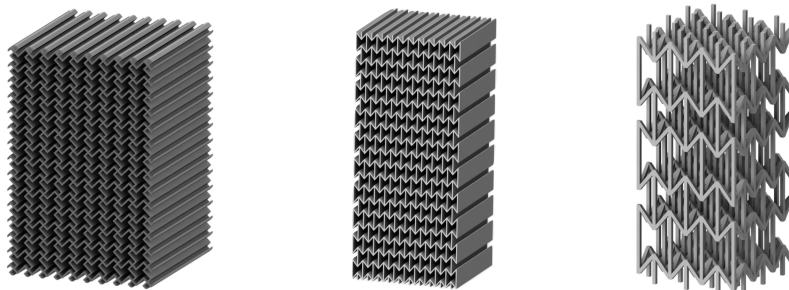
Z 2D geometrií vznikly podklady k vytvoření reálných struktur „vytažením“ rovinné vrstvy periodicky uspořádaných elementárních buněk do prostoru v ortogonálním směru, kdežto pro strukturu vznikající z 3D geometrie byl návrh tvořen přímo periodickým uspořádáním elementárních buněk ve třech ortogonálních směrech. Jednotkové buňky 2D *inverted honeycomb* a *cut missing-rib* byly obecně popsány v kapitolách 2.3.1 a 2.3.2. Konkrétní geometrie těchto buněk použité pro výrobu vzorků jsou znázorněny na obr. 5.1a a 5.1b. V úvodu ke zmiňovaným kapitolám (viz 2.3) bylo též nastíněno, že 3D modely struktur často vycházejí ze základních 2D modelů, což je případ i 3D *inverted honeycomb* geometrie, která vzniká prostorovým uspořádáním a propojením základních 2D buněk *inverted honeycomb*. Na obr. 5.1c je znázorněna tato 3D buňka i se základními rozměry, které byly použity při výrobě vzorků.



(a) 2D *cut missing-rib*    (b) 2D *re-entrant honeycomb*    (c) 3D *re-entrant honeycomb*

Obrázek 5.1: Geometrie elementárních buněk použité k výrobě vzorků struktur

Vizualizace struktur vzniklých z elementárních buněk výše popsány způsoby jsou potom na obr. 5.2 a charakteristické parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.1.



Obrázek 5.2: Vizualizace vzorků zleva postupně: *Cut missing-rib* struktury 2D *re-entrant honeycomb* struktury a 3D *re-entrant honeycomb* struktury

Tabulka 5.1: Základní parametry charakterizující geometrii vzorků jednotlivých struktur

Struktura	Rozměry (šířka × tloušťka × výška) [mm]	Počet buněk [-]	Porozita [%]
<i>Cut missing-rib</i>	25,05 × 25,40 × 37,75	10 × 15	72,8
2D <i>re-entrant honeycomb</i>	25,65 × 25,40 × 58,89	10 × 15	73,2
3D <i>re-entrant honeycomb</i>	7,87 × 7,87 × 18	3 × 3 × 3	91,7

### 5.1.2 Výroba

Aby bylo možné reálně porovnat naměřené závislosti s analytickými modely, musí být odchylky v geometrii vyrobených vzorků a teoretických modelů co nejmenší. Proto byla pro výrobu vzorků zvolena metoda mnohatryskového modelování, jejíž princip byl přiblížen již v kapitole 2.4.4. Tisk vzorků byl realizován 3D tiskárnou Pro Jet HD3000 v módu vysokého rozlišení. Konstruktivním materiálem byl UV vytvrditelný akrylový materiál VisiJet EX200, jehož vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 5.2. Jako pomocný materiál byl pro tvorbu dočasných podpor využit voskový materiál VisiJet S100, který bylo možné, díky jeho nízké teplotě tání (přibližně 55 – 65 °C), velmi snadno odstranit z prvotního produktu tisku

zahřátím ve vodní lázni o teplotě přibližně 80 °C, aniž by došlo k mechanickému poškození vzorků.

Tabulka 5.2: Vlastnosti materiálu VisiJet EX200 použitého pro výrobu vzorků [1]

Hustota materiálu	1,02	g/cm <sup>3</sup>
Modul pružnosti v tahu	1,283	GPa
Pevnost v tahu	42,4	MPa
Ohybový modul	1,159	GPa
Teplota skelného přechodu	52,5	°C

Struktury byly vyrobeny podle návrhů vytvořených v parametrickém modeláři SolidWorks (Dessaules Systèmes SolidWorks Corp., Francie) konvertovaných do formátu STL standardně používaného při 3D tisku. Vzorky byly vyrobeny s rozlišením 328 × 328 × 606 DPI (ve směrech x, y, z), přičemž byl materiál nanášen po jednotlivých, 0,036 mm tenkých, vrstvách. Tímto postupem byly struktury vyrobeny s přesností na přibližně 0,025–0,05 mm a celý výrobní proces trval cca 11 hodin.

Jelikož konstrukční materiál využitý k výrobě vzorků má přirozeně uniformní texturu, byla na snímané povrchy vzorků nanесena barevná vrstva granitovým sprejem, v důsledku čehož vznikl vhodný vzor potřebný pro vyhodnocení deformace metodou DIC.

## 5.2 Experimentální zařízení

Pro provedení experimentu bylo využito univerzální zatěžovací zařízení vhodné pro optické i rentgenové snímání deformačních procesů. Toto zařízení se skládá ze tří hlavních částí: pevného rámu, zatěžovací jednotky a měřicí jednotky.

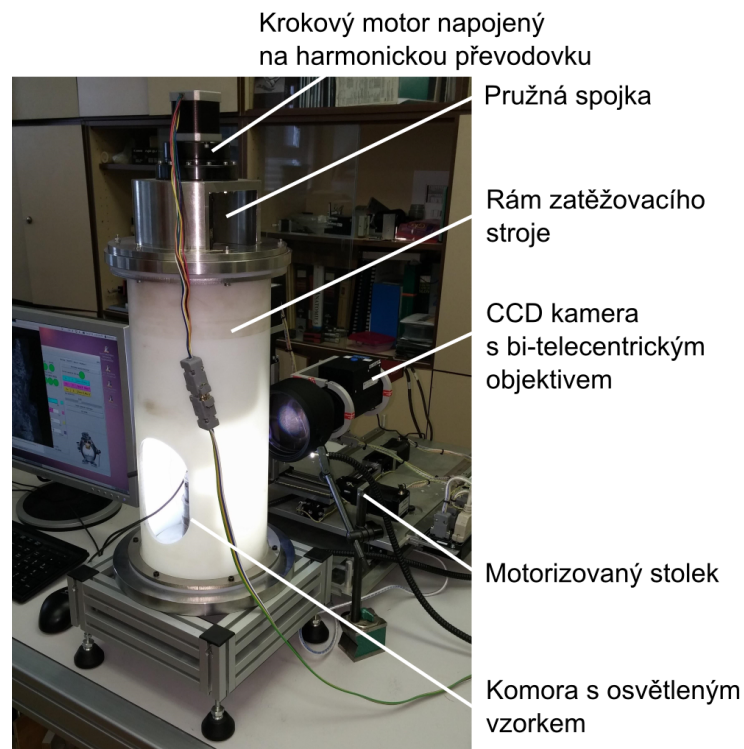
Rám zatěžovacího stroje představuje otevřený válec s přídatnými podporami připevněnými k pevné ocelové desce. Za účelem zajištění velké zatěžovací kapacity (až do 4 kN) a zároveň malého útlumu rentgenových paprsků, je tento rám vyroben z polyamid-imidového materiálu Torlon 4203.

Zatěžovací jednotka se skládá z krokového motoru SX17-0905 (Microcon, CZ), harmonické převodovky CPU 17A 100 (Harmonic Drive, USA), pružné spojky 703 32 (Huco, USA), hřídele a axiálních ložisek 51204 (SKF, Švédsko) tvořících soustavu pro přenos zatížení od motoru až na čelist zatěžovacího rámu, která se dostává do kontaktu s testovaným vzorkem materiálu. Zatěžování je přitom realizováno s přesností  $1 \mu\text{m}$  a opakovatelností  $3 \mu\text{m}$ .

Měřicí jednotka zahrnuje výměnný siloměr a sadu zatěžovacích válečků umožňujících testování vzorků s různými rozměry při zachování planparalelity jako optimální okrajové podmínky. V této práci byl pro měření síly využit snímač U9B (HBM, Německo) s jmenovitou kapacitou 2 kN a signál z tohoto siloměru byl zaznamenáván měřicím zařízením OT502 (Orbit Merret, CZ) se vzorkovací frekvencí 50 Hz.

K měření deformace bylo za účelem následné aplikace vyhodnocovací metody DIC použito optické zařízení upevněné k motorizovanému stolku. Tento stolek umožňuje počítačem řízené umístění optického zařízení s přesností/opakovatelností  $3 \mu\text{m}$  s využitím kuličkových šroubů, které nastavují jeho polohu ve třech ortogonálních směrech. Tyto šrouby jsou poháněny třemi krokovými motory SX17-0808 (Microcon, CZ) řízenými čtyřosou digitální jednotkou G540 (Geckodrive, UK). Pořizování digitálních obrazů jako podkladů pro DIC probíhalo s využitím digitální monochromatické kamery Manta G504B (AVT, Německo) využívající standard *GigE vision*. Tato kamera je vybavena CCD senzorem ICX655 a je schopna snímat s maximální frekvencí 9 fps při rozlišení  $2452 \times 2056$  pixelů. Aby mohla být zaručena vysoká spolehlivost korelační procedury a tudíž i přesnost určených deformací, byla tato kamera vybavena bi-telecentrickým objektivem TCZR 072 (Opto Engineering, Italy). Tento objektiv umožňuje nastavení 4 různých úrovní zvětšení v rozsahu 0,125–1,000

s velmi vysokou stabilitou středu obrazu a jeho celkovou ostrostí, vlivem čehož není třeba provádět recalibraci zařízení po změně zvětšení. Pro zajištění úspěšnosti DIC byly vzorky též vhodně nasvíceny s využitím LED zdroje KL2500 (Schott, Německo) generujícím bílé světlo. Popsaná soustava pro provedení experimentu zahrnující zatěžovací a snímací zařízení je na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Soustava zatěžovacího a snímacího zařízení, která byla použita při realizaci experimentu

### 5.3 Postup měření

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, vzorky byly při testování zatěžovány tlakem a to rychlostí  $20 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro struktury *cut missing-rib* a *2D inverted honeycomb* bylo měření provedeno vždy na dvou vzorcích. U jednoho z nich byla při zatěžování snímána



čelní strana struktury s viditelnými elementárními buňkami, přičemž bylo předpokládáno dosažení záporného Poissonova čísla. U druhého ze vzorků byla snímána boční strana, aby bylo prokázáno, že záporné Poissonovo číslo vzkazují tyto struktury pouze v jednom z ortogonálních směrů vzhledem ke směru zatěžování. U struktury 3D *inverted honeycomb* probíhalo měření pouze na jednom vzorku, jelikož jeho čelní a boční strana jsou shodné. Maximální posunutí, do kterého bylo realizováno zatížení, bylo pro vzorek *cut missing-rib* struktury snímaného bočně 10 mm a pro vzorek snímaný čelně, stejně jako pro oba vzorky 2D *inverted honeycomb* struktury 12 mm. Vzorek 3D *inverted honeycomb* struktury byl zatěžován do maximálního stlačení 14 mm.

Snímky deformujícího se vzorku byly vždy pořizovány s rozlišením  $2452 \times 2056$  pixelu a frekvencí 2 fps. Zvětšení 0,125 či 0,25 bylo zvoleno v závislosti na výšce testovaného vzorku. Řízení zatěžovacího zařízení a umístění kamery bylo zajištěno řídicím softwarem založeným na real-timeovém softwaru GNU/Linux a open-sourcovém projektu LinuxCNC. Řízení pořizování fotografií vzorku během deformace zajišťoval software založený na OpenCV knihovně a programovacím jazyku Python.

# Kapitola 6

## Vyhodnocení experimentu

Vyhodnocení experimentu zahrnovalo dva základní kroky. Nejprve byla na snímky pořízené během zatěžování jednotlivých vzorků aplikována metoda 2D DIC, pro získání dat potřebných k určení posunutí jednotlivých bodů korelační mřížky a stanovení příčné i podélné deformace. Pro vyhodnocení deformačního chování struktur a stanovení požadovaných charakteristik a závislostí byl vytvořen vyhodnocovací skript, jehož použití představuje druhý ze základních kroků vyhodnocení celého experimentu. Hlavním cílem bylo stanovení závislosti Poissonova čísla na deformaci, což je realizováno v rámci výpočetní části vytvořeného skriptu. Mimo to byla též vyhodnocována hodnota Youngova modulu pružnosti  $E_s$  jednotlivých vzorků struktur, která byla použita ke stanovení poměrného modulu pružnosti  $E_r$  dle vztahu 6.1, kde  $E_m$  je modul pružnosti v ohybu konstrukčního materiálu použitého k výrobě vzorků. Ten je možné použít, jelikož ze známých definičních vztahů lze dokázat, že hodnoty tlakového i ohybového modulu pružnosti jsou shodné.

$$E_r = \frac{E_s}{E_m} \quad (6.1)$$

## 6.1 DIC

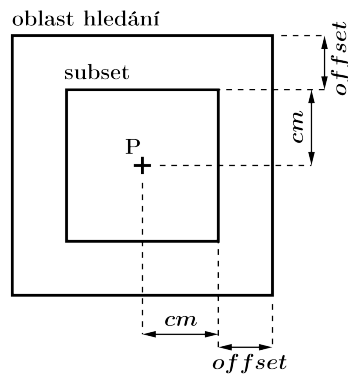
Digitální korelace obrazů pořízených během deformace jednotlivých vzorků byla provedena s využitím softwarového nástroje pro 2D DIC [32], založeného na mapovacím algoritmu Lukas-Kanade a implementovaného v prostředí Matlab. Korelační mřížka byla tvořena rovnoměrným rozložením bodů do vybrané výpočetní oblasti na povrchu vzorku s možností volby počtu řádků a sloupců, do kterých byly následně automaticky rozmístěny korelační značky. Jelikož pro potřeby vyhodnocení bylo nutné znát pouze údaje o poloze bodů krajních řad resp. sloupců, byla DIC aplikována na každou sérii fotografií dvakrát, vždy s různě volenou korelační mřížkou pro vyhodnocení nejprve podélného posunutí ve směru osy  $y$  (dvě řady bodů) a příčného posunutí ve směru osy  $x$  (dva sloupce bodů). Konkrétní počet bodů v jednotlivých řadách/sloupcích korelačních mřížek byl volen s ohledem na geometrii vzorku tak, aby jednotlivé značky ležely vždy v uzlových bodech struktury. Přehled použitých korelačních mřížek u jednotlivých vzorků je uveden v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1: Zvolené korelační mřížky u jednotlivých vzorků struktur - vždy počet řádků  $\times$  počet sloupců

Struktura	Způsob snímání	DIC ve směru $y$	DIC ve směru $x$
<i>Cut missing-rib</i>	čelně	$2 \times 8$	$7 \times 2$
	bočně	$2 \times 5$	$7 \times 2$
2D <i>inverted honeycomb</i>	čelně	$2 \times 9$	$9 \times 2$
	bočně	$2 \times 5$	$10 \times 2$
3D <i>inverted honeycomb</i>	-	$2 \times 3$	$3 \times 2$

Dále bylo u obou DIC nutné nastavit základní velikost subsetu a velikost oblasti hledání deformovaného subsetu. K tomu v použitém programu slouží parametry  $cm$  a  $offset$ , jejichž význam je znázorněn na obr. 6.1. Vzhledem ke vzoru na povrchu vzorku a velikosti posunutí mezi každými dvěma fotografiemi, byly určeny hodnoty  $cm = 30$  pixelů a  $offset = 5$  pixelů. Dalším z volitelných parametrů byl krok korelace, kterým lze měnit počet snímků,

mezi kterými je následně provedena korelace. Jelikož byla při pořizování snímků zvolena vhodná frekvence, byl tento parametr nastaven na hodnotu 1, a DIC byla tak aplikována mezi každými dvěma snímky.



Obrázek 6.1: Význam volených parametrů při nastavení velikosti subsetu a oblasti hledání deformovaného subsetu, přičemž bod P představuje libovolný bod korelační mřížky

Po provedení obou dílčích DIC byly získány textové soubory `apointX.txt`, kde  $X$  představuje přiřazené číslo v rozsahu od 0 do  $n - 1$ , označíme-li  $n$  počet bodů korelační mřížky. Každý z těchto souborů obsahuje informace o poloze příslušného bodu korelační mřížky na jednotlivých snímcích v podobě souřadnic ve směru osy  $x$  a  $y$ .

## 6.2 Vyhodnocovací skript

Skript pro vyhodnocení experimentu `AuxEvaluation` byl vytvořen v programovacím prostředí Matlab modifikací skriptu blíže popsáno v [33]. Při jeho tvorbě byl kladen důraz na dosažení co největší míry automatizace při zpracování vstupních dat. I přesto je pro úspěšné vyhodnocení experimentu požadováno, aby uživatel provedl několik málo manuálních vstupů v průběhu vyhodnocení, jak bude přiblíženo v dalších kapitolách.

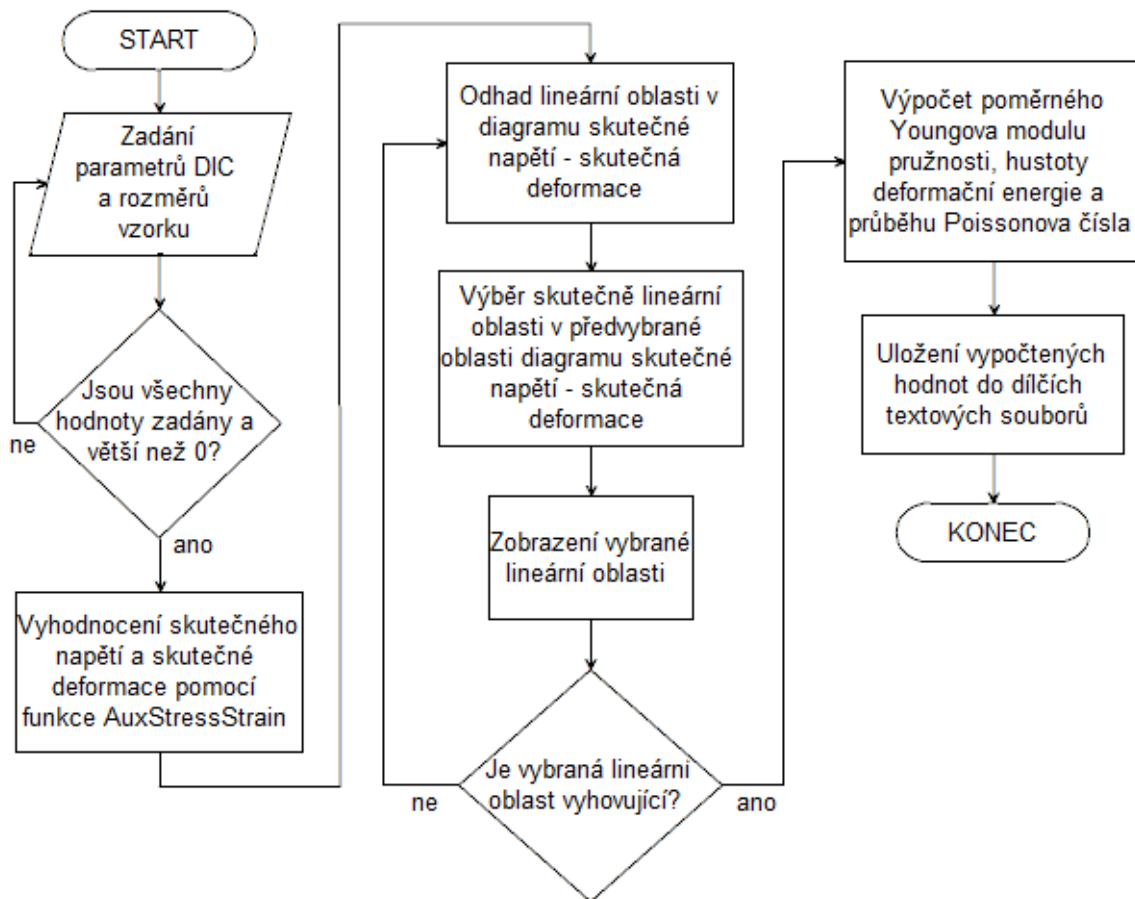
### 6.2.1 Vstupní data

Vyhodnocení experimentu je realizováno na základě tří základních druhů vstupních dat. V první řadě jsou to z klávesnice zadávané hodnoty parametrů obou realizovaných DIC a rozměry testovaného vzorku. Dále pak informace o poloze bodů korelačních mřížek na jednotlivých digitálních snímcích pořízených během zatěžování, které jsou obsaženy v textových souborech `apointX.txt`. Tyto soubory vznikají jako výstup z použitého softwarového nástroje pro DIC, jak bylo již popsáno v kapitole 6.1. V poslední řadě je to záznam síly ze siloměru, který obsahuje soubor `num_force_displ_rrmdd_hhmmss.txt`, kde `r`, `m`, `d`, `h`, `m`, `s` jsou proměnné označující postupně rok, měsíc, den, hodinu, minutu a sekundu vzniku tohoto souboru. Jako doplněk pro správné spárování záznamů síly a jim odpovídajících fotografií pracuje skript také s časovými údaji pořízení těchto veličin. U síly jsou tyto hodnoty získávány ze stejného souboru jako záznam síly samotné. U fotografií jsou časové údaje o jejich pořízení zaznamenány v jejich názvech.

### 6.2.2 Popis skriptu

Vytvořený vyhodnocovací skript lze strukturovat do čtyř hlavních částí. V rámci té první probíhá nastavení hodnot parametrů DIC a rozměrů vzorku. Poté následuje volání funkce `AuxStressStrain`, která byla také vytvořena v prostředí Matlab, za účelem zpracování vstupních dat z DIC a ze siloměru a vyhodnocení průběhu skutečného napětí v podélném směru a skutečné deformace v příčném i podélném směru. Třetí část zahrnuje manuální práci s diagramem skutečné napětí – skutečná deformace s cílem vybrání lineární oblasti. Poslední částí je sekce výpočtů, ve které jsou stanoveny hodnoty Youngova modulu pružnosti z vybrané lineární oblasti, hustoty deformační energie a také průběh Poissonova čísla. Tyto vypočtené hodnoty i vektory hodnot skutečného napětí, skutečné podélné deformace a Poissonova čísla jsou v samém závěru skriptu automaticky uloženy do textových souborů `parameters.txt`, `stress_strain.txt` a `strain_poisson.txt`, aby mohly být dále použity k dalšímu zpracování. Pro přehlednost je základní princip skriptu na-

značen na vývojovém diagramu na obr. 6.2.

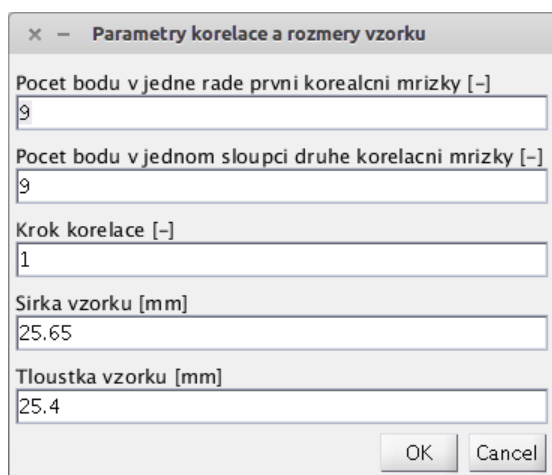


Obrázek 6.2: Vývojový diagram vyhodnocovacího skriptu AuxEvaluation

### 6.2.3 Zadání vstupních parametrů

Pro zadání hodnot parametrů provedených DIC a rozměrů vzorku se po spuštění skriptu zobrazí dialogové okno (viz obr. 6.3), ve kterém má uživatel možnost přenastavit již předdefinované hodnoty. Konkrétně jsou těmito parametry počet bodů v jedné řadě korelační mřížky použité při první korelaci, počet bodů v jednom sloupci korelační mřížky použité při druhé korelaci, zvolený krok korelace a poté šířka a tloušťka testovaného vzorku

struktury. Úspěšné zadání hodnot je přitom podmíněno vložení všech hodnot, které musí být zároveň větší než 0. Pro každý z parametrů je tato podmínka testována v cyklu `while`. Nejsou-li tedy po potvrzení zadány hodnoty všech parametrů, či jsou-li menší než 0, dialogové okno se zobrazí znovu a nastavení parametrů je třeba opakovat. Po úspěšném nastavení parametrů následuje výpočet velikosti průřezové plochy vzorku ze zadaných rozměrů. Poté je již volána funkce `AuxStressStrain` zpracovávající další ze vstupních dat.



Obrázek 6.3: Dialogové okno pro nastavení hodnot parametrů DIC a rozměrů vzorku

#### 6.2.4 Zpracování vstupních dat pomocí funkce `AuxStressStrain`

Funkci `AuxStressStrain` je také možné členit na více dílčích částí. Během první z nich probíhá načítání souřadnic bodů korelačních mřížek z obou DIC. Z těchto souřadnic jsou dále vybrány pouze ty ve směru osy  $y$  u bodů z první DIC a ve směru osy  $x$  u bodů z druhé DIC a uloženy do samostatných matic. Poté následuje načtení záznamu síly z příslušného souboru `num_force_displ_rrmdd_hhmmss.txt` (popsaného v kapitole 6.2.1). Zároveň s tím jsou ze stejného souboru načteny i časové údaje o pořízení těchto záznamů. Jelikož pořizování fotografií při experimentu standardně začíná dříve a končí později než ukládání záznamu síly, je třeba znát také časové údaje pořízení jednotlivých fotografií, aby bylo možné určit, při které fotografii již probíhalo resp. už neprobíhalo zatěžování. Fotogra-

fie pořízené dříve, resp. později je pak nutné z procesu vyhodnocení vyloučit. Vytvořená funkce dokáže identifikovat i opačný případ, tedy pokud by dříve začalo zaznamenávání síly nebo naopak končilo později než pořizování fotografií, byly by pak filtrování dat následuje vzorkování síly, jelikož frekvence jejího zaznamenávání byla podstatně vyšší než frekvence pořizování snímků. Vzorkování je provedeno jednoduše rovnoměrným vybráním tolika záznamů síly, kolik bylo pořízeno fotografií. Dále je realizováno několik operací se souřadnicemi bodů, kdy jsou od sebe odděleny souřadnice jednotlivých řad resp. sloupců korelačních mřížek, aby byly dále použity pro výpočet vektoru hodnot podélné resp. příčné poměrné deformace vzorku. Princip výpočtu výsledné poměrné deformace je shodný pro oba směry a zakládá se na průměrování dílčích poměrných deformací odpovídajících jednotlivým dvojicím protějších bodů v korelačních mřížkách. To odpovídá vzorci:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{L_k - L_0}{L_0}}{n} \quad (6.2)$$

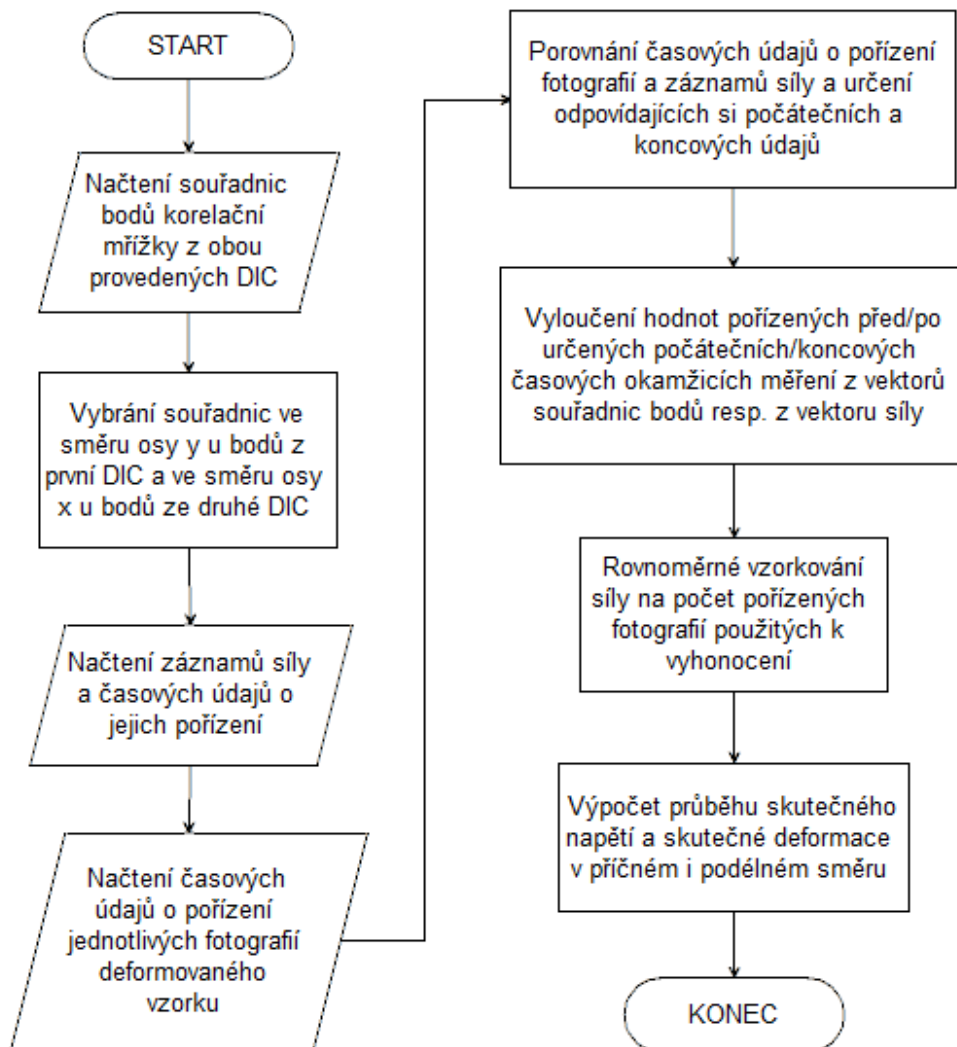
kde  $L_0$  představuje počáteční vzdálenost mezi protějšími body v řadách resp. sloupcích korelačních mřížek a  $L_k$  je pak okamžitá vzdálenost mezi těmito body.  $n$  je parametr, určující celkový počet bodů v jedné řadě resp. sloupci korelační mřížky.

Posledním krokem v rámci funkce `AuxStressStrain` je přepočtení hodnot z vektorů poměrných deformací a napětí na skutečné deformace a skutečné napětí, jelikož při experimentech dochází k velkým deformacím. Právě průběhy skutečné podélné a příčné deformace a skutečného napětí jsou hlavními výstupními daty z této funkce a jsou dále používány hlavním skriptem. Princip popsané funkce je zachycen na vývojovém diagramu na obr. 6.4.

### 6.2.5 Diagram skutečné napětí – skutečná deformace

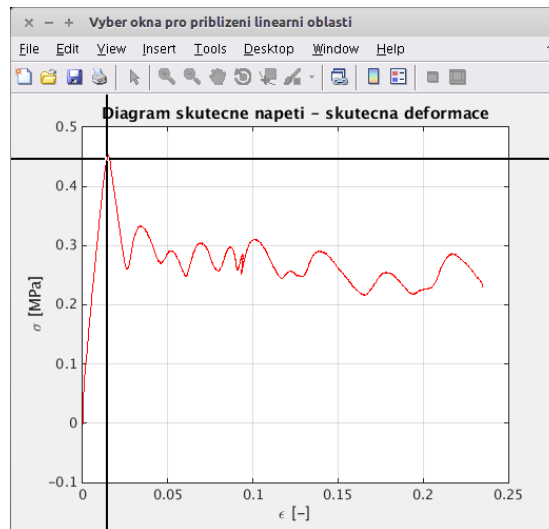
Po proběhnutí funkce `AuxStressStrain` následuje v hlavním skriptu sekce zahrnující práci s diagramem skutečné napětí – skutečná (podélná) deformace za účelem vybrání lineární





Obrázek 6.4: Vývojový diagram funkce AuxStressStrain

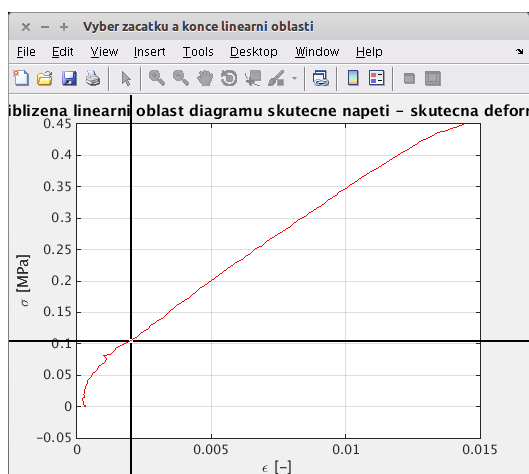
oblasti pro stanovení Youngova modulu pružnosti. Jelikož byly vzorky vystavovány relativně velkému stlačení, není vždy při celkovém pohledu na diagram zcela patrné, kde přesně začíná a končí počáteční lineární oblast. Proto je její výběr realizován ve dvou krocích. Nejdříve uživatel na automaticky zobrazeném diagramu provede prvotní výběr lineární oblasti, a to zaměřením kurzoru na místo předpokládaného konce této oblasti a kliknutím levého tlačítka myši, viz obr. 6.5.



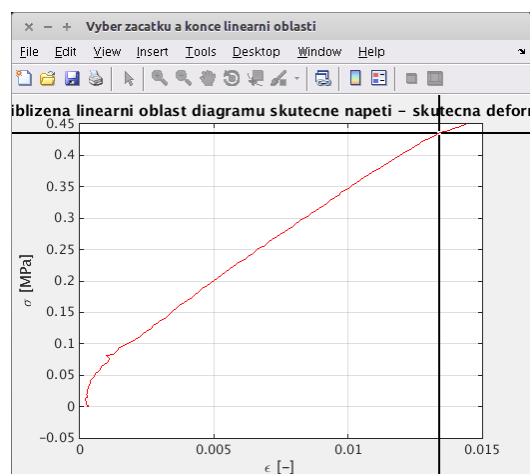
Obrázek 6.5: Výběr okna pro přiblížení lineární oblasti diagramu

V rámci skriptu jsou takto uživatelem vybrané hodnoty skutečného napětí a podélné skutečné deformace (odpovídající vybranému bodu na křivce zobrazeného diagramu) přepočteny jejich pořadnice v jednotlivých vektorech hodnot. Pomocí těch je ohraničena oblast hodnot skutečného napětí a skutečné deformace pro zobrazení dalšího diagramu, který přibližuje předvybranou oblast pro přesnou volbu té skutečně lineární oblasti. Tato volba opět závisí na uživateli, který postupně zaměřením kurzoru a kliknutím levého tlačítka myši vybere v diagramu začátek a konec lineární části, viz obr. 6.6.

Stejným postupem jako po předchozím výběru jsou z vybraných hodnot určeny jim příslušící pořadnice ve vektorech hodnot napětí a podélné skutečné deformace. Pomocí těchto pořadnic jsou vytvořeny vektory obsahující pouze hodnoty lineární oblasti. Pro kontrolu je pak uživateli zobrazen vybraný lineární průběh a také dialogové okno, ve kterém může volbou odpovědí „Ano“ či „Ne“ potvrdit, resp. vyvrátit, že je vybraná oblast vyhovující, viz obr. 6.7. Pokud je zvolena možnost „Ano“, pokračuje skript dále k výpočtové části, pokud však uživatel zvolí možnost „Ne“, opakuje se celá sekce pracující s grafem znovu. Toto je zajištěno cyklem `while` a testováním podmínky, rovná-li se řídicí parametr `OK` nule. Po-



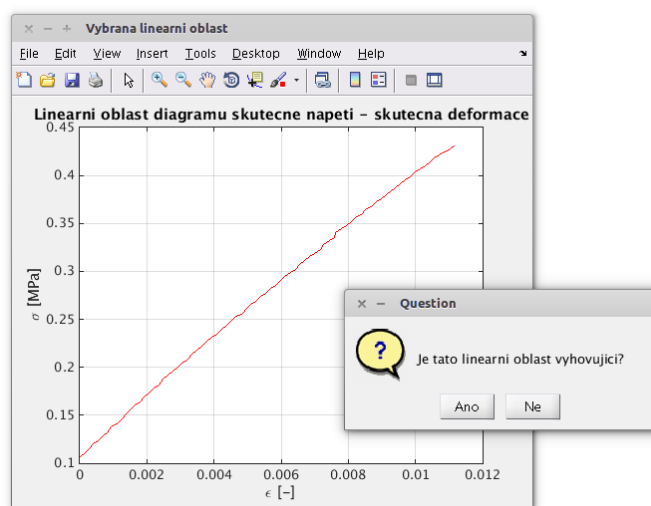
(a) Výběr začátku lineární oblasti



(b) Výběr konce lineární oblasti

Obrázek 6.6: Výběr lineární oblasti diagramu

kud je hodnota tohoto parametru nulová, opakuje se popsaná část pracující s diagramem. Hodnota tohoto parametru se je stanovena vždy při závěrečné volbě, zda je vybraná oblast vyhovující. Odpověď „Ano“ nastavuje parametr OK na hodnotu 1 a „Ne“ na 0.



Obrázek 6.7: Zobrazení vybrané lineární oblasti a dialogového okna s možností volby, zda je vybraná lineární oblast vyhovující

## 6.2.6 Výpočty

Po úspěšném vybrání lineární oblasti navazuje na sekci pracující s diagramem skutečné napětí – skutečná deformace část, ve které jsou realizovány výpočty hodnot požadovaných veličin. Nejprve je z vektorů hodnot skutečného napětí a skutečné deformace lineární oblasti diagramu určena hodnota Youngova modulu testovaného vzorku struktury metodou lineární regrese. Tato hodnota je následně použita k výpočtu poměrného modulu pružnosti  $E_r$  dle vztahu 6.1. Dále probíhá výpočet hodnot Poissonova čísla z vektorů hodnot příčné a podélné skutečné deformace. Nakonec je lichoběžníkovou metodou numericky integrována závislost skutečného napětí na skutečné deformaci v celé oblasti deformací, za účelem stanovení hustoty pohlcené deformační energie. Pro další možné zpracování vyhodnocených dat jsou získané hodnoty resp. vektory hodnot zmíněných veličin ukládány do složky `results`. Do souboru `parameters.txt` je ukládána přehledná tabulka obsahující postupně hodnoty Youngova modulu pružnosti měřeného vzorku, ohybového modulu konstrukčního materiálu použitého pro výrobu vzorku, poměrného Youngova modulu pružnosti a také hodnota hustoty pohlcené deformační energie. Soubor `stress_strain.txt` je tvořen sloupcovými vektory hodnot skutečného napětí a skutečné podélné deformace a do souboru `strain_poisson.txt` se ukládají sloupcové vektory hodnot skutečné podélné deformace a Poissonova čísla.

# Kapitola 7

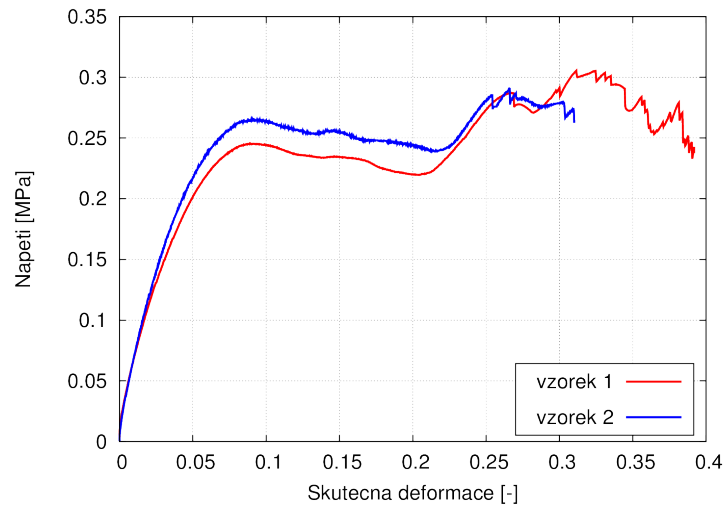
## Experimentální výsledky

Jak bylo již popsáno v kapitole 5.3, pro struktury *cut missing-rib* a 2D *inverted honey-comb* bylo měření provedeno vždy na dvou vzorcích. U jednoho z nich byla při zatěžování snímána čelní strana struktury a u druhého boční strana. U struktury 3D *inverted honey-comb* probíhalo měření pouze na jednom vzorku. Konkrétní průběh experimentů a postup při jejich vyhodnocení byl již blíže popsán v kapitolách 5 a 6. Popis výsledků je dále rozdělen do dílčích podkapitol podle vyhodnocovaných struktur.

### 7.1 *Cut missing-rib* struktura

U prvního vzorku (dále vzorek 1) struktury *cut missing-rib* byla při měření snímána čelní strana a zatěžování probíhalo do maximálního stlačení 12 mm. Deformace druhého vzorku (dále vzorek 2) byla v průběhu zatěžování snímána na jeho boční straně. Při tomto měření bylo zvoleno stlačení pouze 10 mm. Průběhy skutečného napětí v závislosti na skutečné podélné deformaci stanovené měřením obou vzorků jsou na obrázku 7.1. Červená křivka odpovídá prvnímu vzorku a modrá druhému. V obou případech je počáteční lineární oblast následována zřejmou mezí kluzu, na kterou navazuje oblast zpevňování s téměř konstantní hodnotou napětí. Při přibližně 20% deformaci dochází k dalšímu nárůstu napětí, související

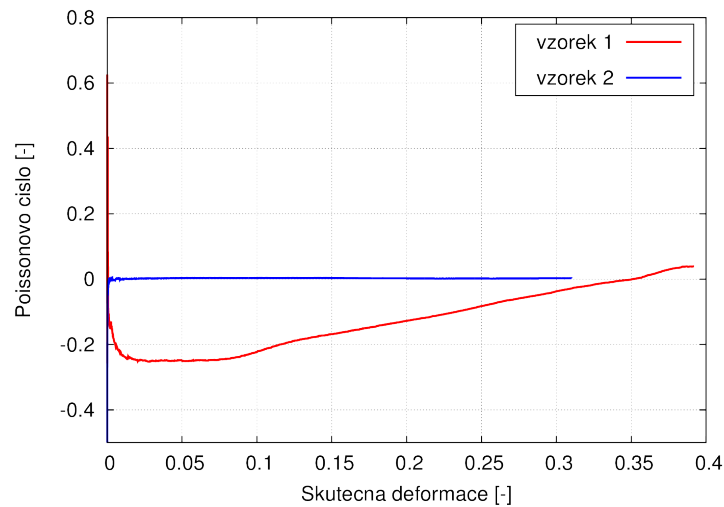
s lokálními změnami hustoty ve struktuře způsobenými záporným Poissonovým číslem jednotkových buněk. Následující skokové poklesy napětí jsou zapříčiněny porušením žebířů ve struktuře z důvodu nadměrné ohybové deformace vedoucí k lokálnímu překročení meze pevnosti.



Obrázek 7.1: Diagramy skutečné napětí - skutečná deformace vzorků *cut missing-rib* struktury. Červená křivka odpovídá čelně snímanému vzorku a modrá křivka bočně snímanému vzorku.

Z průběhů skutečného napětí a skutečné deformace byly pro oba tyto vzorky určeny hodnoty poměrného Youngova modulu pružnosti a hustoty deformační energie, která byla vyhodnocena ve shodném rozsahu deformací odpovídajícímu deformaci druhého ze vzorků. Pro vzorek 1 byly získány hodnoty  $E_{r,cut1} = 3,58 \cdot 10^{-3}$  a  $\lambda_{cut1} = 0,070 \text{ MJ/m}^3$ , pro vzorek 2 je  $E_{r,cut2} = 4,06 \cdot 10^{-3}$  a  $\lambda_{cut2} = 0,074 \text{ MJ/m}^3$ . Dále byly pro oba vzorky určeny vektory hodnot Poissonova čísla z vektorů hodnot příčné a podélné skutečné deformace, aby bylo možné stanovit průběhy Poissonovy funkce, tedy závislosti Poissonova čísla na podélné skutečné deformaci, které jsou na obr. 7.2. Červená křivka znázorňuje průběh zmíněné závislosti pro první vzorek. Hodnota Poissonova čísla při zatěžování poklesne již při velmi malé deformaci (cca 2%) na svou minimální hodnotu přibližně  $-0,25$ , na které dále se

trvá až do cca 7% deformace. Po tomto konstantním úseku dochází při další deformaci k opětovnému nárůstu Poissonova čísla s přibližně lineárním trendem. Při 35% deformaci nabývá Poissonovo číslo hodnoty 0 a dále pak narůstá směrem do kladných hodnot. Modrá křivka znázorňuje průběh Poissonova čísla druhého vzorku, které je konstantní a nulové pro celý rozsah měřené deformace, čímž bylo prokázáno, že auxetický charakter se u této struktury projevuje pouze v jednom ze směrů kolmých na směr zatěžování.

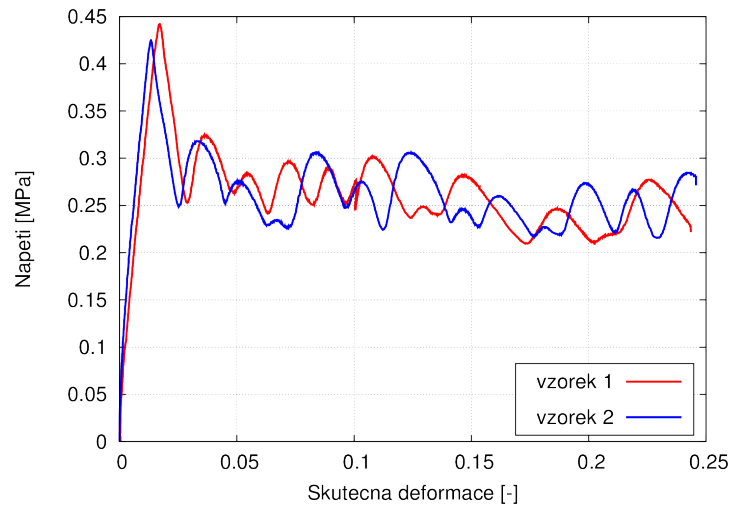


Obrázek 7.2: Průběh Poissonovy funkce u vzorků *cut missing-rib* struktury. Červená křivka odpovídá čelně snímanému vzorku a modrá křivka bočně snímanému vzorku.

## 7.2 2D *inverted honeycomb* struktura

Deformace jednotlivých vzorků 2D *inverted honeycomb* struktury byla snímána stejným způsobem jako v předchozím případě. První vzorek (vzorek 1) byl při zatěžování nastaven k objektivu kamery čelní stranou a druhý vzorek (vzorek 2) boční stranou. Tentokrát byly oba vzorky zatěžovány do stejného maximálního stlačení 12 mm. Na obrázku 7.3 jsou znázorněny diagramy skutečné napětí – skutečná deformace pro oba tyto vzorky. Červená křivka opět odpovídá prvnímu ze vzorků a modrá tomu druhému. Je jasně zřejmé, že vzorky této struktury vykazují odlišné deformační chování než vzorky *cut missing-rib* struktury.

Po počáteční lineární oblasti následuje při cca 2% deformaci výrazný pokles napětí přibližně o 40% a dále dochází k opakovaným nárůstům a poklesům napětí, které jsou spjaté s postupným borcením jednotlivých vrstev buněk ve struktuře.

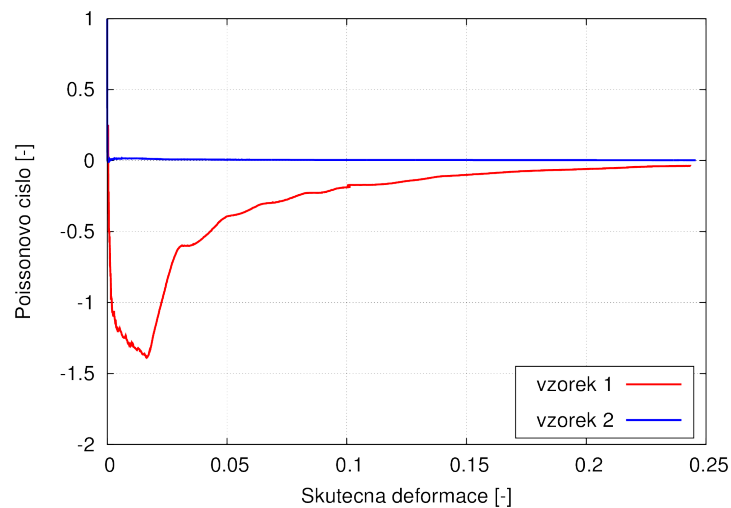


Obrázek 7.3: Diagramy skutečné napětí - skutečná deformace pro vzorky 2D *inverted honeycomb* struktury

Z popsáných diagramů skutečné napětí – skutečná deformace byly pro každý vzorek vyhodnoceny stejné veličiny jako v předchozím případě. Hodnota poměrného modulu pružnosti pro první vzorek je  $E_{r,2Dinvh1} = 2,14 \cdot 10^{-2}$  a  $E_{r,2Dinvh2} = 2,35 \cdot 10^{-2}$  pro druhý vzorek. Hustota deformační energie byla stanovena na hodnotu a  $\lambda_{2Dinvh1} = 0,064 \text{ MJ/m}^3$  u prvního a  $\lambda_{2Dinvh2} = 0,064 \text{ MJ/m}^3$  u druhého vzorku. Průběh Poissonova čísla v závislosti na podélné deformaci pro oba měřené vzorky je na obr. 7.4. Červená křivka opět přísluší prvnímu vzorku a modrá druhému. V tomto případě je možné pozorovat atypický trend červené křivky v oblasti relativně malých deformací (cca do 2,5%), kde nabývá Poissonovo číslo hodnot menších než -1. Tak je sice překročen teoretický limit  $\nu = -1$  vyplývající z teorie mechaniky klasických materiálů, avšak v oboru auxetických materiálů nejsou takové hodnoty vyloučeny, jak ukazují studie elastické odezvy elementárních auxetických buněk na tahové a tlakové namáhání [8]. K popsánímu jevu přispívá v případě této studie několik



faktorů, mezi které se řadí vznik lokálních extrémů příčné deformace mezi dvojicemi bodů z korelační mřížky vlivem sklápění dílčích vrstev buněk v elastické oblasti deformace. Jak je patrné z vizuální inspekce vzorku během zatěžování, struktura se též nechová jako čistě tlakově namáhaná, ale dochází k ohybu, rotacím a vzpěru jednotlivých nosníků. Dále je to charakter okrajových podmínek zkoumaných struktur, kde otevřené části elementárních buněk na vrchní a spodní straně vzorku vykazují významně menší tuhost než zbytek struktury, a proto podléhají lokální plastické deformaci a v počátečních fázích experimentu je tak deformace soustředěna mimo oblast vyhodnocovanou DIC. Při přibližně 3% deformaci dochází ke kolapsu první vrstvy buněk a lokalizaci deformace do vyhodnocované oblasti. Z toho důvodu již dále stanovené hodnoty odpovídají skutečným průběhům.

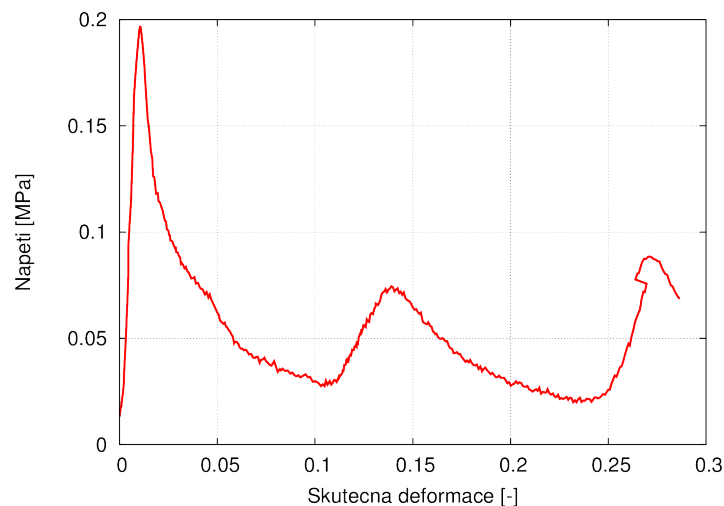


Obrázek 7.4: Průběh Poissonovy funkce u vzorků 2D *inverted honeycomb* struktury

### 7.3 3D *inverted honeycomb* struktura

Pro stanovení deformačního chování 3D *inverted honeycomb* struktury byl při měření použit pouze jeden vzorek, jelikož jeho přední a boční strana jsou shodné. Jak je patrné z tabulky 5.1 uvedené v kapitole 5, rozměry tohoto vzorku byly ve srovnání se vzorky

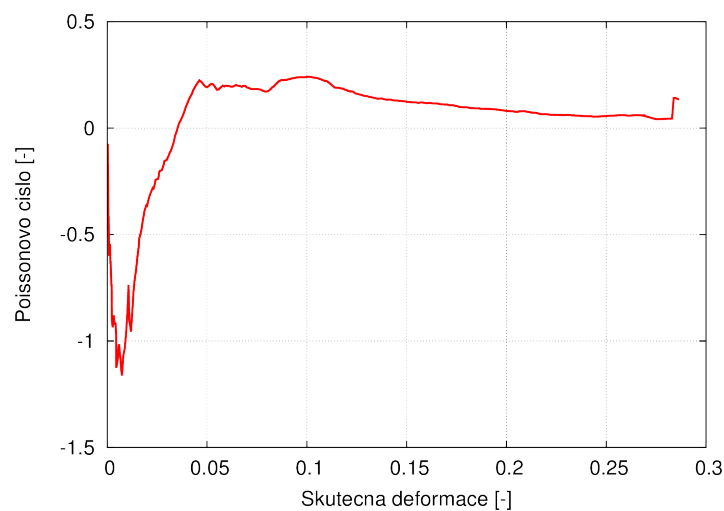
předchozích struktur významně menší, a tak zvolené celkové stlačení 14 mm představovalo přibližně 80% deformaci. Pro vyhodnocení byla však použita pouze oblast do maximální hodnoty deformace 25%, jelikož pro větší deformace již nebylo možné úspěšně aplikovat DIC. To bylo způsobeno nevhodnou volbou geometrie vzorku s příliš velkou porozitou a malým poměrem mezi průřezem jednoho nosníku a průřezem celé elementární buňky, což vedlo ke kolapsu struktury. Deformačnímu chování vzorku této struktury odpovídá diagram skutečné napětí - skutečná deformace na obr. 7.5. Průběh této závislosti je podobný jako u 2D *inverted honeycomb* struktury, ale s výraznějším poklesem napětí po počáteční lineární oblasti a menším počtem cyklů dalšího nárůstu a poklesu napětí. To je způsobeno vyšší celkovou porozitou vzorku a také menším počtu elementárních buněk ve struktuře.



Obrázek 7.5: Diagram skutečné napětí - skutečná deformace pro vzorek 3D *inverted honeycomb* struktury

Pro tento vzorek byla ve vybrané oblasti vyhodnocení stanovena hodnota poměrného modulu pružnosti  $E_{r,3Dinvh} = 1,95 \cdot 10^{-2}$  a hustota deformační energie  $\lambda_{3Dinvh} = 0,016 \text{ MJ/m}^3$ . Na obrázku 7.6 je zobrazen průběh Poissonovy funkce. V případě této struktury dochází opět k vychýlení hodnot Poissonova čísla přes pomyslnou hranici hodnoty  $-1$ , a to v oblasti mezi 0,5% a 1% deformací. Oproti předchozímu případu je však toto způsobeno pouze statistickou výchylnkou, jelikož při přezkoumání vektoru hodnot Poissonova čísla bylo zjištěno,

že se jedná pouze o tři záznamy s hodnotou nižší než  $-1$ . Při dalším postupu deformace dochází ke strmému nárůstu hodnoty Poissonova čísla, které již při 3,5% deformaci nabývá hodnoty 0 a při 4,5% deformaci dochází k jejímu ustálení na hodnotě přibližně 0,2. Při deformaci vyšší než 10% dochází dále k pozvolnému poklesu hodnot a při 25% je Poissonovo číslo rovno již pouze přibližně 0,06. Tento průběh je dán malou odolností vzorků způsobené nevhodnou geometrií, jak již bylo zmíněno výše.



Obrázek 7.6: Průběh Poissonovy funkce u vzorku 3D *inverted honeycomb* struktury

## 7.4 Shrnutí výsledků

Pro přehlednost a možnost srovnání jsou stanovené parametry u jednotlivých vzorků struktur uvedeny v tabulce 7.1.  $E_r$  označuje poměrný Youngův modul pružnosti a  $\lambda$  hustotu pohlcené deformační energie.

Stanovené hodnoty poměrného Youngova modulu pružnosti vyjadřují fakt, že vyrobené vzorky struktury mají o několik řádů nižší modul pružnosti nežli konstrukční materiál použitý k jejich výrobě. Hustota pohlcené deformační energie je při stejné míře defor-

Tabulka 7.1: Tabulka výsledků

Struktura	Způsob snímání	$E_r$ [-]	$\lambda[MJ/m^3]$
<i>Cut missing-rib</i>	čelně	$3,58 \cdot 10^{-3}$	0,070
	bočně	$4,06 \cdot 10^{-3}$	0,074
2D <i>inverted honeycomb</i>	čelně	$2,14 \cdot 10^{-2}$	0,064
	bočně	$2,35 \cdot 10^{-2}$	0,064
3D <i>inverted honeycomb</i>	-	$1,95 \cdot 10^{-2}$	0,016

mace přibližně o řád nižší než u v současné době běžně používaných porézních kovových materiálů, mezi které patří např. kovová pěna Alporas (viz [34]), což je při zohlednění všech parametrů testovaných vzorků, jako jsou geometrie buněk, vyšší celková porozita či použitý konstrukční materiál, velmi příznivý výsledek. Je nutné si též uvědomit, že Alporas je porézní struktura s uzavřenými buňkami a navíc je tento materiál vyroben z hliníkové slitiny s přibližně  $50\times$  vyšším modulem pružnosti. Tím se ukazuje, že jedním z nejvýznamnějších faktorů pro zvýšení schopnosti pohlcení deformační energie je v případě porézních materiálů přesně vytvořená mikrostruktura s řízeným deformačním chováním.

Při srovnání stanovených průběhů Poissonovy funkce a odpovídajících analytických modelů (popsaných např. v [13, 35]) byly zjištěny jisté odchylky. U *cut missing-rib* struktury je analyticky určen konstantní průběh záporného Poissonova čísla v závislosti na deformaci. Toho bylo v našem případě dosaženo pouze v malém rozsahu deformací (přibližně od 2% do 7%). U struktury s buňkami *inverted honeycomb* je zase dle analytických modelů předpokládán lehce rostoucí trend průběhu Poissonovy funkce od minimální počáteční hodnoty  $\nu = -1$ . Zanedbáme-li u experimentálně stanoveného průběhu Poissonovy funkce pro 2D *inverted honeycomb* počáteční výchylku hodnot, získáváme průběh s obdobnou tendencí. Konkrétní hodnoty určené zmiňovanými analytickými modely a experimentálně nemá význam srovnávat, jelikož vždy závisí na konkrétní geometrii jednotkových buněk.

Trendy průběhů jsou však alespoň v omezeném rozsahu deformací odpovídající. Odchyšky jsou způsobeny především faktem, že analytické modely popisují chování pouze samostatné jednotkové buňky odvozené z teorie elasticity a tedy malých deformací, přičemž jsou zanedbány kontakty ve styčných bodech jednotlivých buněk ve struktuře.

Struktura 3D *inverted honeycomb* vykazovala auxetický charakter pouze ve velmi malém rozsahu deformací, a to v důsledku nevhodně zvolené geometrie buněk kvůli které došlo velmi brzy k jejich kolapsu. Z toho důvodu není možné tento průběh přímo srovnávat s analytickou studií.

# Kapitola 8

## Závěr

Hlavním cílem této práce byl popis deformačního chování vybraných auxetických struktur a zhodnocení jejich schopnosti pohlcení deformační energie na základě kvazi-statických zkoušek. Dále byl u jednotlivých struktur určen průběh Poissonovy funkce a porovnán s analytickými modely. Při provedených experimentech byly vzorky jednotlivých struktur namáhány tlakem a vznikající deformace byla snímána opticky, aby mohla být následně aplikována metoda 2D DIC. Pro další vyhodnocení všech požadovaných parametrů a závislostí byl vytvořen poloautomatický vyhodnocovací skript v programovacím prostředí Matlab. Vzhledem k získaným výsledkům lze konstatovat, že byla navržena a verifikována vhodná metoda pro výrobu, testování a vyhodnocení deformačního chování auxetických struktur.

### 8.1 Zhodnocení výsledků

V rámci experimentální části byly testovány vzorky tří různých auxetických struktur. Stanovené hodnoty hustoty deformační energie jsou ve srovnání s kovovými pěny Alporas pouze o jeden řád nižší, což je velmi dobrý výsledek, zohledníme-li všechny rozdílné parametry testovaných struktur a těchto kovových pěn. Tím bylo obecně prokázáno, že determinis-

tická výroba porézních struktur je vhodnou metodou pro získání materiálů s výhodnými deformačními vlastnostmi. Získané průběhy Poissonovy funkce byly porovnány s analytickými modely a bylo prokázáno, že v určitém rozsahu deformací mají obdobný trend. Z toho vyplývá, že byla vyvinuta metoda pro experimentální verifikaci těchto modelů a numerických simulací chování auxetických materiálů, což dále umožňuje vytvoření výpočetních nástrojů pro optimalizaci navržených struktur na konkrétní aplikaci.

## 8.2 Další vývoj

Na tuto práci dále naváže studie auxetických struktur s elementárními buňkami 3D *inverted honeycomb*, které budou navrženy s vhodnější geometrií, aby měla výsledná struktura nižší celkovou porozitu a byla tak odolnější. Taktéž budou do styčných bodů jednotlivých nosníků navrženy kulovité elementy různých velikostí, aby byla testována změna ohybové tuhosti těchto spojů.

Dalším krokem bude testování vzorků zmíněných struktur i v dalších módech deformace (tah, ohyb). Testování tlakem se sice vhodné vzhledem k tomu, že primárně jsou tyto auxetické struktury navrhovány za účelem pohlcení deformační energie, avšak pro celkový popis vlastností materiálu je vhodné znát též jeho deformační chování při namáhání i dalšími možnými způsoby.

Bude též vyrobena a testována numericky optimalizovaná komplexně tvarovaná buňka vhodná pro vyplnění materiálem s vlastnostmi závislými na rychlosti deformace, čímž bude vytvořen tzv. *Inter-penetrating Porous Composite* (IPC).

Následně bude též realizováno dynamické testování vzorků s využitím Hopkinsonovy dělené tyče (*Split-Hopkinson pressure bar*) vyhodnocené též aplikováním metody DIC.

# Literatura

- [1] KOUDELKA, P., O. JIROUŠEK, T. FÍLA a T. DOKTOR. *Compressive Properties of Auxetic Structures Produced by Direct 3D Printing*. *Materials in technology : Materials and technology*. In press.
- [2] GRIMA, J. N. *Auxetic Metamaterials*. Lecture presented at the European Summer Campus, Strasbourg, 2010.
- [3] EVANS, K. E., M. A. NKANSAH, I.J. HUTCHINSON a S. C. ROGERS. Molecular Network Design. *Nature*. 1991, roč. 353.
- [4] YANG, W., Z. LI, W. SHI, B. XIE a M. YANG. Review on auxetic materials. *Journal of Materials Science*. 2004, roč. 39, č. 10, s. 3269 - 3279.
- [5] LAKES, R. S. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials - Structural aspects. *Journal of Materials Science*. 1991, roč. 26, č. 9, s. 2287 - 2292.
- [6] LAKES, R. S. Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*. 1987, roč. 235, č. 4792, s. 1038 - 1040.
- [7] PASTERNAK, E a A. V. DYKSIN. Materials and structures with macroscopic negative Poisson's ratio. *International Journal of Engineering Science*. 2012, roč. 52, č. 3, s. 103 - 114.
- [8] MASTERS, I. G. a K. E. EVANS. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures*. 1996, roč. 35, č. 4, s. 403 - 422.



- [9] PETRÁČKOVÁ, V. a J. KRAUS. *Akademický slovník cizích slov: [A-Ž]*. Praha: Academia, 1998, 834 s. ISBN 80-200-0607-9.
- [10] PRALL, D. a R. S. LAKES. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of  $-1$ . *International Journal of Mechanical Sciences*. 1996, roč. 39, č. 3, s. 305 - 314.
- [11] MIR, M., M. N. ALI, J. SAMI a U. ANSARI. Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014, roč. 2014, s. 1 - 17.
- [12] GRIMA, J. N., E. MANICARO a D. ATTARD. Auxetic behaviour from connected different-sized squares and rectangles. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*. 2011, roč. 467, č. 2126, s. 439 - 458.
- [13] SMITH, C. W., J. N. GRIMA a K. E. EVANS. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model. *Acta Materialia*. 2000, roč. 48, č. 17, s. 4349 - 4356.
- [14] GRIMA, J. N. a K. E. EVANS. Auxetic behavior from rotating triangles. *Journal of Materials Science*. 2006, roč. 41, č. 10, s. 3193 - 3196.
- [15] CRITCHLEY, R., I. CORNI, J. A. WHARTON, F. C. WALSH, R. J. K. WOOD a K. R. STOKES. A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. *Physica Status Solidi B*. 2013, roč. 250, č. 10, s. 1963–1982.
- [16] SKOOG, S. A., P. L. GOERING a R. J. NARAYAN. Stereolithography in tissue engineering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2014, roč. 25, č. 3, s. 845 - 856.
- [17] GROGAN, S. P., P. H. CHUNG, P. SOMAN, P. CHEN, M. K. LOTZ, S. CHEN a D. D'LIMA. Digital micromirror device projection printing system for meniscus tissue engineering. *Acta Biomaterialia*. 2013, roč. 9, č. 7, s. 7218 - 7226.

- [18] Selective Laser Sintering. In: *3D-tisk.cz: Aditivní výroba & Rapid prototyping* [online]. Vydavatelství Nová média, s. r. o., 2014 [cit. 2015-06-29]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [19] MultiJet - Modeling (MJM). *3D Labs* [online]. 2015 [cit. 2015-07-24]. Dostupné z: <http://3d-labs.de/mjm/?lang=en>
- [20] Stereolithography (SLA) vs Multi-Jet Modeling (MJM). *MasterGraphics Weblog* [online]. 2014 [cit. 2015-07-24]. Dostupné z: <http://www.mastergraphics.com/wordpress/2014/stereolithography-sla-vs-multi-jet-modeling-mjm/>
- [21] SCARPA, F. Auxetic materials for bioprostheses. *IEEE signal processing magazine*. 2008, roč. 25, č. 5, s. 128, 125 - 126.
- [22] FOZDAR, D. Y., P. SOMAN, J. W. LEE, L. HAN a S. CHEN. Three-dimensional polymer constructs exhibiting a tunable negative poisson's ratio. *Advanced Functional Materials*. 2011, roč. 21, č. 14, s. 2712 - 2720.
- [23] PRAWOTO, Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*. 2012, roč. 58, č. 6, s. 140 - 153.
- [24] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2003, xii, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [25] RAAB, M. *Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy*. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1999, 228 s. ISBN 80-860-4413-0.
- [26] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *KZM\_09: učební text* [online]. 2011 [cit. 2015-07-06]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
- [27] HOSFORD, W. F. *Mechanical behavior of materials*. New York: Cambridge University Press, 2010, 419 s. ISBN 05-211-9569-1.

- [28] LUCAS, B. D. a T. KANADE. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*. 1981, s. 121 - 130.
- [29] PAN, B., K. QIAN, H. XIE a A. ASUNDI. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*. 2009, roč. 20, č. 6.
- [30] BEK, L. *Pevnostní analýza laminátu s dírou pro spoje kovovými elementy*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Radek Kottner, Ph.D.
- [31] DAI, X., F. YANG, Z. CHEN, X. SHAO a X. HE. Strain field estimation based on digital image correlation and radial basis function. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015, roč. 65, č. 2, s. 64 - 72.
- [32] JANDEJSEK, I., J. VALACH, D. VAVŘÍK. Optimization and Calibration of Digital Image Correlation Method. In: *Experimentální analýza napětí 2010*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010, s. 121-126.
- [33] VALACH, J., D. KYTÝŘ, T. DOKTOR, K. SEKYROVÁ, V. KRÁLÍK a J. NĚMEČEK. Comparison of mechanical properties of CFRP laminate obtained from full-scale test and extrapolated from local measurement. *Chemické listy*. 2011, roč. 105, č. 17, s. 729-732.
- [34] KENESEI, P., Cs. KÁDÁR, Zs. RAJKOVITS a J. LENDVAI. The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams. *Scripta Materialia*. 2004, roč. 50, č. 2, s. 295 - 300.
- [35] FOZDAR, D. Y., P. SOMAN, J. W. LEE, L. HAN a S. CHEN. Three-dimensional polymer constructs exhibiting a tunable negative poisson's ratio. *Advanced Functional Materials*. 2011, roč. 21, č. 14, s. 2712 - 2720.