



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

VLIV MATERIÁLU A TECHNOLOGIE 3D TISKU NA VLASTNOSTI AUXETICKÝCH STRUKTUR

EFFECTS OF MATERIAL AND 3D PRINTING TECHNOLOGY ON THE PROPERTIES OF AUXETIC
STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpánka Kuchtová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1811/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie materiálů
Studentka: **Bc. Štěpánka Kuchtová**
Studijní program: Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.**

Název diplomové práce:

Vliv materiálu a technologie 3D tisku na vlastnosti auxetických struktur

Zadání diplomové práce:

Cílem práce je nalezení vztahů mezi typem použité struny, způsobem tvorby objektu FDM technologií 3D tisku a deformačními vlastnostmi vyrobených auxetických struktur .

- literární rešerše problematiky
 - návrh experimentálního programu
 - výběr materiálu tiskové struny a FDM tiskárny
 - vytvoření softwarového modelu auxetického tělesa s re-entrant elementární buňkou
 - tisk auxetických těles ve 2 velikostech
 - provedení měření deformační odezvy za běžných podmínek
 - analýza experimentálních dat Poissonova poměru, modulu pružnosti
 - analýzy strukturních dat porozity a deformací na úrovni elementární buňku a jejího umístění v objemu tělesa
 - závěry
- použitá literatura

Termín odevzdání diplomové práce: 8.5.2023:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu.
Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Štěpánka Kuchtová
studentka

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá chováním auxetických struktur, důraz je kladen zejména na vliv typu 3D tiskárny, materiálu filamentu a počtu jednotkových buněk na deformační odezvu auxetik. Vzorky byly připraveny na dvou tiskárnách s přímým a s bowdenovým extrudérem, z materiálů polyethyltereftalát glykol (PET-G) a termoplastický polyetherový polyuretan (TPU). Připravené struktury byly podrobeny statické zkoušce v tlaku v průběhu které, byly pořízeny video záznamy deformace zkušebních těles, z nichž byl následně vyhodnocen Poissonův poměr a změna relativní porozity vzorků. Pro vyhodnocení Poissonova poměru a porozity byla v programovacím jazyku Python napsána vyhodnocovací aplikace.

Typ 3D tiskárny se na vlastnostech připravených auxetických struktur projevil významně. Vzorky připravené tiskárnou s bowdenovým extrudérem dosahovaly nižších hodnot tuhosti a meze kluzu a vyšších hodnot Poissonova poměru ve srovnání se vzorky připravenými tiskárnou s přímým extrudérem.

Dále byl zkoumán vliv celkového počtu jednotkových buněk a vliv materiálu s nízkým (TPU) a vysokým (PET-G) modulem pružnosti na auxetické chování. V případě flexibilního TPU bylo pozorováno, že vzorky s menším počtem jednotkových buněk se chovají houževnatěji, přičemž v případě tuhého PET-G je tomu naopak. Zároveň byla věnována pozornost deformační odezvě jednotlivých buněk v rámci vzorku, kdy TPU vykazovalo odlišný mechanismus deformačního chování než PET-G. To se projevilo odlišnou prostorovou distribucí auxetického chování v rámci připravených těles.

Klíčová slova

Metamateriály, auxetika, re-entrantní struktura, velikost auxetické struktury, počet jednotkových buněk, negativní Poissonův poměr, porozita

Abstract

This thesis deals with the behaviour of auxetic structures. In particular, the focus is on the effect of the 3D printer, material filament and number of unit cells on the deformation response of auxetics. Specimens were prepared on two printers with a direct and a bowden extruder made of PET-G (polyethylene terephthalate glycol) and TPU (thermoplastic polyether polyurethane) materials. The prepared structures were subjected to a static compression test, during which video recordings were taken. From the video recordings the Poisson's ratio and porosity of the samples were subsequently evaluated. A software application was written in Python programming language to evaluate the Poisson's ratio and porosity.

The type of 3D printer had a significant effect on the properties of the prepared auxetic structures. The specimens prepared by the bowden extruder printer exhibited lower stiffness and yield strength and higher Poisson's ratio compared to the samples prepared by the direct extruder printer.

Furthermore, the influence of the number of unit cells and influence of the material with low (TPU) and high (PET-G) elastic modulus on the auxetic behaviour was investigated. In the case of the flexible material, specimens with fewer unit cells exhibited tougher response, whereas the opposite was true for PET-G. At the same time, attention was paid to the deformation response of single cells within the sample, where TPU exhibited a different deformation behaviour mechanism than PET-G. This has been reflected in different spatial distribution of auxetic behaviour within the specimens.

Keywords

Metamaterials, auxetics, re-entrant structure, auxetic structure size, number of unit cells, negative Poisson's ratio, porosity

KUCHTOVÁ, Štěpánka. *Vliv materiálu a technologie 3D tisku na vlastnosti auxetických struktur*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/147903>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Josef Jančář.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce prof. RNDr. Josefu Jančářovi, CSc., za odborné vedení, konzultace a cenné rady, jež jsem využila při zpracování předloženého textu. Dále bych chtěla poděkovat Bc. Václavu Cimburkovi, za seznámení s programovacím jazykem Python, pomoc při tvorbě vyhodnocovacího programu a konzultace v průběhu vypracování práce. Za kontrolu práce po formální stránce vděčím Bc. Filipu Bečkovi. Mé poděkování rovněž patří Ing. Martině Štaffové, která mě zasvětila do problematiky auxetických materiálů a Ing. Petru Lepcioví, Ph.D., který mi byl nápomocen při práci v laboratoři.

podpis autora

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 Teoretická část	10
1.1 Metamateriály	10
1.1.1 Elektromagnetické metamateriály	11
1.1.2 Akustické metamateriály.....	11
1.1.3 Tepelné metamateriály	12
1.1.4 Mechanické metamateriály	13
1.2 Auxetické metamateriály	15
1.2.1 Vlastnosti auxetických materiálů	16
1.2.2 Buněčné auxetické struktury	18
1.2.3 Vliv velikosti systému na deformační chování	22
1.2.4 Porovnání auxetických geometrií.....	23
1.2.5 Přírodní auxetické materiály	25
1.2.6 Gradientní auxetické struktury.....	26
1.2.7 Hybridní auxetické struktury	28
1.2.8 Postupy přípravy auxetických struktur	29
2 Experimentální část.....	33
2.1 Návrh modelu auxetické struktury	33
2.2 Postup přípravy vzorků.....	34
2.2.1 Creality CR 10S	35
2.2.2 Creality Sermoon V1 PRO.....	36
2.3 Použité materiály	37
2.3.1 Polyethylentereftalát glykol	37
2.3.2 Termoplastický polyetherový polyuretan	37
2.4 Statická zkouška v tlaku	38
2.5 Vyhodnocení Poissonova poměru a změny propustnosti	39
2.5.1 Návod pro použití aplikace	39
2.5.2 Princip fungování programu, použité algoritmy	43
3 Výsledky a diskuze	47
3.1 Vliv tiskárny na mechanické vlastnosti a auxetické chování	47
3.2 Vliv počtu jednotkových buněk re-entrantní struktury na auxetické chování	51
3.3 Vliv materiálu na deformační odezvu jednotkových buněk	54
4 Závěr	57
LITERATURA	58
Seznam symbolů a zkratk.....	64

Seznam obrázků

Obr. 1: Schématické rozdělení metamateriálů [3].....	10
Obr. 2: Schematické znázornění vlnové dráhy přes akustický plášť [3].....	11
Obr. 3: Vzorek 3D návrhu AL; Simulované a naměřené rozložení intenzity akustického pole	12
Obr. 4: Ilustrace dvou přístupů maskování tepelné neviditelnosti. Vlevo, ilustrace tepelného neviditelného pláště pomocí transformace souřadnic. Vpravo, ilustrace tepelného neviditelného pláště pomocí metody potlačení rozptylu [10].	13
Obr. 5: Model struktury PMM materiálu [11].	14
Obr. 6: Schematické znázornění chování v tlaku a tahu konvenčního a auxetického materiálu	15
Obr. 7: Deformační profil ne-auxetického (vlevo) a auxetického materiálu (vpravo) [16].....	16
Obr. 8: Schematické znázornění synklastického (a) a antiklastického chování (b) [13]	17
Obr. 9: Schematické znázornění využití variabilní propustnosti pro aplikace.....	18
Obr. 10: Schematické znázornění voštinové struktury (vlevo), jejího chování při jednoosém namáhání v tahu (uprostřed) a re-entrantní buňky s parametry určujícími chování auxetika (vpravo)	19
Obr. 11: Další typy re-entrantních struktur: hrot šípů (a), kosočtvercová mřížka (b), čtvercová mřížka (c), 3 - hvězda (d), 4 - hvězda (e), 6 - hvězda (d).....	19
Obr. 12: Schematické znázornění 3D re-entrantní jednotkové buňky a 3D re-entrantní mřížky [14, 16]	20
Obr. 13: Příklady vybraných rotačních jednotek auxetických struktur: zleva: čtvercová, obdélníková, trans-obdélníková, bi-čtvercová, trojúhelníková.....	20
Obr. 14: Jednotková buňka rotujícího obdélníkového modelu	21
Obr. 15: Schematické znázornění deformace rotující tuhé obdélníkové konstrukce. Vlevo – struktura bez zatížení, vpravo – zatížení tahem ve směru x.....	21
Obr. 16: Schematické znázornění některých typů chirálních struktur	21
Obr. 17: Schematické znázornění deformace hexachirální struktury při tlakovém namáhání. Vlevo je struktura před zatížením, vpravo je struktura tlakově zatížená ve směru y, v důsledku čehož došlo k rotaci centrálních válců a konstrikci celé struktury [16].	22
Obr. 18: Graf závislosti tuhosti k na počtu jednotek N [30].	23
Obr. 19: Buněčná struktura korku: (A) tangenciální řez; (B) příčný řez; a (C) radiální řez [26]	23
Obr. 20: Krystalová struktura pyritu [34].	26
Obr. 21: Znázornění jednotkové buňky voštinové struktury s proměnným úhlem θ a tloušťkou stěny t	27
Obr. 22: Schematické znázornění AGAH struktury [38]	27
Obr. 23: Schematické znázornění TGAH struktury [38]	28
Obr. 24: Schematické znázornění hybridní auxetické struktury [39].	28
Obr. 25: Schematické znázornění návrhu hybridní auxetické struktury [40]	29
Obr. 26: Schématické znázornění FDM procesu [42].	30

Obr. 27: Schematické znázornění technologie SLA, typ „bottom-up“ (a) a top-down (b) [43]	30
Obr. 28: Schematické znázornění principu DLW [45]	31
Obr. 29: Modely navržených auxetických struktur	33
Obr. 30: Rozhraní sliceru Ultimaker Cura 5.0 zachycující monitoring tisku auxetické struktury	34
Obr. 31: Snímek tiskárny Creality CR 10S [49]	35
Obr. 32: Schematické znázornění přímého extrudéru (vlevo) a bowdenového extrudéru (vpravo)	36
Obr. 33: Snímek tiskárny Creality Sermoon V1 PRO [50]	36
Obr. 34: Testovaný vzorek tištěný z bílého TPU a přední strana obarvená kontrastní červenou lihovou barvou	38
Obr. 35: Výchozí rozhraní vytvořené konzolové aplikace	39
Obr. 36: Rozhraní aplikace s nahranými snímky a vyznačenou oříznutou oblastí	40
Obr. 37: Rozhraní aplikace se snímek vzorků po stisknutí tlačítka „Show“	41
Obr. 38: Rozhraní aplikace se snímek vzorků po aplikaci barevného filtru	41
Obr. 39: Vyznačení měřené oblasti Poissonova poměru u snímků pomocí tlačítek Set measuring H1 line 1 a Set measuring H2 line 1	42
Obr. 40: Rozhraní aplikace po stisknutí tlačítka „Porosity“	43
Obr. 41: Vývojový diagram znázorňující jednotlivé kroky algoritmu filtru použitého pro vyhodnocení Poissonova poměru	44
Obr. 42: Snímek ze simulace jednoosého zatížení struktury v softwaru Fusion 360 s vyznačenými parametry pro výpočet Poissonova poměru	45

ÚVOD

Práce je zaměřena na problematiku vlivu technologie tisku, materiálu a počtu jednotkových buněk na deformační odezvu auxetických struktur. K charakterizaci auxetických struktur jsou použity výstupy pořízené statickou zkouškou v tlaku. Vyhodnocení Poissonova poměru a relativní změny porozity je provedeno pomocí vytvořené softwarové aplikace. Auxetické materiály jsou poměrně novým fenoménem s širokou škálou potenciálních aplikací. Jedinečnost těchto materiálů spočívá v jejich chování při deformaci, kdy se při stlačení, na rozdíl od konvenčních materiálů, smršťují a vykazují tak záporný Poissonův poměr. Tato deformační odezva není dána konstitučním materiálem, ale architekturou vnitřní struktury. V současné době je největší otázkou jejich komerční výroba, která zpomaluje uvedení auxetik do praxe.

První část diplomové práce zahrnuje literární rešerši problematiky auxetických materiálů. Jsou zde uvedeny základní poznatky týkající se různých druhů metamateriálů a jejich využití. Zvláštní pozornost je věnována auxetickým materiálům, jejich vlastnostem, struktuře a nejnovějším poznatkům z oblasti výzkumu. Na závěr jsou popsány možné metody pro přípravu auxetických struktur.

V experimentální části je popsán návrh a tvorba modelu auxetické struktury, technologie přípravy vzorků a použité materiály. Část se věnuje charakterizaci auxetických struktur, statické zkoušce v tlaku, vyhodnocení Poissonova poměru a porozity. V uvedené pasáži je představena aplikace pro vyhodnocení Poissonova poměru a porozity, návod pro použití vytvořené aplikace a dále je zde vysvětlen princip jejího fungování.

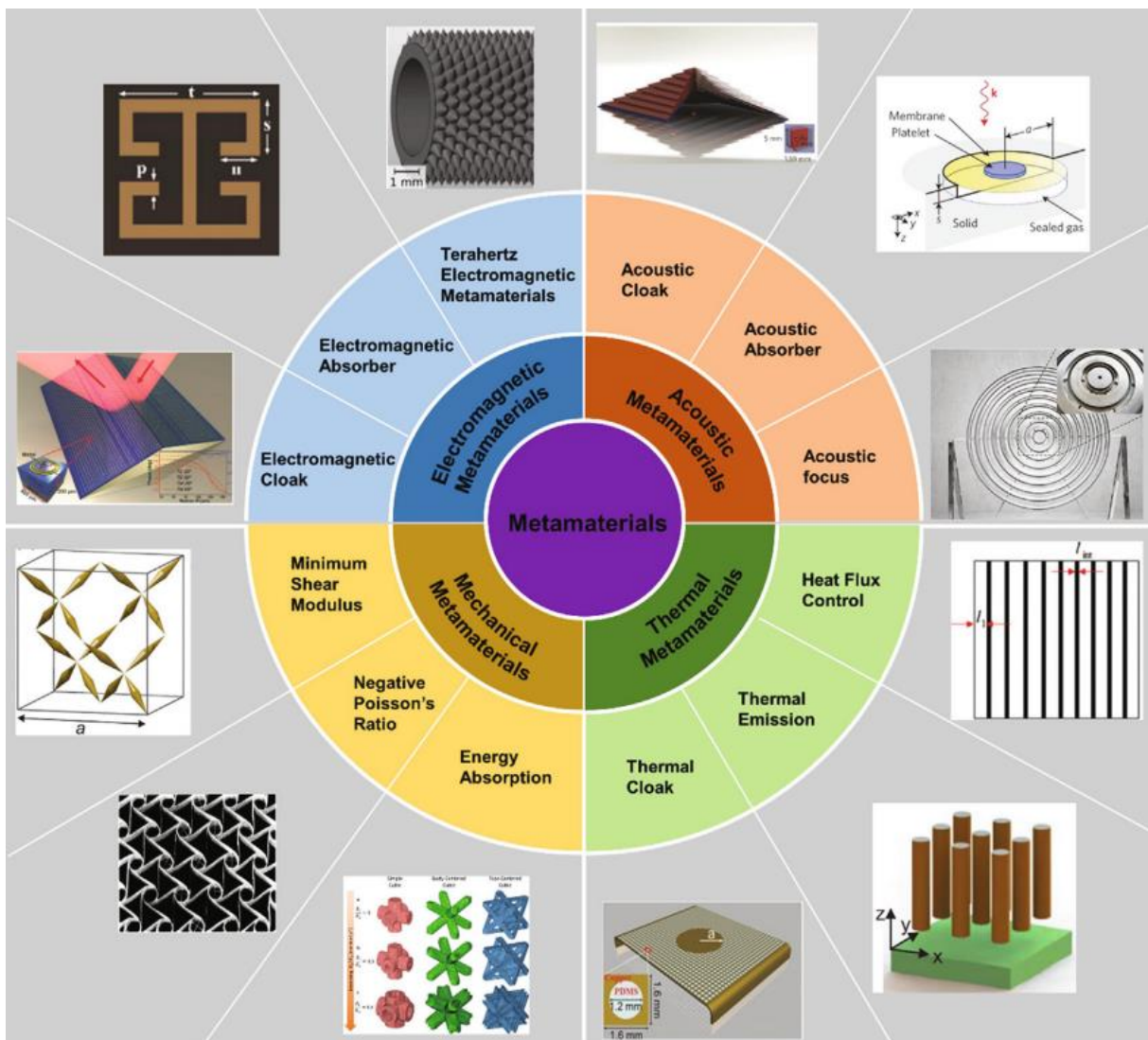
V kapitole Výsledky a diskuse je pak na základě zjištěných výsledků specifikován vliv zkoumaných parametrů na mechanické vlastnosti a auxetické chování připravených vzorků. První kapitola se věnuje vlivu typu 3D tiskárny na deformační odezvu a auxetické chování. Druhá kapitola je zaměřena na vliv materiálu a počtu jednotkových buněk na výše uvedené vlastnosti, tedy konkrétně modul pružnosti, mez kluzu, Poissonův poměr a porozitu. Ve třetí kapitole je sledována distribuce deformační odezvy jednotkových buněk v rámci vzorku.

1 Teoretická část

1.1 Metamateriály

Pojem metamateriál (z řec. *meta*, což znamená „mimo“ nebo „za“) je definován jako materiál, jehož vlastnosti jsou neobvyklé a často přesahují vlastnosti konvenčních přírodních materiálů. Mimořádné vlastnosti těchto metamateriálů jsou dány primárně strukturální geometrií, nikoli inherentními vlastnostmi jejich konstitučních materiálů. Struktura je dána periodicky uspořádanými strukturálními jednotkami označovanými jako jednotkové buňky. Vlastnosti jsou laditelné v širokém rozsahu, a to pouhou změnou architektury jednotkových buněk [1,2].

V současné době lze metamateriály, na základě jejich vlastností, rozdělit do čtyř kategorií: elektromagnetické metamateriály (EMM), akustické metamateriály (AMM), tepelné metamateriály (TMM) a mechanické metamateriály (MMM) (Obr. 1) [3].



Obr. 1: Schématické rozdělení metamateriálů [3]

1.1.1 Elektromagnetické metamateriály

Elektromagnetické metamateriály (EMM) jsou uměle vyrobené kompozitní materiály s periodickou strukturou na subvlnové škále, které vykazují významné elektromagnetické vlastnosti. EMM jsou charakterizovány negativní magnetickou permeabilitou μ , negativní elektrickou permitivitou ε a negativním indexem lomu n . Zmíněné charakteristiky lze modulovat výchozím materiálem, topologickým uspořádáním a prostorovým rozložením struktur [3].

Jednou ze zajímavých aplikací těchto materiálů jsou tzv. maskovací pláště, které jsou schopné ohýbat elektromagnetické vlny kolem objektu tak, aby byl neviditelný. Jev souvisí se snížením přímého a zpětného rozptylu od zakrytého objektu [4].

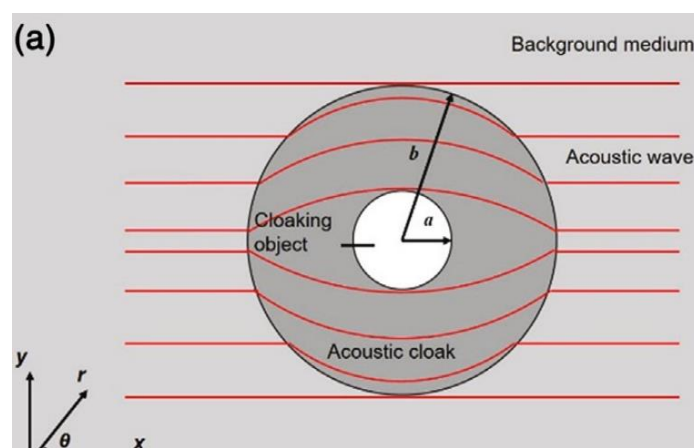
Dále je EMM možné použít jako absorber elektromagnetických vln. Což může přispět ke snížení, v dnešní době stále rostoucího, elektromagnetického rušení.

V poslední době jsou stále více diskutované terahertzové elektromagnetické metamateriály. Terahertzové (THz) elektromagnetické vlny mají frekvenční rozsah od 0,1 THz do 10 THz, který leží mezi mikrovlnnými frekvencemi a frekvencemi optických vln. Díky využití výhod obou sousedních oblastí spektra umožňuje pásmo THz aplikace, jako je komunikace a snímání. Díky většímu rozsahu pásma a nižší latenci umožňuje zvýšenou rychlost přenosu dat z úrovně Gb/s na Tb/s. Pozornost je věnována také THz sensorům, a to nejen kvůli pozorovatelným intramolekulárním a intermolekulárním vibračním módům mnoha chemických látek a biologických makromolekul v této oblasti, ale také kvůli nedestruktivním, neionizačním a neinvazivním vlastnostem ve srovnání s jinými frekvencemi [5].

1.1.2 Akustické metamateriály

Akustické metamateriály (AMM) jsou materiály, jejichž periodickou strukturou lze manipulovat s akustickými vlnami. AMM jsou navrženy tak, aby vykazovaly záporný efektivní objemový modul, zápornou efektivní hustotu hmoty a záporný index lomu. Díky těmto vlastnostem lze AMM využít k absorpci či fokusaci akustických vln, maskování či vyvolání reverzního Dopplerova jevu [6].

Akustický plášť (AC; z *angl. Acoustic cloaking*) představuje kompaktní oblast z daného metamateriálu, obklopující maskovaný předmět. Akustické vlny dopadající ze všech směrů prochází pláštěm a kolem předmětu projdou tak, jako by nebyl přítomen (Obr. 2) [3].



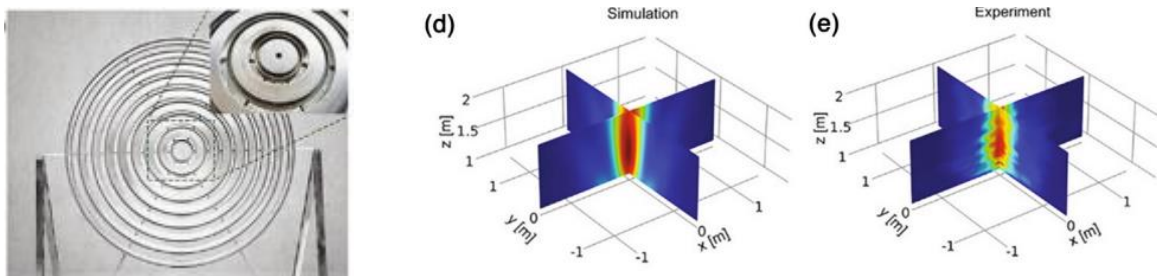
Obr. 2: Schematické znázornění vlnové dráhy přes akustický plášť [3]

Akustické absorbéry slouží k útlumu akustického vlnění. Jejich účinnost se charakterizuje koeficientem útlumu. Nízko frekvenční zvukové vlny (LFV), zejména v rozsahu nižším než 1000 Hz, jsou produkovány řadou denně používaných zařízení kolem nás. Jsou hrozbou nejen pro fyzické, ale i pro psychické zdraví člověka a ovlivňují správnost výsledků měřicích zařízení. LFV jsou silně pronikavé a je obtížné je konvenčními materiály rozptýlit. Existuje několik typů akustických metamateriálů, např. Helmholtzovy rezonátory, rezonátory s dělenou trubicí, membránové absorbéry a další [7].

Akustické fokusace (zaostření) je možné dosáhnout dvěma způsoby, a to pomocí reflexe (odraz) anebo refrakce (lom). V současné době je předmětem výzkumu především refrakční fokusace prostřednictvím akustické čočky (AL, z angl. *Acoustic lens*). Jedním z možných přístupů, jak dosáhnout AL je vytvořit metamateriál s negativním indexem lomu a druhým možným řešením je napodobení biosonaru. Metamateriály se řídí zobecněným Snellovým zákonem (rovnice 1), ze kterého plyne, že s akustickými vlnami lze manipulovat modulací akumulární rychlosti změny fáze $d\Phi(x)/dx$.

$$n_2 \sin \theta_t - n_1 \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx}, \quad (1)$$

kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu prostředí, θ_i a θ_t jsou dopadající a úhel lomu na rozhraní a $d\Phi(x)/dx$ je kumulativní rychlost změny fáze na rozhraní se souřadnicí, tj. rychlost změny zvukové cesty. Na základě Snellova zákona byly navrženy mikrostruktury, pro dosažení efektu akustické fokusace. Výborného výkonu dosahují mikrostruktury založené na svinutém materiálu (Obr. 3), kdy změnou různých parametrů cívky lze modulovat vlastnosti [3,8].



Obr. 3: Vzorek 3D návrhu AL; Simulované a naměřené rozložení intenzity akustického pole vyrobené AL [8]

1.1.3 Tepelné metamateriály

Tepelné metamateriály (TMM) mají díky uměle navržené struktuře výjimečné vlastnosti, týkající se přenosu tepla. Jedním z atributů TMM je možnost směřování tepelné vodivosti, dále laditelná elektrotermie a indukovaná anizotropie. TMM pak upravují tepelný tok prostřednictvím tepelného gradientu (∇T) pomocí Fourierova zákona vedení tepla (rovnice 2).

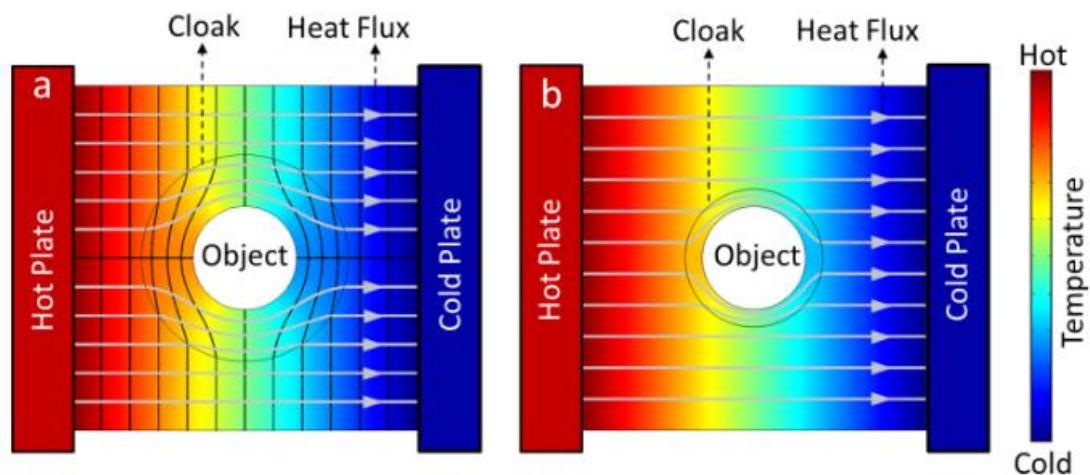
$$\vec{q} = -\lambda \nabla T, \quad (2)$$

kde q je tepelný tok, λ je koeficient tepelné vodivosti a T je teplota.

Tyto materiály se uplatňují jako tepelné koncentrátoři (koncentrují tepelný tok do určitého místa), tepelné rotátory (otáčejí tok tepla), tepelné pláště a kamufláže (propustí tepelnou stopu objektu B jako náhradu za tepelnou stopu objektu A) [3].

Řízení tepelného toku je výhodné pro kontrolu a usměrňování tepelné energie a snížení tepelných ztrát. Těchto vlastností lze dosáhnout použitím TMM sestaveného překrýváním materiálů s vysokou a nízkou tepelnou vodivostí namísto konvenčního homogenního materiálu [3].

Tepelný neviditelný plášť, inspirovaný optickými neviditelnými plášti, je zařízení, které dokáže usměrňovat vodivý tepelný tok kolem izolovaného objektu, aniž by se změnilo rozložení okolní teploty, takže objekt může být "neviditelný" pro vnější tepelné prostředí. Existují dva přístupy, jak dosáhnout tepelného maskování (Obr. 4). Jeden je založený na principu transformace souřadnic, podobně jako u elektromagnetických vln. Druhý přístup je založen na principu rušení rozptylu [10].



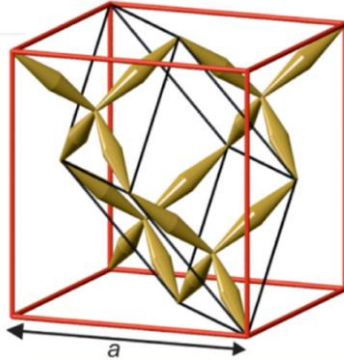
Obr. 4: Ilustrace dvou přístupů maskování tepelné neviditelnosti. Vlevo, ilustrace tepelného neviditelného pláště pomocí transformace souřadnic. Vpravo, ilustrace tepelného neviditelného pláště pomocí metody potlačení rozptylu [10].

1.1.4 Mechanické metamateriály

Mechanické metamateriály (MMM) jsou umělé materiály navržené tak, aby vykazovaly jedinečné mechanické vlastnosti jako negativní Poissonův poměr, minimální smykový modul a další kombinace vlastností, které umožňují absorpci velkého množství energie [10].

MMM s nízkým až nulovým efektivním smykovým modulem napodobují chování tekutin, ale jsou pevné, těžko stlačitelné, ale snadno deformovatelné. Návrh takové architektury je koncipován tak, aby struktura měla velký, ale reálně dosažitelný poměr efektivního objemového modulu ve srovnání s modulem ve smyku. Předmětem výzkumu jsou především pentamodové metamateriály (PMM), kde „penta“ značí pět, což odkazuje na pět nulových hodnot v tenzoru pružnosti izotropních materiálů. Čím větší je Poissonův poměr, tím lépe se tělesa PMM hodí k simulaci kapalin. Pentamodových vlastností bylo dosaženo díky vysoce lokalizované deformaci pomocí roztavených bodových drobných hrotů dvojkonusů tuhého tělesa (Obr. 5). Při konstrukci PMM se používá jeden izotropní materiál s extrémně velkými

moduly pružnosti a druhý s extrémně malými moduly pružnosti, aby se vytvořily kompozity s efektivními tenzory pružnosti a realizovala se 3D transformační elastodynamika analogická transformační optice v elektromagnetických metamateriálech. Dokonalý izotropní pentamodický materiál má nulový modul pružnosti ve smyku, a Poissonův poměr roven hodnotě 0,5.



Obr. 5: Model struktury PMM materiálu [11]

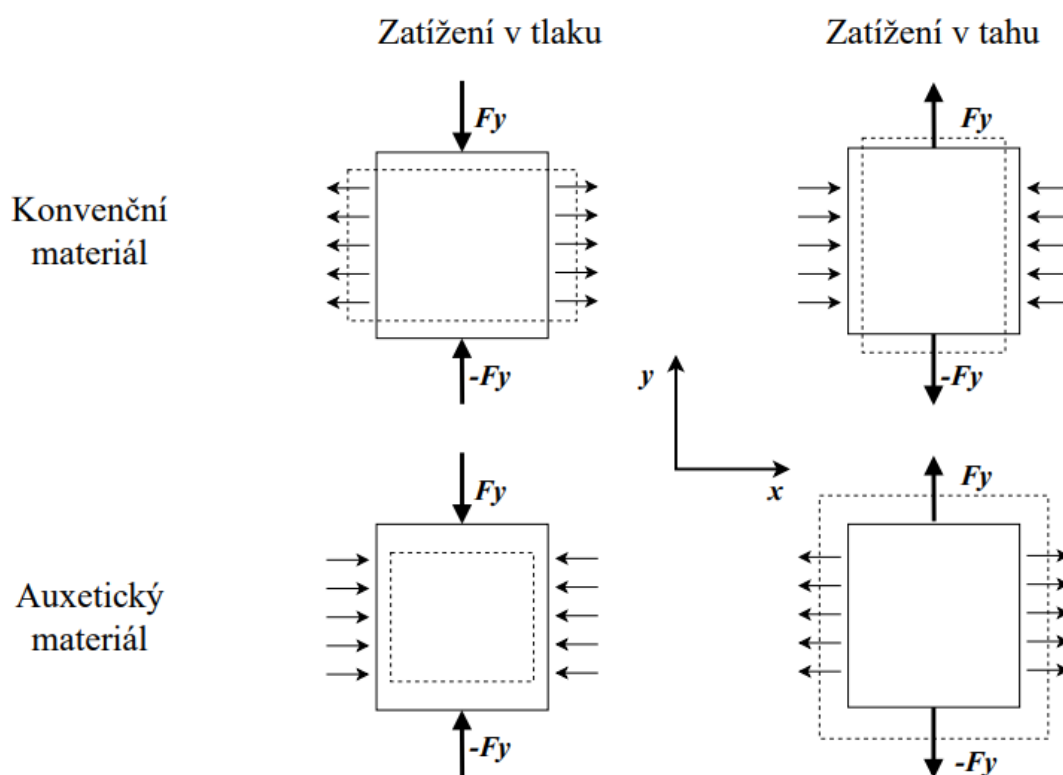
Struktury MMM, které jsou specifické pohlcením velkého množství energie a struktury se záporným Poissonovým poměrem, tedy auxetické struktury se konstrukčně i aplikačně prolínají. Vzhledem k tomu, že jsou předmětem této práce především auxetické struktury, je jim věnována samostatná kapitola.

1.2 Auxetické metamateriály

Auxetické metamateriály (auxetika) jsou materiály, které vykazují záporný Poissonův poměr, z čehož plyne jejich kontrainuitivní chování. Poissonův poměr je definován jako záporný poměr příčného přetvoření (prodloužení/zkrácení) ε_y k přetvoření podélnému ε_x (rovnice 3) [12]. Historie těchto materiálů není dlouhá, v roce 1987 popsal R. S. Lakes strukturu pěny, která vykazovala záporný Poissonův poměr. Pojem „auxetický“ byl poprvé použit v článku v roce 1991, kde ho zavedli Evans *et al.* z důvodu zjednodušení zdlouhavého popisu záporného Poissonova poměru [12, 13].

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad (3)$$

Hlavním rysem auxetik je jejich chování při deformaci, a to zejména při jednoosém zatěžování. Konvenční materiály se při zatěžování v tlaku (tahu) rozpínají (smršťují), zatímco auxetika se při zatěžování v tlaku (tahu) smršťují (rozpínají) (Obr. 6). Auxetické metamateriály se tak vyznačují jedinečnými materiálovými vlastnostmi, které z nich činí potenciální kandidáty pro aplikace, které zahrnují protézy, absorbery energie, tlumiče vibrací, inteligentní filtry, akustické izolátory a řadu dalších [14].



Obr. 6: Schematické znázornění chování v tlaku a tahu konvenčního a auxetického materiálu

1.2.1 Vlastnosti auxetických materiálů

Níže uvedené vlastnosti auxetických metamateriálů umožňují jejich potenciální použití v širokém rozsahu aplikací, jako jsou protézy, auxetické textilie, inteligentní senzory, inteligentní filtry, molekulární síta, výplně sedadel, tlumiče vibrací, akustické izolátory a řada dalších. Vzhledem k unikátním vlastnostem auxetik, je jim věnována stále větší pozornost. Je však poměrně obtížné využít tyto vlastnosti v reálných aplikacích, a to především kvůli komplikované výrobě složitých geometrických struktur.

1.2.1.1 Odolnost proti smyku

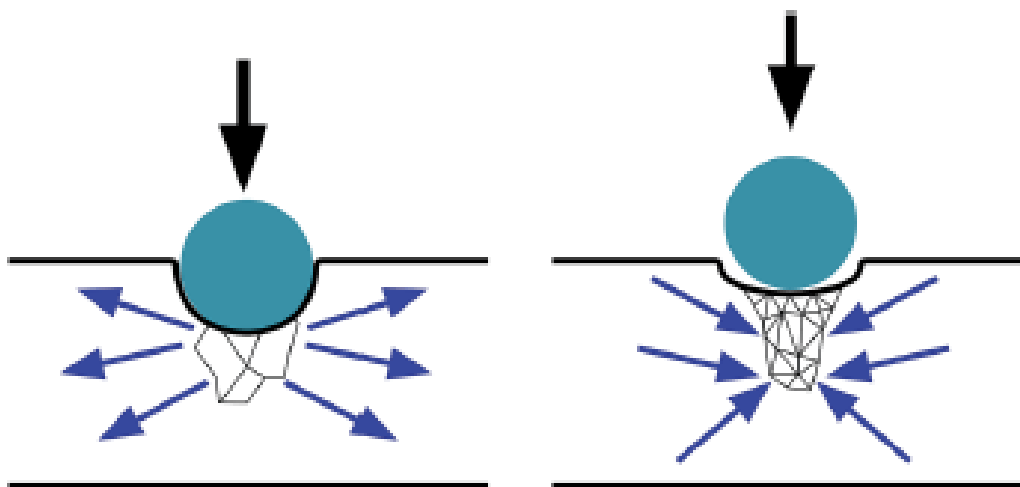
Podle klasické teorie pružnosti pro trojrozměrná izotropní tělesa lze elastické chování tělesa prezentovat dvěma ze čtyř konstant: Youngovým modulem (E), smykovým modulem (G), objemovým modulem (K) a Poissonovým poměrem (ν). Pohybujeme-li se v prostoru lze vztah mezi těmito konstantami prezentovat rovnicemi 4 a 5, ze kterých lze odvodit, že smykový modul je nepřímo úměrný Poissonovu poměru. Při působení smykových sil jsou auxetické materiály tedy odolnější než konvenční, jelikož mají záporný Poissonův koeficient [15,16].

$$G = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (5)$$

1.2.1.2 Odolnost proti vtláčení

Při lokálním působení síly na konvenční materiál dochází k přesunu hmoty do okolí viz Obr. 7 vlevo. U auxetického materiálu dochází k přesunu hmoty pod bod vtláčení a dochází tak k menší deformaci než u materiálu konvenčního (Obr. 7 vpravo).



Obr. 7: Deformační profil ne-auxetického (vlevo) a auxetického materiálu (vpravo) [16]

Podle klasické teorie pružnosti je odolnost proti vtažení závislá na tvrdosti materiálu (H), což souvisí s Poissonovým poměrem podle rovnice 6.

$$H \propto \left[\frac{E}{(1 - \nu^2)} \right]^\gamma, \quad (6)$$

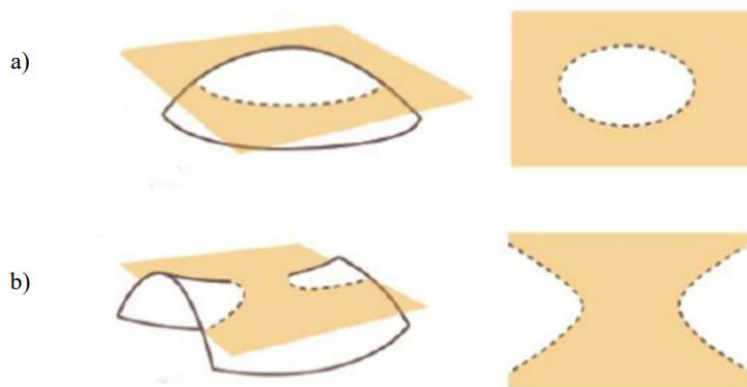
kde E je Youngův modul, ν je Poissonův poměr a γ je konstanta, která souvisí s rozložením tlaku. Z rovnice je patrné, že odolnost proti vtažení je nejvyšší pro Poissonův poměr roven hodnotám -1 a 1. Vzhledem k tomu, že hodnota Poissonova poměru pro izotropní materiály nemůže překročit 0,5, bude odolnost proti vtažení dosahovat nejvyšších hodnot pro Poissonovy poměry blízké se hodnotě -1 [14,16,17].

1.2.1.3 Odolnost proti lomu

Auxetické materiály mají oproti konvenčním vyšší lomovou houževnatost a trhliny se v nich šíří pomaleji. V případě kompozitů, auxetické kompozity vykazovaly téměř dvakrát vyšší lomovou houževnatost než běžné kompozity [18,19].

1.2.1.4 Synklastické chování

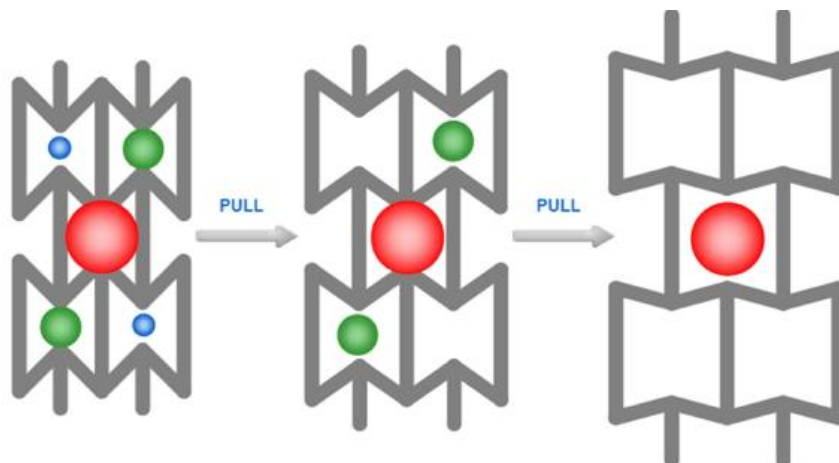
Synklastické chování je schopnost auxetik vytvářet kopulovité, synklastické povrchy při ohýbání. Popisuje, jak mají planární auxetické struktury tendenci vytvářet synklastické zakřivení, když jsou vystaveny ohybovému momentu mimo rovinu. Je to tedy chování, které je v rozporu s chováním konvenčních elastických materiálů, které vykazují při ohybové deformaci antiklastické zakřivení (Obr. 8) [13,14].



Obr. 8: Schematické znázornění synklastického (a) a antiklastického chování (b) [13]

1.2.1.5 Variabilní propustnost

Auxetické materiály mají porézní strukturu a velikosti pórů jsou laditelné pomocí deformace. Tato skutečnost představuje významný potenciál pro aplikace v oblasti chytrých filtrů (Obr. 9). Laditelná permeabilita lze využít od makroměřítek až po materiály v nanoměřítku [14].



Obr. 9: Schematické znázornění využití variabilní propustnosti pro aplikace v oblasti chytrých filtrů [20]

1.2.1.6 Absorpce energie

Ve srovnání s konvenčními materiály vykazují auxetické materiály vynikající vlastnosti, pokud jde o tlumení a absorpci zvuku. Za účelem absorpce zvuku se využívají auxetické pěny, jejich schopnost pohlcovat zvuk závisí na velikosti pórů. Bylo experimentálně prokázáno, že koeficient ultrazvukového útlumu auxetického ultravysokomolekulárního polyetyleny (UHMWPE; *Ultra-high-molecular weight polyethylene*) byl 1,5krát vyšší než koeficient neauxetického mikroporézního UHMWPE [21]. Auxetika lze využít jako absorbery energie například při výbuchu, kdy mohou kompozitní panely s auxetickým jádrem prostřednictvím plastické deformace absorbovat až dvojnásobné množství energie [22, 23].

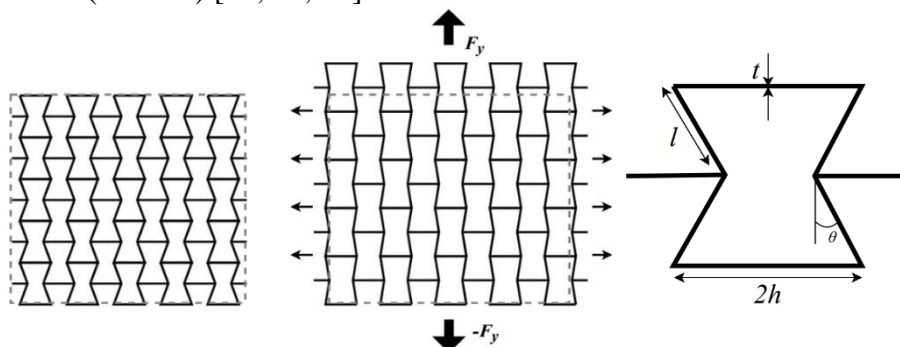
1.2.2 Buněčné auxetické struktury

Architektura buněk auxetických struktur má přímý vliv na jejich výsledné vlastnosti. Existuje několik typů buněčných struktur, z nichž některé mohou vykazovat auxetické chování ve dvou směrech (2D auxetické struktury) a jiné ve třech směrech (3D auxetické struktury).

1.2.2.1 Re-entrantní struktury

Tradiční voštinovou strukturu lze modifikovat zavedením konkávních stěn, čímž vznikne typická re-entrantní struktura. Tyto struktury jsou vysoce anizotropní, což je jeden z požadavků pro to, aby se materiál choval auxeticky. Buněčnými strukturami se prvně zabývali Gibson *et al.*, navrhli buněčnou strukturu ve formě opakujících se včelích pláství. Rovněž zjistili, že auxetické chování vykazují struktury v důsledku ohybu diagonálních žeber. Tradiční re-entrantní struktura je zobrazena na obr. 10, kdy při působení tahového zatížení v axiálním

směru, probíhá rotace diagonálních žebër ve vertikálním směru, což vede k expanzi v příčném směru konstrukce (Obr. 10) [12, 14, 24].



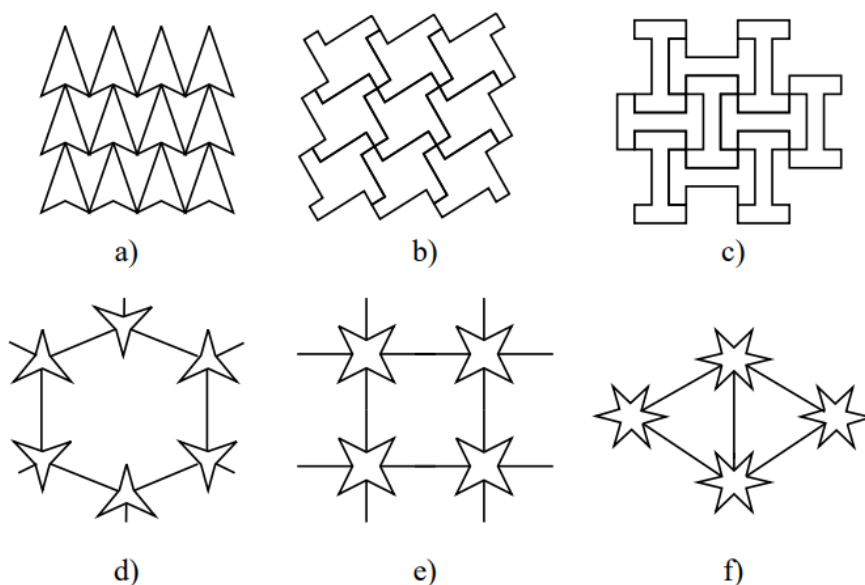
Obr. 10: Schematické znázornění voštinové struktury (vlevo), jejího chování při jednoosém namáhání v tahu (uprostřed) a re-entrantní buňky s parametry určujícími chování auxetika (vpravo)

Poissonův poměr a Youngův modul dvourozměrné auxetické voštinové struktury spolu se směrem zatížení lze získat pomocí rovnic 7 a 8, kde h , l , t , θ jsou definovány na Obr. 10 a E_s je vnitřní Youngův modul materiálu tvořícího buněčné stěny [27].

$$\nu_{12} = \frac{\sin \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^3 \theta} \quad (7)$$

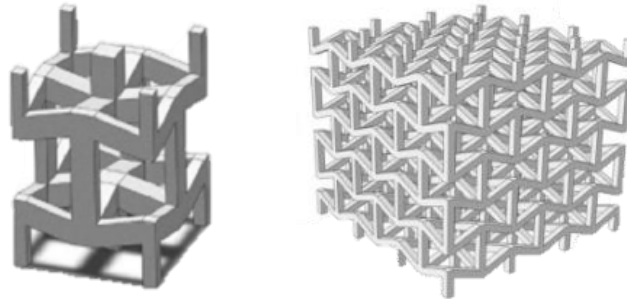
$$E_1 = \frac{E_s S \left(\frac{t}{l} \right)^3 \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^3 \theta} \quad (8)$$

Kromě typické voštinové struktury existuje i řada dalších re-entrantních struktur, které jsou vyobrazeny na Obr. 11. Stejně jako u voštinové struktury, lze délkou žebër a úhly mezi žebry, ladit auxetické vlastnosti modelů [16].



Obr. 11: Další typy re-entrantních struktur: hrot šípů (a), kosočtvercová mřížka (b), čtvercová mřížka (c), 3 - hvězda (d), 4 - hvězda (e), 6 - hvězda (d)

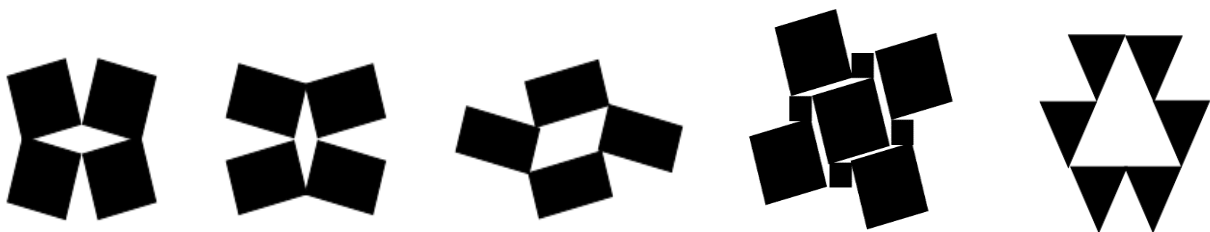
Rozšířením konceptu 2D re-entrantní voštinové struktury navrhli Schwerdtfeger *et al.* 3D strukturu, která vykazuje záporný Poissonův poměr ve třech směrech. Evans *et al.* představili jednotkovou buňku a 3D mřížku, která je znázorněna na Obr. 12 [14].



Obr. 12: Schematické znázornění 3D re-entrantní jednotkové buňky a 3D re-entrantní mřížky [14, 16]

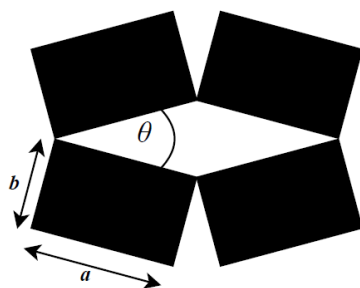
1.2.2.2 Struktury s rotujícími buňkami

Auxetické struktury s rotujícími buňkami prezentovali Grima a Evans [29]. Jde o rigidní nebo semi-rigidní jednotkové buňky, které jsou ve vybraných vrcholech spojeny pomocí kloubů. Při působení tahového zatížení vzniká v jednotkách točivý moment, který je otáčí buď ve směru hodinových ručiček, nebo proti směru hodinových ručiček, tj. v opačném směru než sousední jednotky. Jednotkové buňky mohou mít tvar trojúhelníku, čtverce, obdélníku, čtyřstěnu aj., viz Obr. 13 [15].

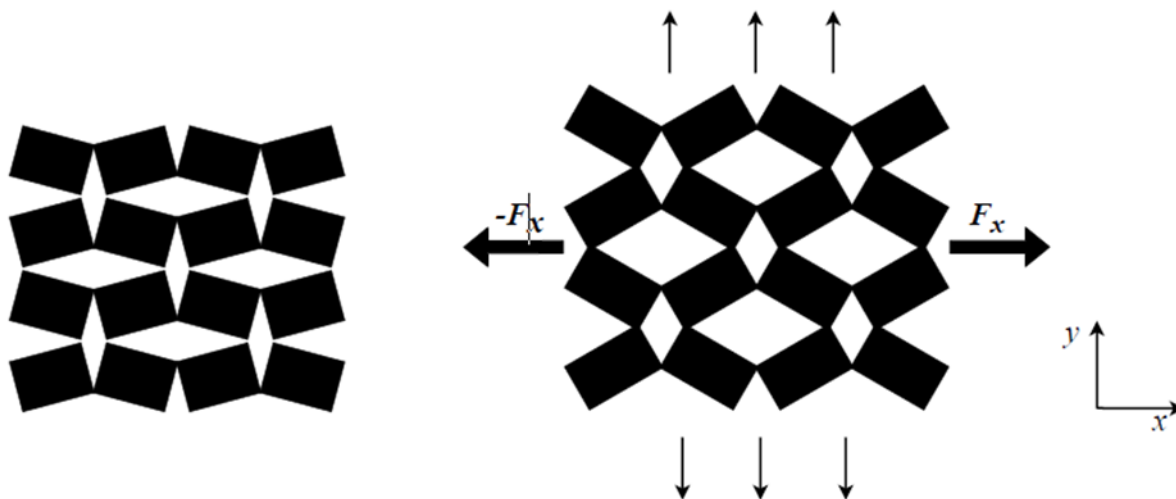


Obr. 13: Příklady vybraných rotačních jednotek auxetických struktur: zleva: čtvercová, obdélníková, trans-obdélníková, bi-čtvercová, trojúhelníková

Za předpokladu, že jednotkové buňky struktury jsou rigidní, systém teoreticky vykazuje konstantní Poissonův poměr $\nu = -1$. Jsou-li jednotkové buňky semi-rigidní, pak je Poissonův poměr závislý na relativní tuhosti těchto jednotek (tuhosti kloubů) a směru zatížení. Mechanické vlastnosti struktur s rotujícími buňkami lze ladit na základě volby délky stran jednotek a , b a úhlu θ , který mezi sebou svírají (obr. 14). Na Obr. 15 je pak schematicky znázorněn mechanismus auxetického chování struktur s rotujícími buňkami [12,16].



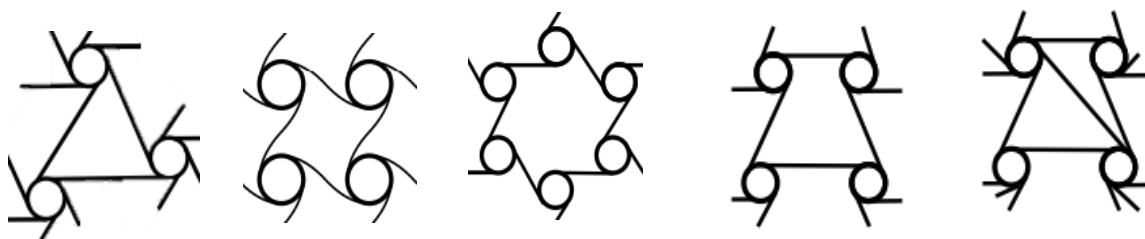
Obr. 14: Jednotková buňka rotujícího obdélníkového modelu



Obr. 15: Schematické znázornění deformace rotující tuhé obdélníkové konstrukce. Vlevo – struktura bez zatížení, vpravo – zatížení tahem ve směru x

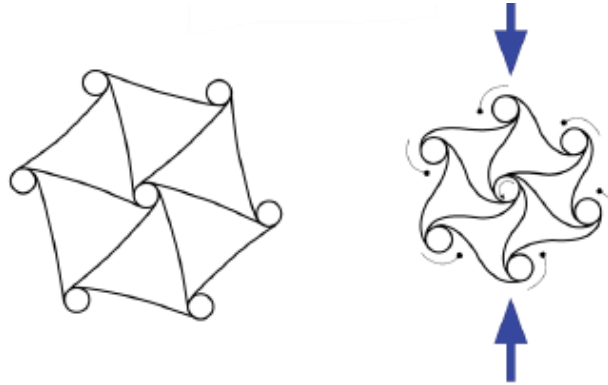
1.2.2.3 Chirální struktury

Chirální struktury jsou struktury s vysokou porézností, což umožňuje konstrukci velice lehkých struktur. Slovo „chirální“ označuje objekt, který není totožný se svým zrcadlovým obrazem, nemá střed ani rovinu symetrie, ale může mít rotační osu symetrie. Běžné chirální struktury jsou uvedeny na Obr. 16.



Obr. 16: Schematické znázornění některých typů chirálních struktur

Typická chirální jednotka obsahuje zapouzdřený centrální válec s tangenciálně připojenými žebry. Tato žebra se při deformaci navíjí (odvíjí) na centrální válec, přenesené napětí generuje na jednotkové buňky točivý moment, který má za následek zúžení nebo expanzi celé struktury (Obr. 17). Popsané základní jednotky mohou být konstruovány pravotočivě nebo levotočivě, čímž vznikají chirální nebo antichirální struktury [12, 15].



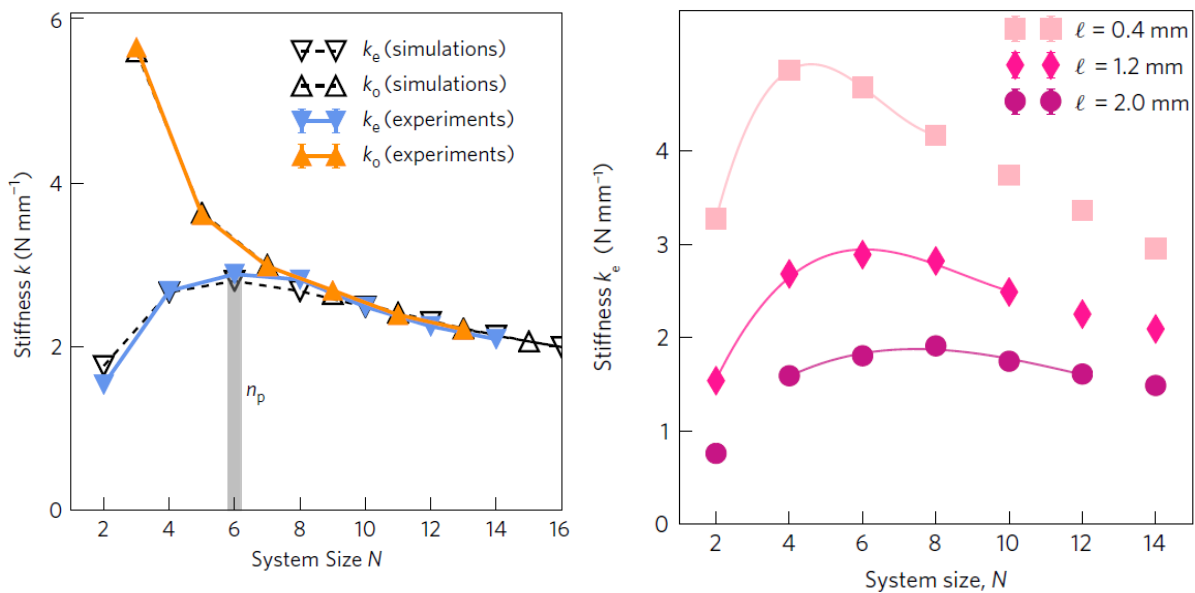
Obr. 17: Schematické znázornění deformace hexachirální struktury při tlakovém namáhání. Vlevo je struktura před zatížením, vpravo je struktura tlakově zatížená ve směru y , v důsledku čehož došlo k rotaci centrálních válců a konstrikcí celé struktury [16].

1.2.3 Vliv velikosti systému na deformační chování

Deformační chování jednotkové buňky nevypovídá o globálních vlastnostech systému. Na deformační chování struktury má velký vliv způsob, kterým jsou jednotkové buňky spojeny. Spoje určují mechanismus přenosu sil mezi jednotkami a jsou zodpovědné za to, jak vnější síly působí na materiál [29].

Na celkové deformační chování systému může mít rovněž vliv počet jednotkových buněk. V závislosti na typu struktury, může mít významný vliv i to, zda je počet buněk sudý nebo lichý. Tato skutečnost může změnit způsob, jakým se síly šíří po sousedních buňkách, a změnit globální chování, jako je tomu u soustavy protiběžných čtverců. Coulais et *al.* zjistili, že pro malé systémy platí, že tuhost k_o pro lichý počet jednotek N je mnohem větší než tuhost k_e pro sudé N . Z grafu na Obr. 18 (vlevo) lze pozorovat, že zatímco k_o klesá s rostoucím N , tak k_e s rostoucím N roste. Hodnota k_e má maximum v n_p pro větší N se k_e blíží k_o a obě hodnoty pak s velikostí systému klesají [30].

Coulais et *al.* rovněž zkoumali vliv délky spoje na tuhost systému. Z Obr. 18 (vpravo), je patrné, že nejvíce se vliv délky spoje projevuje při nízkém počtu jednotek. S rostoucím počtem jednotek klesá vliv délky spoje na celkovou tuhost systému [30].

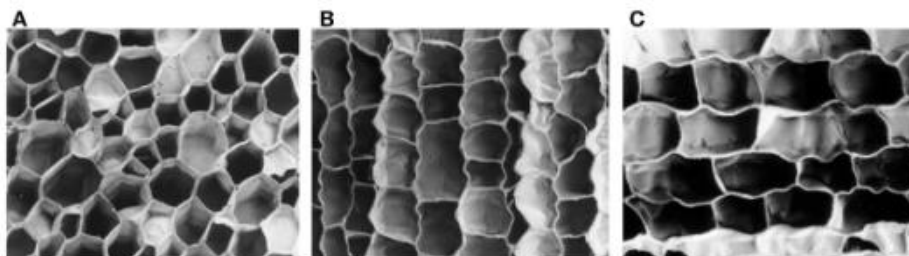


Obr. 18: Graf závislosti tuhosti k na počtu jednotek N [30]

1.2.4 Porovnání auxetických geometrií

U auxetických struktur je sledována řada mechanických vlastností (maximální objemová nebo plošné redukce, ekvivalentní Youngův modul, hustota) na základě kterých, je lze porovnávat. Největší pozornost je však věnována již mnohokrát zmiňovanému Poissonovu poměru (rovnice 3), o kterém lze říci, že je mírou auxeticity materiálu.

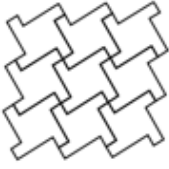

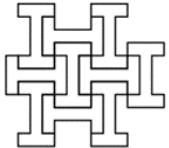
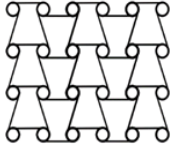
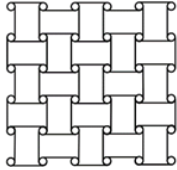
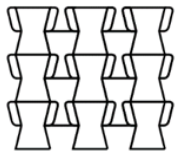
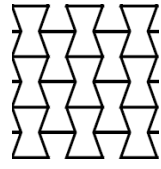
Konvenční materiály mají Poissonův poměr kladný, např. kaučuk ($\nu = 0,5$), hliník ($\nu = 0,33$), ocel ($\nu = 0,27$) a další. Na pomyslné hranici mezi konvenčními a auxetickými materiály leží korek, jehož Poissonův poměr $\nu = 0$. Struktura korku je kompaktní s pravidelným uspořádáním šestihránných jednotkových buněk. Na Obr. 19 lze vidět strukturu korku v tangenciálním řezu (A), v příčném řezu (B) a v řezu radiálním (C). Důležitým strukturním znakem je zvlnění radiálně zarovnaných buněčných stěn, které vzniká tlakovým namáháním během růstu korku [20, 28].



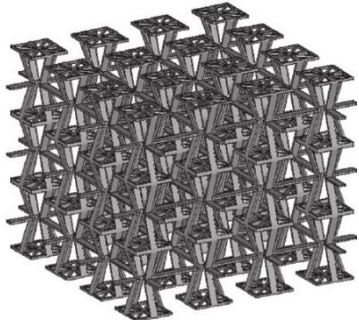
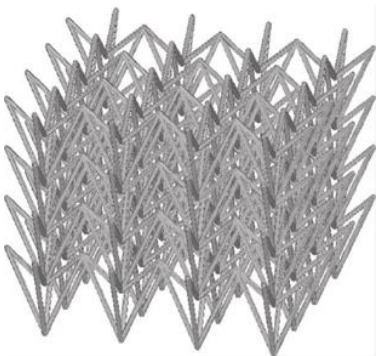
Obr. 19: Buněčná struktura korku: (A) tangenciální řez; (B) příčný řez; a (C) radiální řez [26]

Latanada a Elipe [31] vytvořili srovnávací studii 2D a 3D auxetických geometrií pomocí počítačových simulací softwaru CAD-CAE. Simulaci podrobili 25 rovinných struktur a 5 prostorových struktur, vybrané výsledky jsou uvedeny v Tab. 1 a Tab. 2.

Tab. 1: Přehled vybraných rovinných auxetických struktur a odpovídající hodnoty Poissonových poměrů [31]

Model geometrie	Název struktury	Poissonův poměr [-]
	Čtvercová mřížka (Lozenge grid square)	-0,33
	Re-entrantní sinusoidální struktura (Re-entrant sinusoidal)	-0,81
	Struktura čtvercové sítě (Square grid)	-0,90
	Chirální kruhová symetrická struktura (Chiral circular symmetric)	-0,93
	Chirální čtvercová symetrická struktura (Chiral square symmetric)	-0,97
	Chirální obdélníková symetrická struktura (Chiral rectangular symmetric)	-1,18
	Re-entrantní voštinová struktura (Re-entrant)	-1,68

Tab. 2: Vybrané prostorové modely auxetické struktury dosahující nejnižšího Poissonova poměru [31]

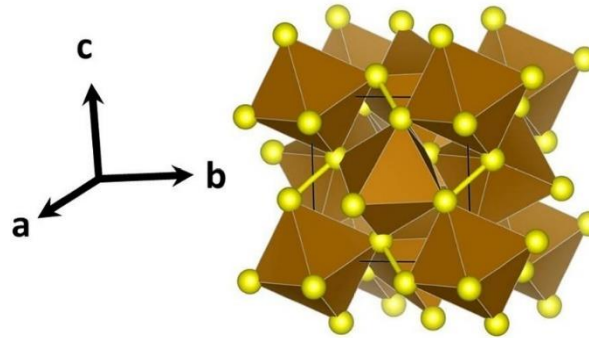
Model geometrie	Název struktury	Poissonův poměr [-]
	Re-entrantní kvádrová struktura (Re-entrant cuboid design)	-1,79
	Pyramidová struktura (Pyramid structure)	-0,81

V Tab. 1 lze pozorovat, že nejnižší Poissonův poměr z 2D struktur má typická re-entrantní voštinová geometrie, jehož hodnota může dosáhnout až -1,68. Nízkých hodnot rovněž dosahují některé typy chirálních struktur a poté re-entrantní sinusoidální struktura. V Tab. 2 jsou výsledky simulace dvou typických 3D auxetických struktur. V případě re-entrantní kvádrové struktury lze teoreticky dosáhnout Poissonova poměru až -1,793, v případě pyramidové struktury okolo -0,8.

1.2.5 Přírodní auxetické materiály

Přestože je auxetické chování v přírodě neobvyklé, bylo prokázáno u několika přírodních struktur. Tyto materiály se označují názvem auxetické biomateriály a jejich výzkum je předmětem biomimetiky. Tedy vědního oboru, který se zabývá zkoumáním struktur a složení přírodních materiálů. Jejich vlastnosti se snaží napodobit a využít je pro vývoj nových technologií či řešení současných problémů.

Jedním z prvních přírodních materiálů, u kterého bylo na molekulární úrovni pozorováno auxetické chování byl monokrystalický pyrit (FeS_2) s kubickou mřížkou (Obr. 20), u kterého byl Poissonův poměr stanoven na hodnotu $\nu = -0,14$ [25]. Auxetické chování vykazuje rovněž α -cristobalit, u kterého však směrová závislost Poissonova poměru vykazuje výraznou anizotropii. Poissonův poměr se pohybuje v rozmezí od 0,08 do -0,5 [23,32,33].



Obr. 20: Krystalová struktura pyritu [34]

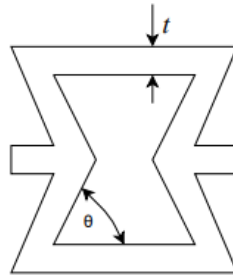
1.2.6 Gradientní auxetické struktury

Běžná auxetická struktura je tvořena buňkami se stejnými geometrickými parametry, je však možné vytvořit strukturu s gradientním uspořádáním. Myšlenka gradientních materiálů je založena na kombinaci různých mechanických vlastností v různých částech konstrukce, kde jsou pro požadovanou odezvu konstrukce potřeba konkrétní mechanické vlastnosti. Gradientní uspořádání je tvořeno spojitou distribucí jednotkových buněk s kompatibilní geometrií a daným proměnným parametrem, kterým může být např. vnitřní úhel buňky, tloušťka stěny aj. Díky gradientní konfiguraci lze v takových strukturách dosáhnout různé distribuce tuhosti a deformace. Gradientní uspořádání lze tvořit změnou různých parametrů, které závisí na typu auxetické struktury. Níže jsou pro názornost uvedeny dva možné způsoby tvorby gradientního uspořádání u voštinové struktury [35,36].

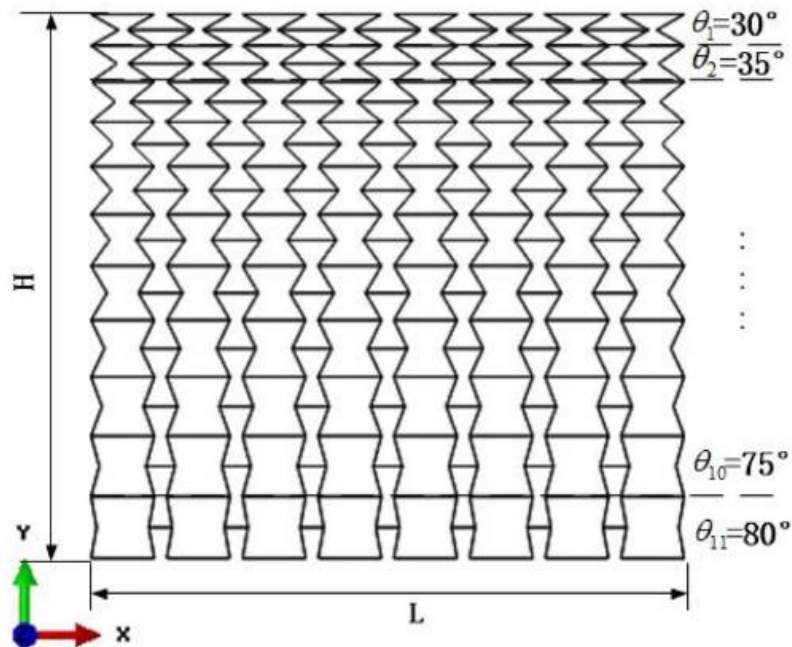
1.2.6.1 Úhlově gradientní voštinové struktury

Zamani *et al.* se zabývali úhlově gradientními voštinovými strukturami (AGAH, *Angular Gradient Auxetic Honeycomb*) v sendvičovém uspořádání. Gradace úhlu θ (Obr. 21) byla prováděna prostřednictvím lineárních funkcí. Auxetické gradientní jádro bylo analyticky hodnoceno z hlediska vibračního chování sendvičové desky. Schematické znázornění AGAH je znázorněno na Obr. 22. Bylo zjištěno, že úhlově gradientní uspořádání zvyšuje specifickou tuhost a následně zvyšuje vlastní frekvence sendvičových struktur. Růst vlastní frekvence úhlově gradientního auxetického jádra byl pozorován ve směru růstu rozdílu úhlu buněk [37].

Dále bylo zjištěno, že AGAH struktury lépe absorbují energii ve srovnání se strukturami bez gradientu úhlu a deformace struktur je pravidelnější při vyšších deformačních rychlostech [38].



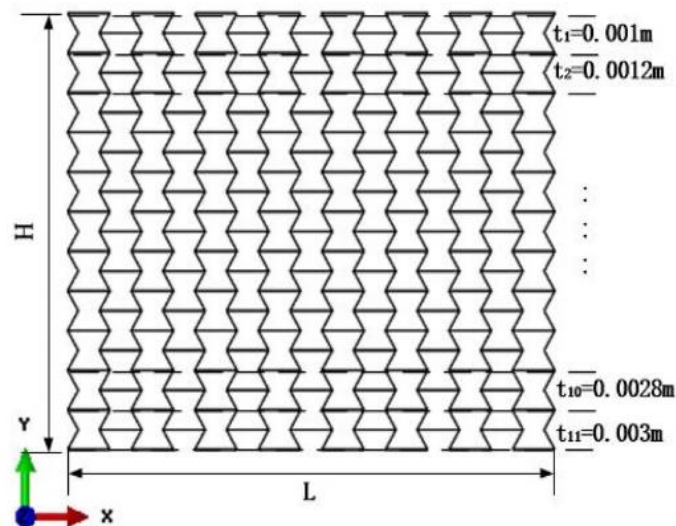
Obr. 21: Znárodnění jednotkové buňky voštinové struktury s proměnným úhlem θ a tloušťkou stěny t



Obr. 22: Schematické znázornění AGAH struktury [38]

1.2.6.2 Voštinové struktury s gradientem tloušťky stěny buňky

Další možností, jak vytvořit gradientní strukturu je změnit tloušťku stěny buňky t (obr. 20). Model auxetické struktury s gradientem tloušťky stěny (TGAH, *Thickness Gradient Auxetic Honeycombs*) je znázorněn na Obr. 23. Z experimentů vyplývá, že u TGAH struktur při stlačení v jedné ose nedochází ke smrštění v ose druhé, ale naopak dochází k expanzi, což je typické chování pro struktury s kladným Poissonovým poměrem. Bylo prokázáno, že tloušťka stěny souvisí s množstvím absorbované energie. Čím je tedy větší tloušťka stěny buňky, tím větší množství energie je struktura schopna pohltit [38].

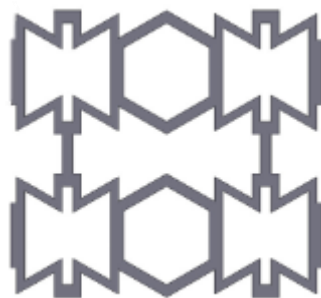


Obr. 23: Schematické znázornění TGAH struktury [38]

1.2.7 Hybridní auxetické struktury

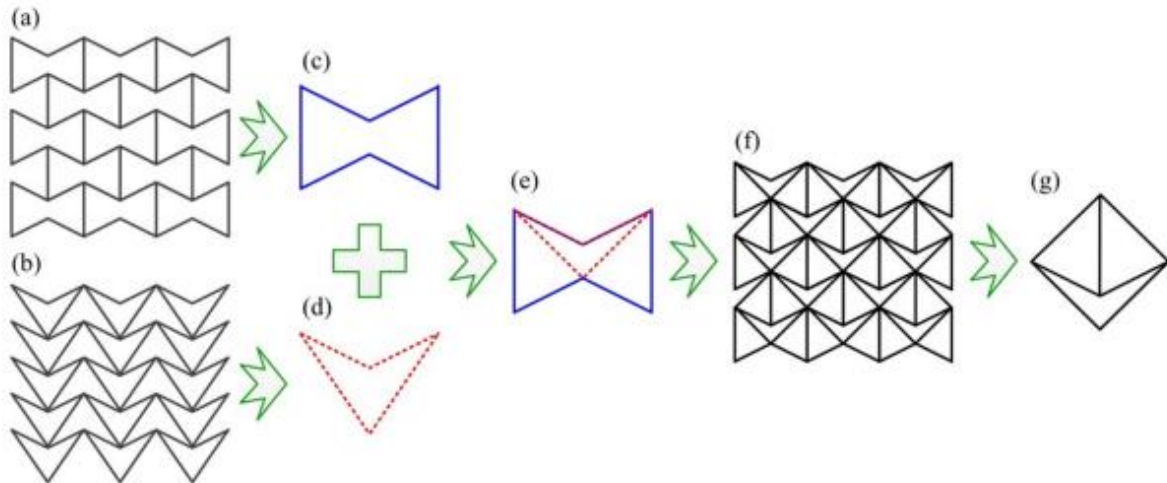
Vlastnosti jednotlivých geometrií auxetických struktur jsou omezeny jejich deformačním mechanismem. V posledních letech se pozornost soustředí na vývoj tzv. hybridních auxetických struktur, které vznikají kombinací různých typů stávajících jednotkových buněk. Hybridní konfigurací lze mnohdy dosáhnout lepších vlastností, než kterých by bylo dosaženo konvenční konfigurací u jednotkových buněk stejného typu.

Kombinací re-entrantní struktury se strukturou voštinovou (Obr. 24) bylo dosaženo o 65 % vyšší pevnosti v tlaku, než má klasická re-entrantní struktura a o 300 % větší pevnosti v tlaku, než má voštinová struktura. Hybridní struktura dosahuje rovněž nižších hodnot Poissonova poměru [39].



Obr. 24: Schematické znázornění hybridní auxetické struktury [39]

Významného zlepšení mechanických vlastností lze také dosáhnout kombinací re-entrantní a dvojité šípové struktury (Obr. 25). Ve srovnání s re-entrantními a dvojitými šípovými strukturami, hybridní struktura vykazuje vyšší modul pružnosti a širší rozsah Poissonových poměrů od negativních po pozitivní. Výsledky ukazují, že jak chování negativního Poissonova poměru, tak elastické vlastnosti hybridní struktury lze zlepšit zvětšením délky svislé stěny nebo zmenšením úhlu nakloněné stěny ve vnitřní části šípky [40].



Obr. 25: Schematické znázornění návrhu hybridní auxetické struktury [40]

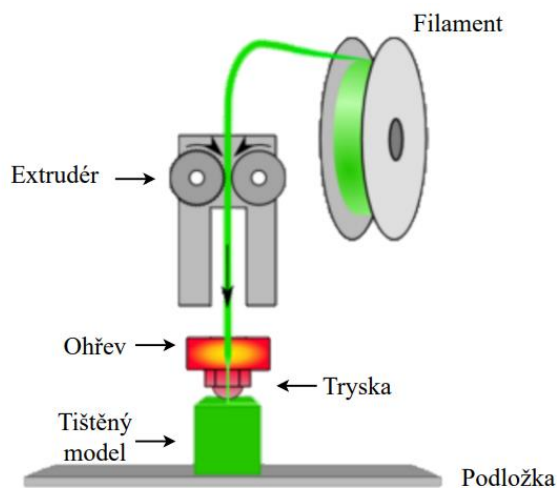
1.2.8 Postupy přípravy auxetických struktur

Ačkoliv mají auxetické materiály, díky svým unikátním vlastnostem, velký potenciál napříč celou řadou oborů, tak právě technologie výroby představuje omezení, které brání jejich komerčnímu využití. Většina navržených auxetických struktur není využívána v praxi právě z důvodu složitého nebo neekonomického způsobu výroby.

Současně se k výrobě auxetických struktur nejvíce využívá aditivních výrobních procesů, které jsou založeny na postupném kontrolovaném přidávání daného materiálu. Jedná se o techniky nanášení taveniny materiálu (FDM), polymerace kapaliny (SLA), přímý laserový zápis (DLW), techniky tavení prášku (SLM, SLS, EBM) nebo také selektivní tavení elektronovým svazkem (SEBM) [41, 42].

1.2.8.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

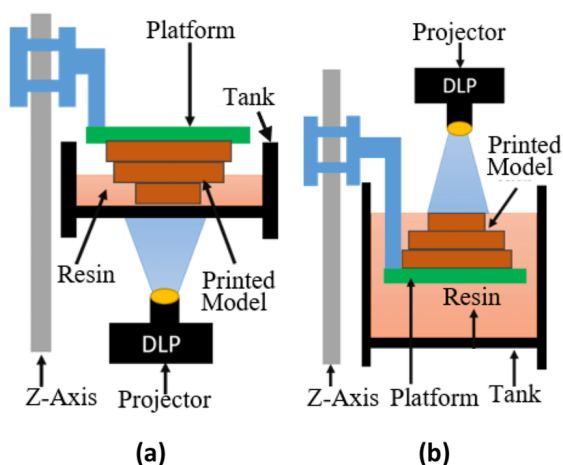
Tato technika je jednou z nejběžnějších metod 3D tisku. Tištěný objekt je tvořen vrstvy po vrstvě na základě navrženého 3D modelu, který je převeden do formátu G-kódu, který představuje instrukce o dráze pro 3D tiskárnu. Po zahájení tisku je filament posouván ozubenými kolečky skrz extruzní hlavu, kde dochází k ohřevu, do trysky daného průměru. Z trysky vytéká tavenina, která je ukládána na podložku. FDM proces je schematicky zobrazen na Obr. 26.



Obr. 26: Schématické znázornění FDM procesu [42]

1.2.8.2 Stereolitografie (SLA)

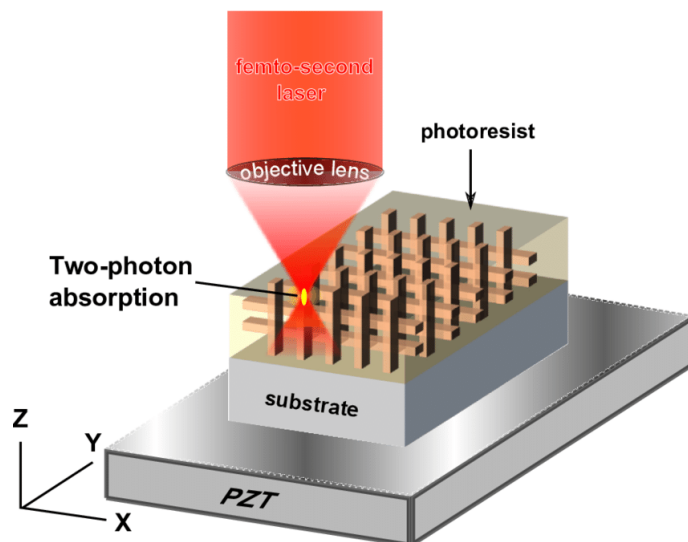
Jedná se o nejstarší metodu 3D tisku, principem je selektivní vytvrzování fotocitlivého polymeru pomocí UV záření. Existují dvě možné konfigurace této metody, kdy jedna tiskne zdola nahoru (bottom-up) a druhá tiskne shora dolů (top-down) (Obr. 27). Oproti FDM je tato metoda přesnější a lze tak tisknout složité detailní konstrukce.



Obr. 27: Schématické znázornění technologie SLA, typ „bottom-up“ (a) a top-down (b) [43]

1.2.8.3 Přímý laserový zápis

Přímý laserový zápis (DLW, z angl. *Direct Laser Writing*) multifotonovou polymerací je jednou z technologií 3D tisku, která umožňuje vytvoření struktur s rozlišením pod 100 nm. Technologie je založena na nelineární absorpci fotonů fotopolymerem. Paprsek ultra rychlého laseru je pevně zaostřen uvnitř objemu průhledného materiálu, což způsobuje, že absorbuje dva nebo více fotonů a lokálně polymeruje (Obr. 28) [44].



Obr. 28: Schematické znázornění principu DLW

1.2.8.4 Selektivní tavení laserem

Selektivní tavení laserem (SLM, z angl. *Selective Laser Melting*) je technologie 3D tisku, která zpracovává kovové materiály. Přístroj se skládá z komory naplněné kovovým práškem naneseným v tenkých vrstvách na stavební platformu pomocí potahovací čepele. K selektivnímu roztavení práškového kovu se používá vysoce výkonný CO₂ laser. Jakmile je vrstva dokončena, lože klesne o výšku ekvivalentní tloušťce vrstvy a proces se opakuje, dokud není díl zcela vytvořen. Proces se provádí v řízené atmosféře, aby se zabránilo oxidaci [40].

1.2.8.5 Selektivní laserové slinování

Selektivní laserové slinování (SLS, z angl. *Selective Laser Sintering*) je technologie 3D tisku, která k výrobě dílů využívá materiál v podobě prášku. SLS využívá k výrobě nejen kovové, ale i termoplastické prášky. Prášek je rovnoměrně rozložen na podložce a ohříván těsně pod teplotu tání polymerního prášku. Poté prostřednictvím laseru a zrcadel skeneru ostříme paprsek na požadovaná místa, dle geometrie modelu. Jednotlivé částice prášku se roztaví a propojí s vrstvou a vrstvou pod ní. Neexponovaný materiál zůstává na podložce a funguje jako podpěry [46].

1.2.8.6 Selektivní tavení elektronovým paprskem

Selektivní tavení elektronovým paprskem (SEBM, z *angl. Selective Electron Beam Melting*) je technologie, která je vhodná pro výrobu kovových struktur s vysokou přesností. Na rozdíl od SLS, SEBM využívá jako zdroj energie elektronový svazek. Protože je tato technologie založena na interakci elektrických nábojů mezi práškovým kovem a elektronovým paprskem, není tato metoda schopna vyrábět plastové nebo keramické díly.

Nejprve se přehřátý kovový prášek nanese na tiskové lože umístěné ve vakuové komoře. Poté je elektronový paprsek řízený pomocí vhodných elektromagnetických cívek nasměrován na požadované části stavební platformy. Dochází k selektivnímu pohybu paprsku, který taví prášek, což vede k fúzi částic. Po dokončení první vrstvy se lože posune dolů a na plošinu se zavede čerstvá vrstva prášku. Proces se opakuje a tento cyklus pokračuje, dokud není vyroben celý díl. Tato metoda nabízí vysokou kvalitu tisku při vysokých rychlostech [41].

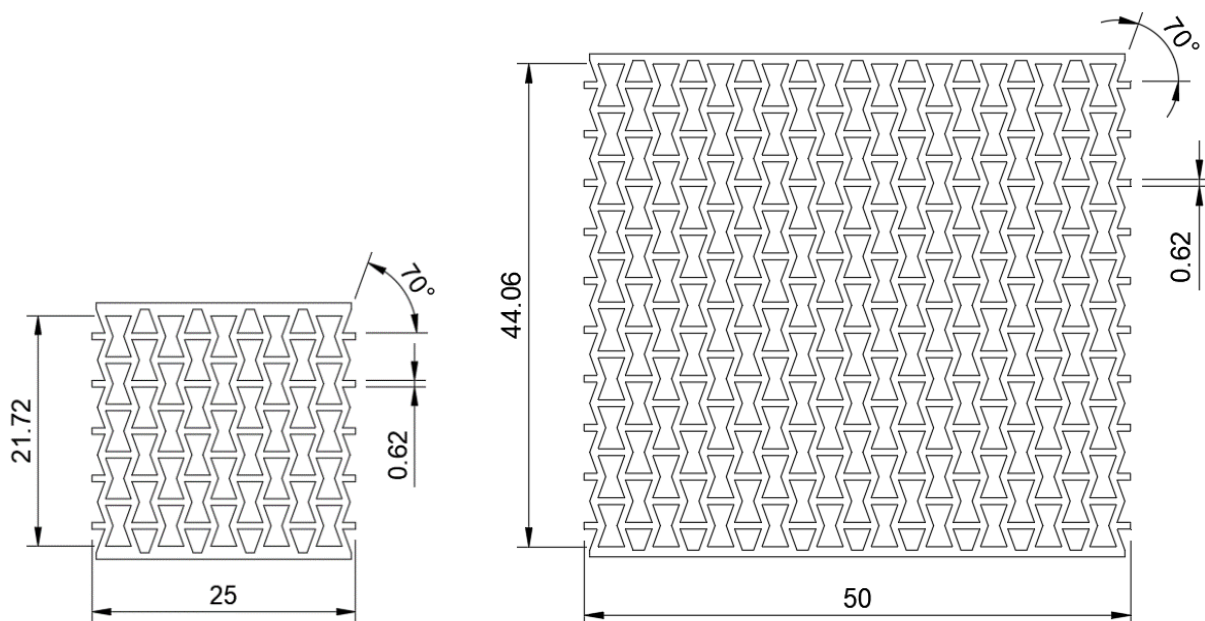
2 Experimentální část

V rámci experimentální části byly navrženy dva typy auxetických struktur, s odlišným počtem jednotkových buněk. Pro přípravu vzorků byly zvoleny dva typy materiálů. Jeden s nízkým modulem pružnosti na bázi termoplastického polyurethanu a druhý s vysokým modulem pružnosti na bázi polyethylentereftalátu. Vzorky byly připravovány technologií FDM na tiskárnách Creality CR 10S a Creality Sermoon V1 PRO. Deformační odezva vzorků byla sledována při statické zkoušce v tlaku. Pomocí video záznamu deformace těles během zkoušky bylo možné získat snímky vzorků před deformací a při deformaci-na mezi kluzu, ze kterých byl vyhodnocen Poissonův poměr. Pro vyhodnocení Poissonova poměru byl napsán skript v programovacím jazyku Python, pomocí kterého byla zkoumána distribuce deformační odezvy v rámci struktury. Programově byla vyhodnocena rovněž změna porozity, ke které došlo po stlačení struktury.

2.1 Návrh modelu auxetické struktury

Modely auxetických struktur byly vytvořeny v softwaru Fusion 360 (Obr. 29). Fusion 360 je cloudový software společnosti Autodesk, slouží k 3D modelování, navrhování a simulacím.

Pro přípravu vzorků byla zvolena nejběžnější voštinová re-entrantní struktura s vnitřním úhlem $\theta = 70^\circ$. Byly navrženy dva druhy struktur lišící se počtem jednotkových buněk. Struktura na obr. 29 vlevo má uspořádání jednotkových buněk 5×9 a struktura na Obr. 29 vpravo 10×19 . Struktura napravo má tedy ve vertikálním směru dvojnásobný počet jednotkových buněk ve srovnání se strukturou vlevo [47, 48].

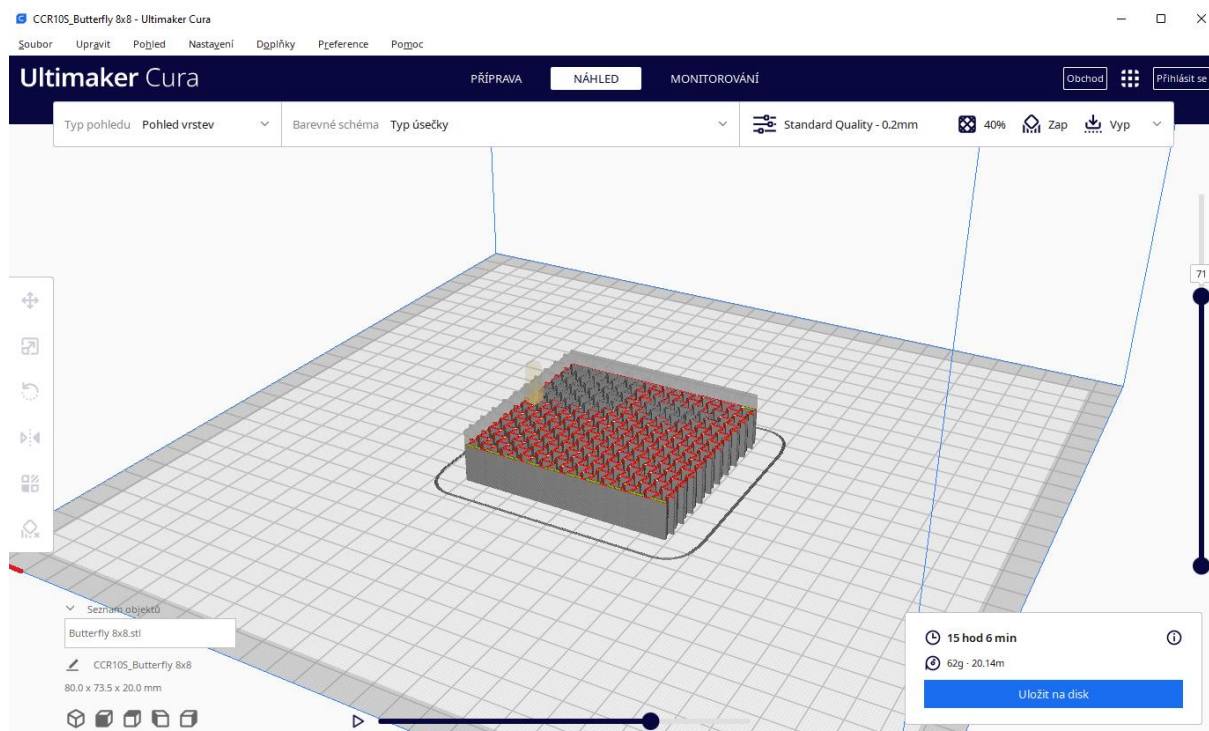


Obr. 29: Modely navržených auxetických struktur

Vzorky byly nejprve navrženy ve velikostech $(34,76 \times 40 \times 20)$ mm a $(70,5 \times 80 \times 20)$ mm, nicméně vzorky větší velikosti již nebylo možné testovat na mechanické vlastnosti na stejném testovacím zařízení jako vzorky menší. Rovněž byla velká spotřeba materiálu a tisk byl zdoluhavý. Z toho důvodu byla zvolena, i s ohledem na schopnosti tiskárny, menší velikost $(21,72 \times 25 \times 12,5)$ mm a od této velikosti byla odvozena velikost struktury s dvojnásobný počtem buněk ve vertikálním směru. $(44,06 \times 50 \times 12,5)$ mm. Tloušťka stěny buněk byla rovna hodnotě 0,62 mm.

2.2 Postup přípravy vzorků

Po návrhu struktur ve Fusion 360, byl model exportován ve formátu „stl“. Aby byla 3D tiskárna schopna model vytisknout, je nutné jej převést na formát G-kódu, který tiskárně poskytuje instrukce o tom, po jaké dráze se má při tisku pohybovat. K převodu souboru „stl“ na G-kód se používá tzv. slicer. Slicer model rozdělí na jednotlivé vrstvy a vygeneruje G-kód specifický pro danou tiskárnu. V mé práci byla použita nejnovější verze univerzálního sliceru Cura 5.0 (Obr. 30) od společnosti Ultimaker. Software Cura je kompatibilní s většinou stolních 3D tiskáren a dokáže pracovat se soubory v běžných 3D formátech (stl., obj.,...). Slicer slouží rovněž k nastavení všech tiskových parametrů, které se odvíjí od materiálu použitého pro tisk. Tiskové parametry pro dané materiály, které byly použity pro tisk auxetických struktur jsou uvedeny v Tab. 3: Tiskové parametry použité při tisku auxetických struktur. Po nastavení tiskových parametrů a generaci G-kódu byla data přenesena prostřednictvím SD karty do příslušné tiskárny. Vzorky byly připravovány technologií FDM na tiskárnách Creality CR 10S a Creality Sermoon V1 PRO.



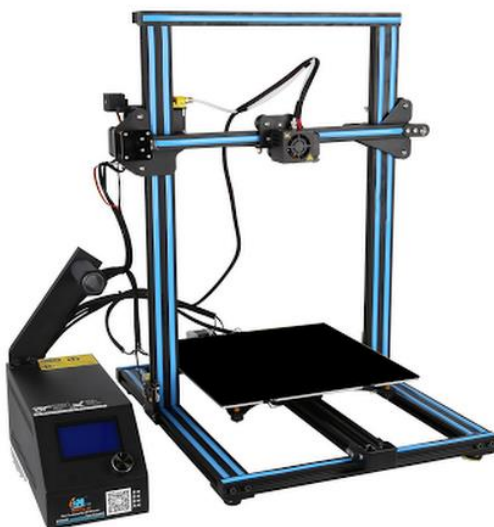
Obr. 30: Rozhraní sliceru Ultimaker Cura 5.0 zachycující monitoring tisku auxetické struktury

Tab. 3: Tiskové parametry použité při tisku auxetických struktur

Materiál:	PET-G (polyethylentereftalát glykol)	TPU (Termoplastický polyetherový polyuretan)
Kvalita (Výška vrstvy):	Standard Quality (0.2 mm)	Standard Quality (0.2 mm)
Tloušťka stěny:	1,2 mm	1,2 mm
Počet čar stěny:	3,0	3,0
Výplň:	20,0 %	20,0 %
Teplota tisku:	245,0 °C	228,0 °C
Teplota podložky:	70,0 °C	0,0 °C
Chlazení:	50,0 %	100,0 %
Průměr trysky:	0,4 mm	0,4 mm

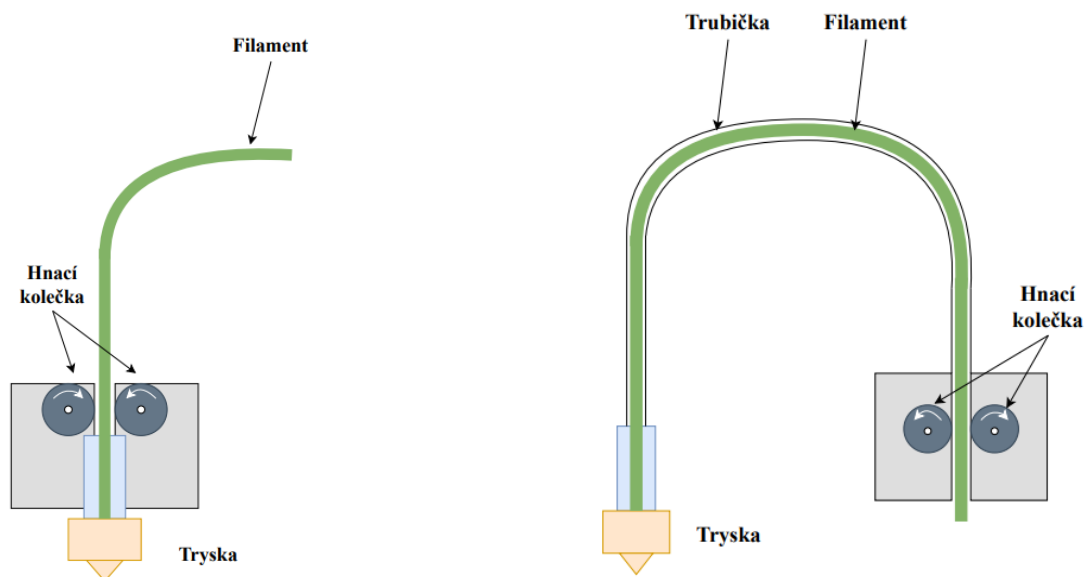
2.2.1 Creality CR 10S

Řada 3D tiskáren Creality CR se vyznačuje lineárním ložiskovým systémem, kde převod z krokových motorů je zajištěn prostřednictvím kuličkových šroubů. Pohyb v ose z je zprostředkován pohybem příčníku s extrudérem po kuličkových šroubech. Celá konstrukce je složena z hliníkových extrudovaných profilů, ovládací panel je oddělený (Obr. 31).



Obr. 31: Snímek tiskárny Creality CR 10S [49]

Značnou výhodou této tiskárny je velký tiskový prostor ($300 \times 300 \times 400$ mm), jehož nevýhodou však je, že není krytý oddělen od okolního prostředí. Další nevýhodou této tiskárny je bowdenový extrudér. Rozdíl mezi přímým a bowdenovým extrudérem je znázorněn na Obr. 32. Tím, že ozubená kola tlačí filament přes poměrně dlouhý kus hadičky je často problém s protlačením filamentu skrze trysku. Může dojít k tomu, že filamentu vytéká méně, než by mělo a výtisky nejsou tak kvalitní. Problém také nastává při tisku flexibilních filamentů, kdy se často stává, že se filament v hadičce vzpříčí, a tak se nedostane vůbec k trysce.



Obr. 32: Schematické znázornění přímého extrudéru (vlevo) a bowdenového extrudéru (vpravo)

2.2.2 Creality Sermoon V1 PRO

Creality Sermoon V1 PRO (Obr. 33) je 3D tiskárna s přímým extrudérem, který zajišťuje lepší extruzi. Kompaktní krytování umožňuje při tisku udržovat konstantní teplotu. Pohyb v ose z je zajištěn, na rozdíl od CR 10S, pohybem podložky po kuličkovém šroubu. Ovládání tiskárny je zprostředkováno skrze vestavěný dotykový displej. Tiskárnu je rovněž možné ovládat na dálku prostřednictvím aplikace Creality Cloud. Tiskárna je také vybavena integrovanou kamerou, díky které lze odkudkoliv sledovat průběh tisku. Nevýhodou oproti předchozí tiskárně je menší tisková plocha (175 × 175 × 165) mm.



Obr. 33: Snímek tiskárny Creality Sermoon V1 PRO [50]

2.3 Použité materiály

K přípravě vzorků byly nejprve použity filamenty z kyseliny polymléčné (PLA, Polylactic acid). Filamenty PLA jsou poměrně levné a snadno tisknutelné. Nevýhodou tohoto materiálu je ovšem jeho sklon k degradaci, a to vlivem běžného okolního prostředí. Po vystavení vlhkosti dochází k hydrolytickému štěpení esterových skupin hlavního řetězce PLA a snižování tak jeho molekulové hmotnosti. PLA rovněž podléhá fotodegradaci, která může vést k Norrishovým reakcím, sítovacím reakcím nebo jiným oxidačním procesům [51].

Degradace má vliv na mechanické vlastnosti vzorků a bylo by nutné vzorky tisknout vždy ve stejný čas, nejlépe v jedné sadě a testovat vždy přibližně stejnou dobu od vytisknutí. Z toho důvodu bylo PLA nahrazeno polyethyltereftalát glykolem.

2.3.1 Polyethyltereftalát glykol

K tisku auxetických struktur s vysokým modulem pružnosti byl použit polyethyltereftalát glykol (PET-G) vyráběný společností Spectrum Filaments. PET-G je druhý nejpoužívanější typ materiálu k 3D tisku, kombinuje vlastnosti PLA a ABS (akrylonitril-butadien-styren). Výhodami tohoto materiálu jsou snadný tisk bez zápachu, dobré mechanické vlastnosti a jejich stabilita a také velmi malá míra smrštění během tisku. Ve srovnání s ostatními termoplasty tento materiál absorbuje podstatně méně vlhkosti. Materiálové vlastnosti jsou uvedené v Tab. 4 [52].

Tab. 4: Materiálové vlastnosti použitého filamentu PET-G [52]

Hustota:	1,27	g/cm ³
Napětí v tahu na mezi kluzu	26,00	MPa
Napětí v tahu při přetržení	48,00	MPa
Protažení při přetržení	58,00	%
Protažení na mezi kluzu	4,30	%
Youngův modul pružnosti	1950,00	MPa
Pevnost v ohybu	64,00	MPa
Rázová houževnatost (Izod), vrubová při 23 °C	126,00	J/m
Rázová houževnatost (Izod), vrubová při 40 °C	57,00	J/m
HDT	70,00	°C

2.3.2 Termoplastický polyetherový polyuretan

Auxetické struktury s nízkým modulem pružnosti byly tisknuty z materiálu na bázi termoplastického polyetherového polyuretanu (TPU). Konkrétně šlo o filament S-flex 98A rovněž vyráběný společností Spectrum Filaments. Tento typ materiálu patří do kategorie tvrdých elastomerů. Materiál je flexibilní, odolný vůči hydrolyze, olejům a běžným chemikáliím, smrštění během tisku je malé. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 5[53].

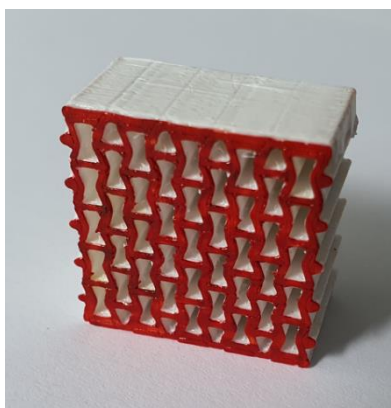
Tab. 5: Materiálové vlastnosti použitého filamentu TPU S-flex 98A [53]

Hustota:	1,09	g/cm ³
Smrštění	0,80	%
Tvrдость – Shore A	98,00	-
Pevnost v tahu	55,00	MPa
Konečné prodloužení	510,00	%
100 % Modul v tahu	15,40	MPa
300 % Modul v tahu	25,00	MPa
Odolnost proti roztržení	120,00	N/mm

2.4 Statická zkouška v tlaku

Statická zkouška v tlaku byla prováděna na půdě Středoevropského technologického institutu CEITEC, na univerzálním testovacím zařízení Zwick Z010/TH2A. Výrobce tohoto zařízení je německá společnost Zwick GmbH & Co. KG.

Pro testování byla použita testovací hlava 10 kN. Testovací podmínky jsou uvedeny v Tab. 6. Pro snížení frikce byla na plochy vzorků, které byly v kontaktu s testovacími čelistmi, nanášena teflonová páska. Pro následné vyhodnocení Poissonova poměru bylo nutné přední stranu vzorků obarvit, vzhledem k barvě materiálu, co nejvíce kontrastní barvou (Obr. 34).



Obr. 34: Testovaný vzorek tištěný z bílého TPU a přední strana obarvená kontrastní červenou lihovou barvou

Důležité bylo vyladit osvětlení, běžné světlo v laboratoři nebylo dostačující. K nasvícení bylo použito kruhové LED světlo. Současně se spuštěním měření byla spuštěna kamera a byl pořízen videozáznam, který byl využit k vyhodnocení Poissonova poměru.

Tab. 6: Testovací podmínky provedené statické tlakové zkoušky

Předzatižení	5,0	N
Maximální dosažitelná síla	9000,0	N
Rychlost zatěžování	2,0	mm/min
Maximální stlačení	70,0	%

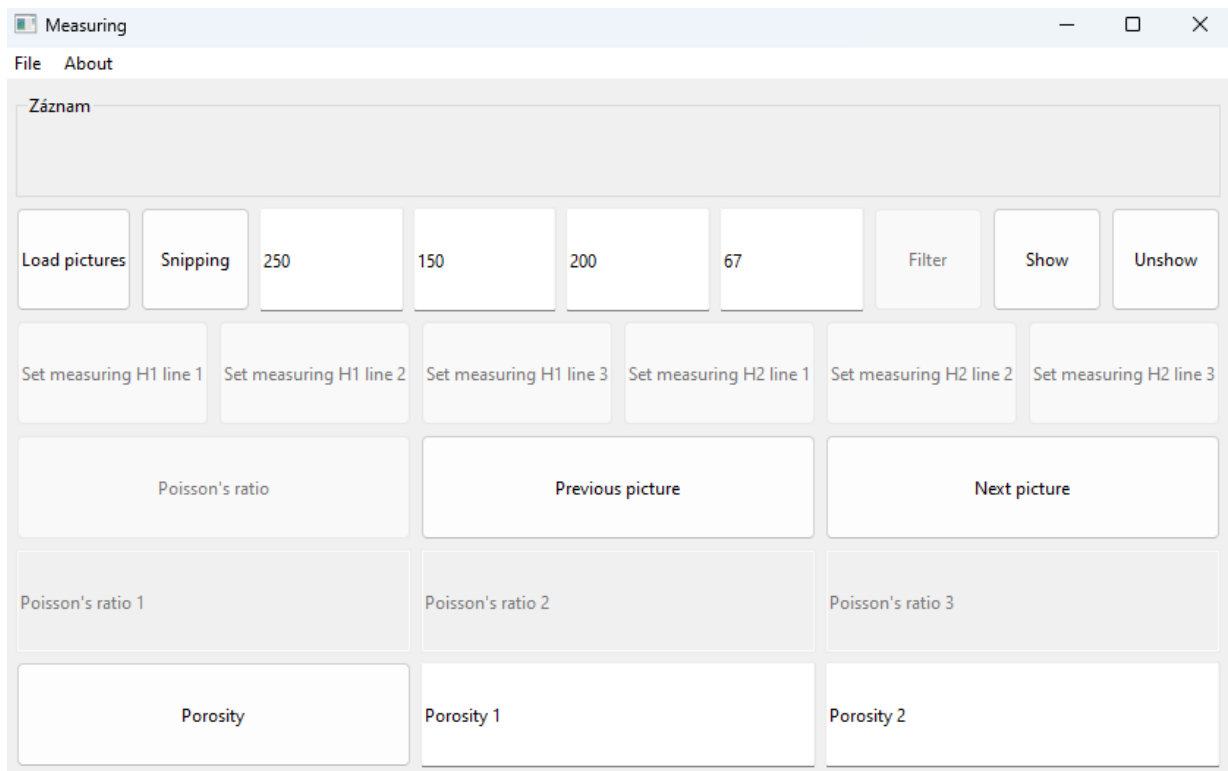
2.5 Vyhodnocení Poissonova poměru a změny porozity

Poissonův poměr byl nejprve vyhodnocován ručním měřením v editoru vektorové grafiky Inkscape, také bylo vyzkoušeno měření v softwaru Fusion 360. Ruční měření bylo časově náročné a velice subjektivní.

Po konzultaci s kolegou z Fakulty elektrotechniky bylo rozhodnuto měřit Poissonův poměr pomocí programu. Kolega mě zasvětil do problematiky psaní programu v programovacím jazyku Python a byl mi nápomocen při sestavování algoritmů. Podařilo se napsat skript, který byl převeden na desktopovou aplikaci, do níž je možné jednoduše nahrát snímky z měření a získat tak konzistentnější výsledky. Na základě získaných zkušeností byla myšlenka programového vyhodnocení Poissonova poměru rozšířena o vyhodnocení změny porozity.

2.5.1 Návod pro použití aplikace

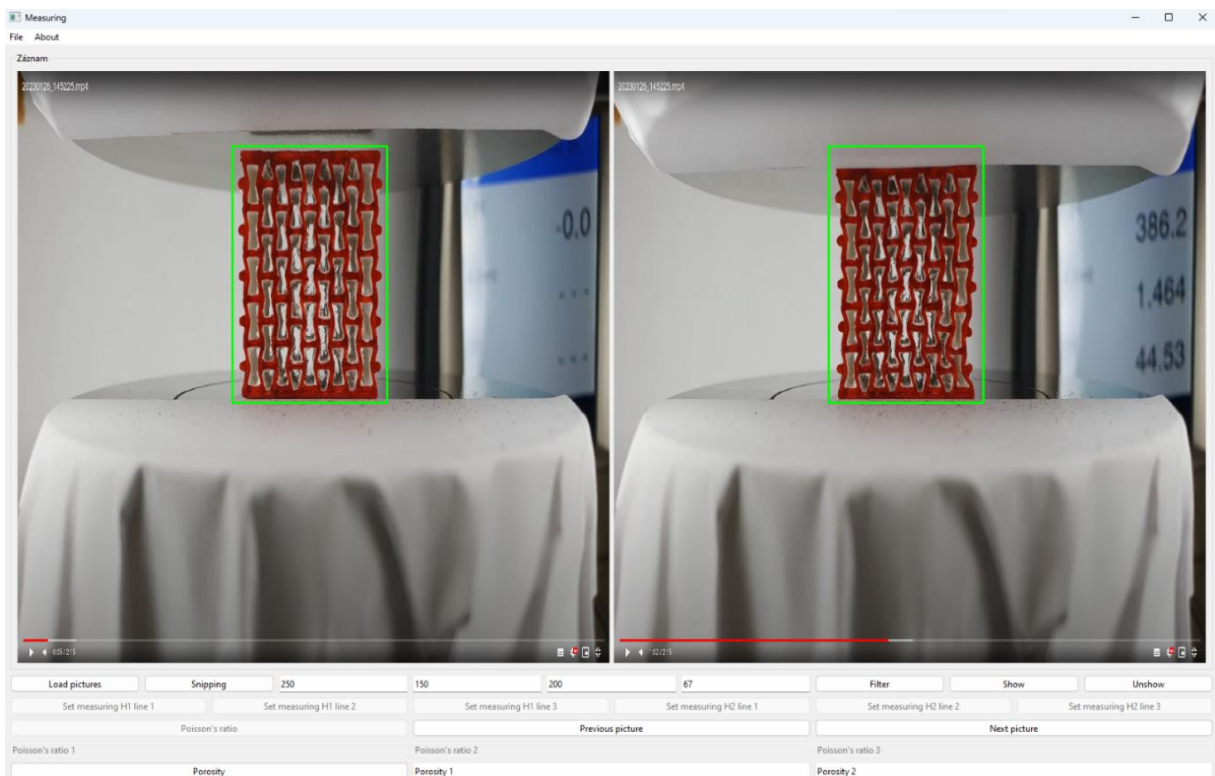
Ke spuštění aplikace je třeba otevřít soubor s programem označený jako TestApp.py. Pro spuštění je nutné nainstalovat všechny knihovny (os, sys, numpy, cv2, statistics, imutils, PySide6, math). Postup instalace knihoven je snadný, návod lze najít pomocí internetového vyhledávače. V případě, že jsou všechny knihovny nainstalovány, tak se po kliknutí na tlačítko Run and Debug spustí aplikace, jejíž základní rozhraní je znázorněno na Obr. 35.



Obr. 35: Výchozí rozhraní vytvořené konzolové aplikace

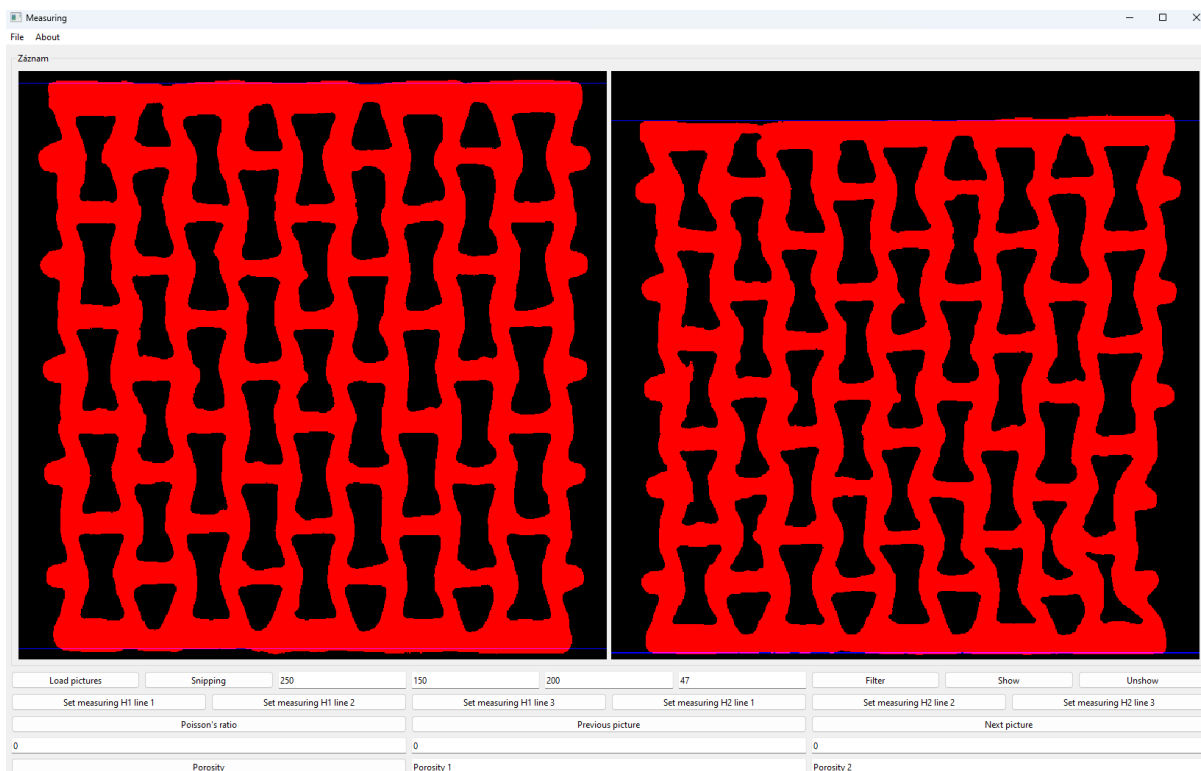
Pro použití aplikace je třeba uložit pořízené snímky do stejné složky, ve které je uložena aplikace, a správně je pojmenovat. Název snímků by měl končit podtržítkem a číslem 1 nebo dva, podle toho, zda se jedná o snímek pořízený před zatížením nebo na mezi kluzu. Pro vzorek č.1 bude tedy název snímku, který byl pořízený před zatížením, vypadat např.: TPU1_1 (na mezi kluzu pak: TPU1_2). Díky správnému pojmenování, tak aplikace spáruje snímky daného vzorku a rozliší, který byl pořízený před stlačením a který na mezi kluzu.

Po spuštění aplikace je vidět základní rozhraní (Obr. 35), kliknutím na tlačítko „Load pictures“ dojde k nahrání prvního páru obrázku. Tlačítko „Snipping“ slouží k oříznutí obrázku, uživatel by měl oříznout co nejmenší oblast se vzorkem (Obr. 36).

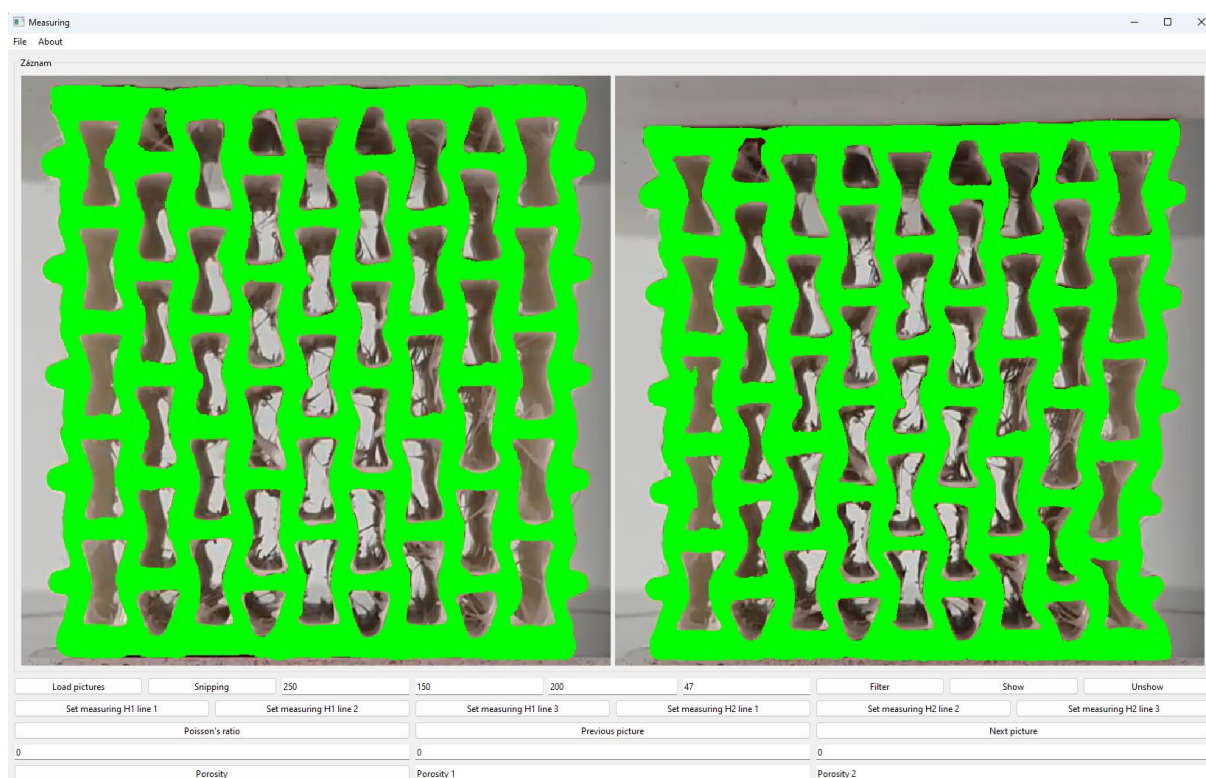


Obr. 36: Rozhraní aplikace s nahranými snímky a vyznačenou oříznutou oblastí

Kliknutím na tlačítko „Filter“ dojde k aplikaci barevného filtru (Obr. 38). Program projde obrázek pixel po pixelu a na základě nastavených parametrů filtrů jej vykreslí jako červeno černý. Při jiných světelných podmínkách se může stát, že některé kontury vzorku nebudou správně vyfiltrované. Kontrolu je možné provést stisknutím tlačítka „Show“ (Obr. 37). V případě, že se kontury vykreslí špatně, tak je nutné zvolit jiné hodnoty filtrů v kolonkách pod snímkem. Konkrétní hodnoty je nutné experimentálně vyzkoušet.

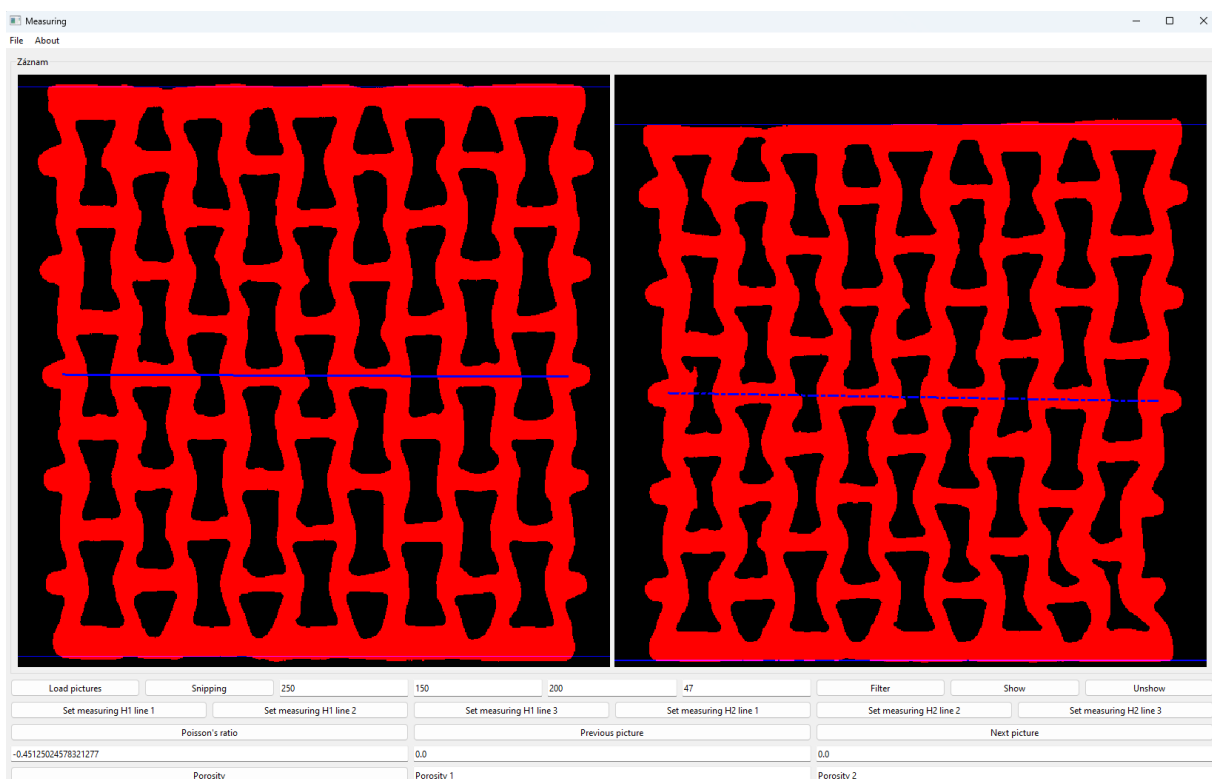


Obr. 38: Rozhraní aplikace se snímkem vzorků po aplikaci barevného filtru



Obr. 37: Rozhraní aplikace se snímkem vzorků po stisknutí tlačítka „Show“

Po provedení výše zmíněných kroků lze přejít k samotnému vyhodnocení Poissonova poměru, případně distribuci. Změna vertikálního rozměru se odečítá automaticky, pro změnu horizontálního rozměru je třeba vynést přímkou v požadované oblasti. To lze jednoduše provést kliknutím na tlačítko „Set measuring H1 line 1“ a kliknutím do obrázku v aplikaci nalevo (Obr. 39 před zatížením) na jeden a druhý konec vzorku. Stejný postup následuje u snímku vzorku po zatížení, tentokrát pomocí tlačítka „Set measuring H2 line 1“ viz Obr. 39 (vpravo). Po stisknutí tlačítka Poisson's ratio je pak vyhodnocen Poissonův poměr. Poissonův poměr lze zároveň měřit na třech místech (tlačítka „Set measuring H1 line 2, Set measuring H2 line 2, Set measuring H1 line 3, Set measuring H2 line 3“), lze tak poměrně rychle stanovit i jeho distribuci v rámci vzorku.



Obr. 39: Vyznačení měřené oblasti Poissonova poměru u snímků pomocí tlačítek Set measuring H1 line 1 a Set measuring H2 line 1

Pro vyhodnocení porozity stačí pouze kliknout na tlačítko „Porosity“. V rozhraní aplikace se v polích na posledním řádku objeví výsledky plochy pórů před stlačením (vlevo) a plochy pórů po stlačení. V rozhraní aplikace se kromě výsledků vyznačí i oblasti, ze kterých je porozita stanovena viz Obr. 40.



Obr. 40: Rozhraní aplikace po stisknutí tlačítka „Porosity“

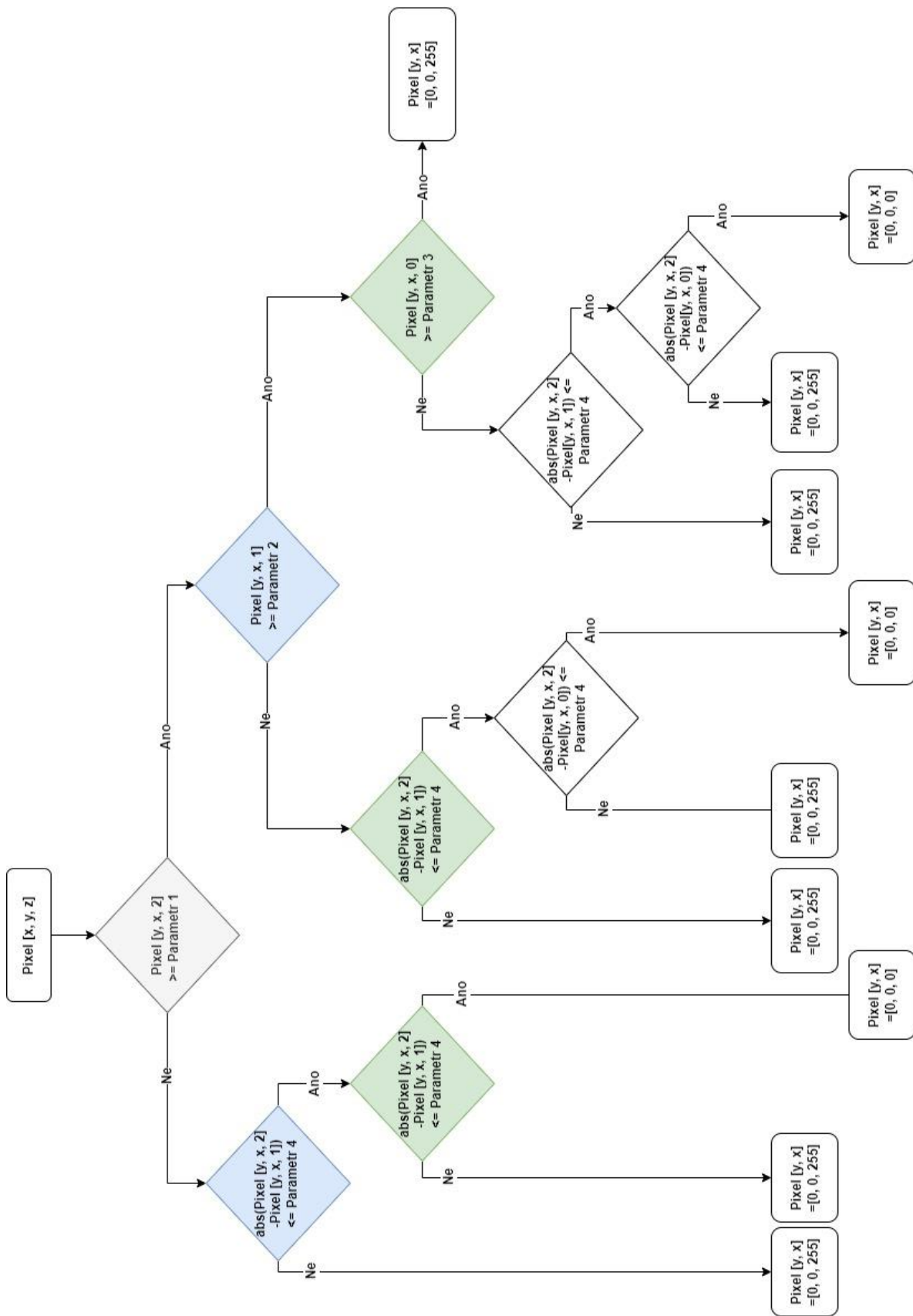
2.5.2 Princip fungování programu, použité algoritmy

Program byl napsán v programovacím jazyku Python ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio.

2.5.2.1 Aplikace barevných filtrů na pořizené snímky

Nejpodstatnější částí programu je způsob filtrování RGB barev u pořizených snímků. V programovacím jazyku Python je pro tyto účely běžně používána knihovna OpenCV, která je určena právě k řešení problému s počítačovým viděním. OpenCv používá řazení barev: Green, Blue, Red. Navržený filtr prochází pixely snímku jeden po druhém, dle nastavených parametrů je vyhodnotí a vykreslí v daných barvách s ostrými konturami.

Filtr je popsán algoritmem, znázorněném ve vývojovém diagramu na Obr. 41. Na vstupu vývojového diagramu je pixel, který je kódem zkontrolován, zda v jednotlivých krocích splňuje podmínky dané proměnnými „Parametr 1“, „Parametr 2“, „Parametr 3“ a „Parametr 4“. Na základě algoritmu, program určí, zda bude pixel vykreslen černě [0, 0, 0] (patří pozadí) nebo červeně [0, 0, 255] (patří vzorku).



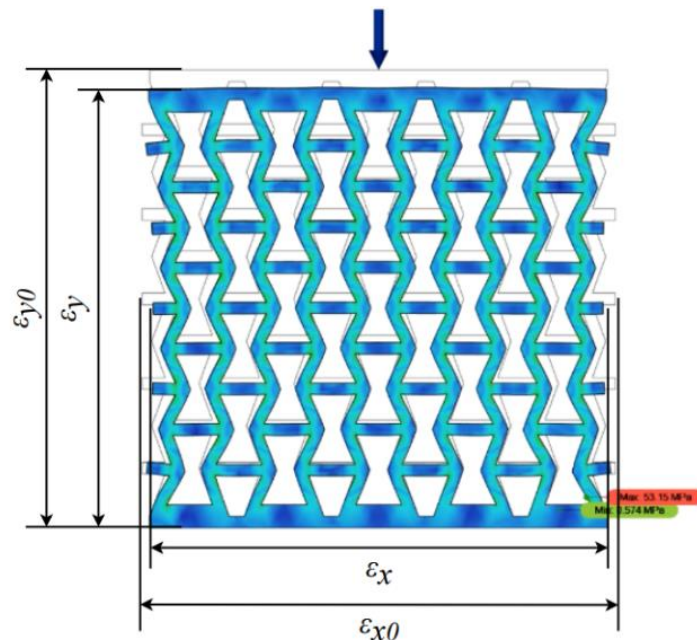
Obr. 41: Vývojový diagram znázorňující jednotlivé kroky algoritmu filtru použitého pro vyhodnocení Poissonova poměru

2.5.2.2 Vyhodnocení Poissonova poměru

Poissonův poměr byl vyhodnocován podle rovnice 9, jejíž parametry jsou definovány na Obr. 42. Získání hodnoty $\Delta\varepsilon_y$ provede program vypočtením vzdálenosti dvou horizontálních čar vykreslených souběžně s okraji vzorku. Čáry program umístí dle polohy červených pixelů tvořících konturu. Poloha čáry je vypočítána jako střední hodnota polohy jednotlivých pixelů očištěná o extrémní. Hodnota $\Delta\varepsilon_x$ je získána umístěním dvou bodů na levé a pravé straně vzorku, mezi kterými se vykreslí čára určující vzdálenost těchto bodů. Myši je umístěn bod do krajní červené stěny vzorku, program vyhodnotí vzdálenost od levé a pravé hrany červené kontury a bod umístí na střed. Stejný postup se děje i při umístění bodu druhého. Délka čáry je vypočítána dle obecné rovnice vzdálenosti dvou bodů (rovnice 10) v kartézské soustavě souřadnic. Výsledná hodnota Poissonova poměru je pak dána záporným poměrem $\Delta\varepsilon_y$ ku $\Delta\varepsilon_x$ jak je to znázorněno v rovnici 9.

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_y}{\Delta\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_{y0}}{\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_{x0}}{\varepsilon_x}} \quad (9)$$

$$|AB| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (10)$$



Obr. 42: Snímek ze simulace jednoosého zatížení struktury v softwaru Fusion 360 s vyznačenými parametry pro výpočet Poissonova poměru

2.5.2.3 Vyhodnocení porozity

Porézní struktura auxetik s sebou nese další potenciální aplikace jejich využití. Proto se zdá být užitečné sledovat změnu poréznosti struktury způsobenou deformací. Stanovit změnu porozity bez vyhodnocovacího programu by bylo obtížné a z toho důvodu není na toto téma publikováno mnoho článků. V mé práci je ke stanovení porozity použit program, který měl původně sloužit pouze k vyhodnocení Poissonova poměru.

Vyhodnocení porozity auxetické struktury vychází z rovnice 11. Program porozitu nevyhodnocuje prostřednictvím poměru objemů, ale prostřednictvím poměru obsahů, což je dostačující vzhledem k faktu, že se struktura je v jednom ze tří rozměrů tvarově konstantní.

$$n = -\frac{V_p}{V_c}, \quad (11)$$

kde V_p představuje objem pórů a V_c celkový objem, veličina je tedy bezrozměrná.

Na oba snímky je aplikován identický barevný filtr jako v případě vyhodnocení Poissonova poměru. V dalším kroku program kontroluje obrázek řádek po řádku a detekuje krajní červené pixely, mezi kterými vyhodnotí počet černých a červených pixelů. Díky tomu vyhodnotí jako póry pouze černé pixely uvnitř vzorku. Nakonec funkce vypočítá porozitu obou obrázků tak, že spočítá počet černých pixelů (představujících dutiny ve struktuře) a vydělí ho celkovým počtem černých a červených pixelů. Hodnoty porozity jsou pak zobrazeny ve dvou polích v dolní části rozhraní aplikace. Program vykreslí vyhodnocovanou oblast ve žluté (póry) a fialové barvě (stěny), což umožní ověřit, zda byl vzorek správně vyhodnocen.

3 Výsledky a diskuse

V následující kapitole jsou uvedeny a diskutovány výsledky z experimentálních měření. Vzorky byly nejprve připravovány na 3D tiskárně Creality CR 10S, výsledky nebyly konzistentní, a proto pro zbylé experimenty byly vzorky připravovány na 3D tiskárně Sermoon V1 PRO. Porovnání obou tiskáren a zhodnocení jejich vlivu na modul pružnosti, mez kluzu a auxetické chování je uvedeno v kapitole 3.1. Dále je v kapitole 3.2 studován vliv materiálu a velikosti struktury, přesněji počtu jednotkových buněk na výše zmíněné vlastnosti. V poslední kapitole výsledkové části je studována deformační odezva na úrovni elementární buňky a její distribuce v rámci struktury.

3.1 Vliv tiskárny na mechanické vlastnosti a auxetické chování

K přípravě vzorků byly použity dvě 3D tiskárny, a to Creality CR 10S (dále jen CR 10S) a Sermoon V1 PRO (dále jen Sermoon). CR 10S tiskárna disponuje bowdenovým extruderem, jenž je popsán v kap. 2.2.1 a tiskárna Seermoon je vybavena extruderem přímým (kap. 2.2.2). Vzorky byly na obou tiskárnách tištěny ve dvou velikostech a ve dvou sadách (tedy 3 kusy při jednom tisku). Výsledky z měření jsou uvedeny v Tab. 7-Tab. 10.

U výsledků vzorků, které byly připravovány na tiskárně CR 10S lze pozorovat, že jsou značně nejednotné a odchylky jednotlivých parametrů dosahují s výjimkou hmotnosti vysokých hodnot přesahujících 10 %. U vzorků CR_PET_50×50 lze na základě výsledků mechanických vlastností snadno rozlišit, které vzorky byly tištěny společně v jedné sadě, což poukazuje na fakt, že se při tisku na 3D tiskárně CR 10S nepodařilo dosáhnout stejných podmínek při tisku dvou sad vzorků. U vzorků z tiskárny CR 10S je patrné, že velikost vzorků neměla významný vliv na modul pružnosti a mez kluzu. Pozornost je třeba věnovat také poměrně vysokým záporným hodnotám Poissonova poměru. V případě relativní porozity jsou výsledky velice různé s vysokými odchylkami.

Tab. 7: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků CR_PET_25×25 mm

	m [g]	σ_r [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
CR_PET_1	3,96	4,73	204,95	-0,74	2,52
CR_PET_2	3,87	3,15	171,54	-0,96	1,13
CR_PET_3	3,89	4,47	186,82	-0,61	0,94
CR_PET_4	3,93	4,18	190,00	-0,86	3,00
CR_PET_5	3,89	5,25	232,23	-1,27	2,11
CR_PET_6	3,99	3,58	147,41	-1,09	2,11
Průměr	3,92	4,23	188,83	-0,92	1,97
Odchylka	0,04	0,70	26,34	0,22	0,73
Odchylka [%]	1,050	16,58	13,95	23,62	36,92

Tab. 8: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků CR_PET_50×50 mm

	m [g]	σ_Y [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
CR_PET_1	12,11	3,23	151,47	-0,92	3,75
CR_PET_2	13,82	4,79	238,46	-1,00	1,24
CR_PET_3	13,85	4,94	195,49	-1,14	4,18
CR_PET_4	12,04	3,25	165,78	-1,06	1,40
CR_PET_5	12,30	3,36	179,97	-0,93	0,38
CR_PET_6	13,75	4,73	206,60	-1,01	0,75
Průměr	13,02	4,07	188,99	-1,06	2,11
Odchylka	0,80	0,78	28,24	0,11	1,33
Odchylka [%]	6,14	19,21	14,94	10,74	63,17

U vzorků připravených na tiskárně Sermoon byl vliv velikosti na studované charakteristiky již patrný. Ve srovnání se vzorky SER_PET_25×25, dosahují vzorky SER_PET_50×50 vyšších hodnot modulu pružnosti, meze kluzu a zápornějšího Poissonova poměru. Průměrná hodnota relativní porozity je značně vyšší u vzorků SER_PET_50×50.

Tab. 9: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků SER_PET_25×25 mm

	m [g]	σ_Y [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
SER_PET_1	5,24	10,12	435,09	-0,55	0,87
SER_PET_2	5,27	10,59	432,71	-0,54	0,77
SER_PET_3	5,26	10,62	428,06	-0,55	0,58
SER_PET_4	5,27	10,47	426,58	-0,39	0,95
SER_PET_5	5,25	10,43	427,14	-0,48	0,53
SER_PET_6	5,24	9,65	430,14	-0,38	0,93
Průměr	5,258	10,32	429,95	-0,48	0,77
Odchylka	0,012	0,34	3,08	0,07	0,16
Odchylka [%]	0,232	3,27	0,72	15,09	21,34

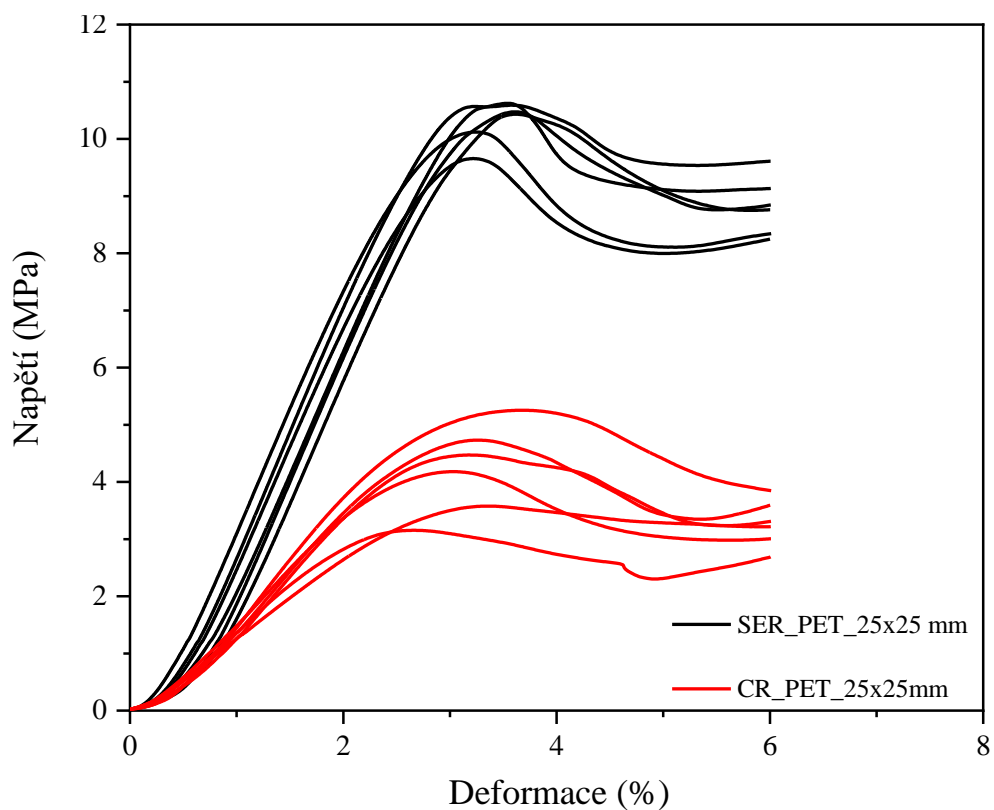
Tab. 10: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků SER_PET_50×50 mm

	m [g]	σ_Y [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
SER_PET_1	19,44	11,33	468,87	-0,84	3,25
SER_PET_2	19,50	11,15	461,92	-0,72	2,52
SER_PET_3	19,49	11,10	450,40	-0,77	3,05
SER_PET_4	19,46	12,90	450,12	-0,51	2,63
SER_PET_5	19,56	11,98	463,09	-0,58	2,88
Průměr	19,49	11,69	458,88	-0,68	2,87
Odchylka	0,04	0,68	7,42	0,12	0,27
Odchylka [%]	0,21	5,84	1,62	17,72	9,28

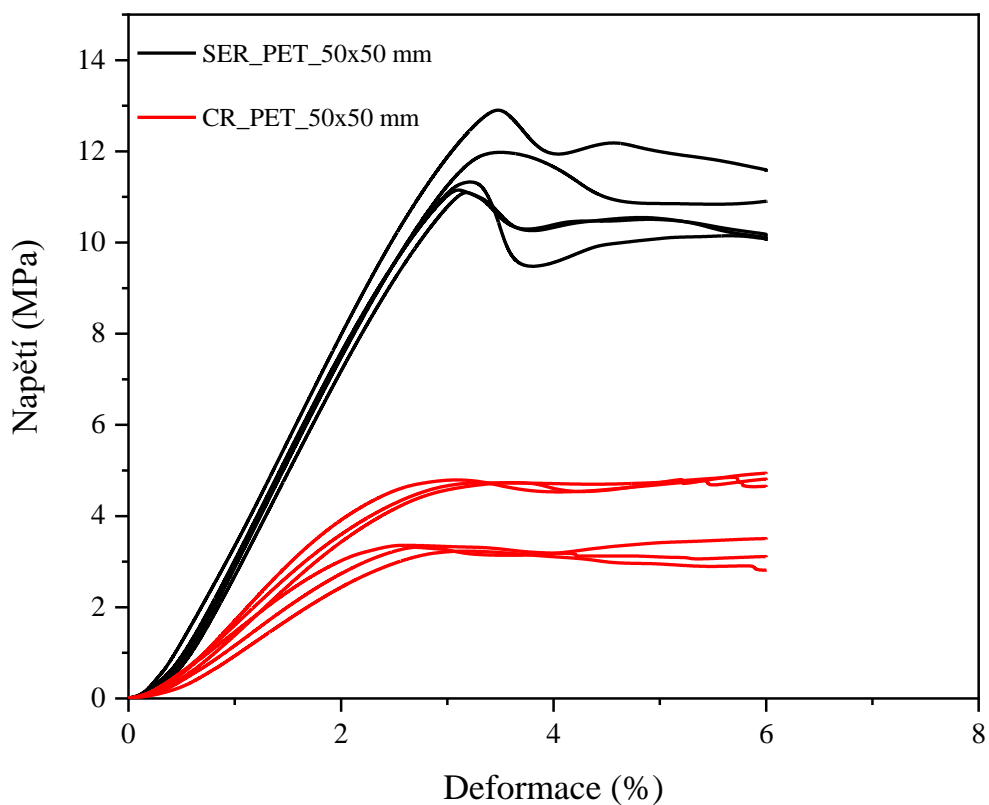
Pro srovnání jsou vyneseny deformační křivky vzorků SER_PET společně se vzorky CR_PET v grafech na obr. 43 a obr. 44. Při porovnání výsledků vzorků z obou tiskáren bez ohledu na jejich rozměr je zřetelné, že vzorky tištěné tiskárnou CR 10S mají značně nižší hmotnost, nižší hodnoty modulu pružnosti a meze kluzu, ve srovnání se vzorky připravenými na tiskárně Sermoon. Rovněž výsledky těchto vzorků CR_PET jsou značně nekonzistentní. Z výsledků lze usuzovat, že tiskárna CR 10S měla pravděpodobně problém s protlačení filamentu skrze trysku. Příčinou toho mohla být nižší teplota extruzní hlavy či např. zanešené ozubené kolečko, které slouží pro posuv materiálu. Přestože odchylky Poissonova poměru jsou vysoké u všech vzorků nezávisle na tiskárně, lze konstatovat, že zápornějších hodnot dosahovaly vzorky připravené právě na tiskárně CR 10S.

Povrch vzorků z obou tiskáren byl za účelem výše zmíněných výsledků pozorován optickým mikroskopem se zvětšením 20×, viz obr. 45. Na snímcích je zřetelné, že povrch vzorků z tiskárny CR 10S je nejednotný a v některých místech jsou dutiny, kde materiál chybí. Ze snímků lze usuzovat na špatnou mezivrstevnou adhezi, jelikož vrstvy jsou patrné, ale nejsou v daném místě spojené. Naopak vzorek tištěný na tiskárně Sermoon se jeví kompaktní a všechny vrstvy na sebe navazují. V kapitole 3.3 je dále studován vliv tiskárny a materiálu na deformační odezvu jednotkových buněk.

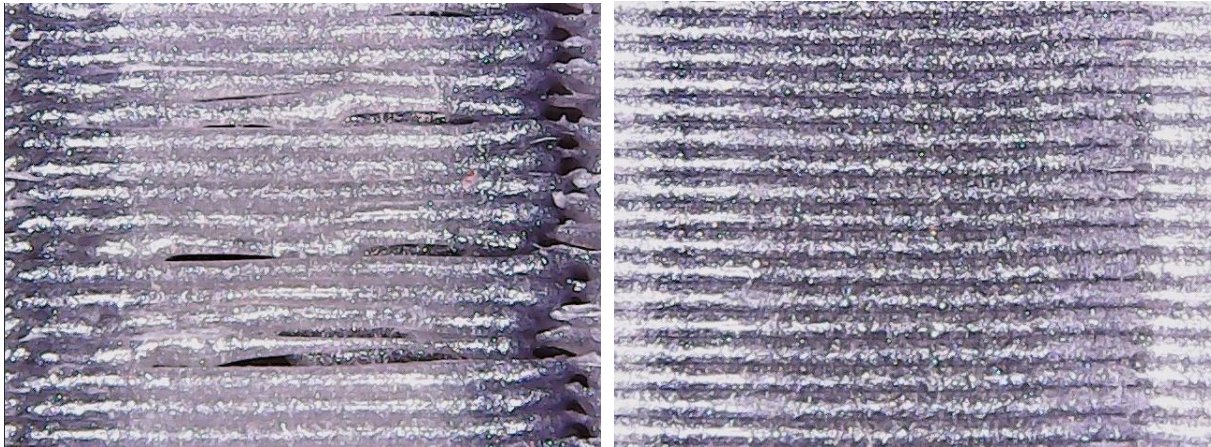
V důsledku vysokých odchylek u výsledných hodnot a obtížné manipulace s bowdenovým extruderem u tiskárny CR 10S byly další vzorky připravovány na tiskárně Sermoon, která vykazuje konzistentnější výsledky.



Obr. 43: Deformační křivky vzorků o rozměrech 25×25 mm připravených na tiskárnách Creality CR 10S a Sermoon V1 PRO



Obr. 44: Deformační křivky vzorků o rozměrech 50×50 mm připravených na tiskárnách Creality CR 10S a Sermoon V1 PRO



Obr. 45: Snímek z optického mikroskopu vzorků připravených na tiskárnách Creality CR 10S (vlevo) a Sermoon V1 PRO (vpravo), zvětšení 20×

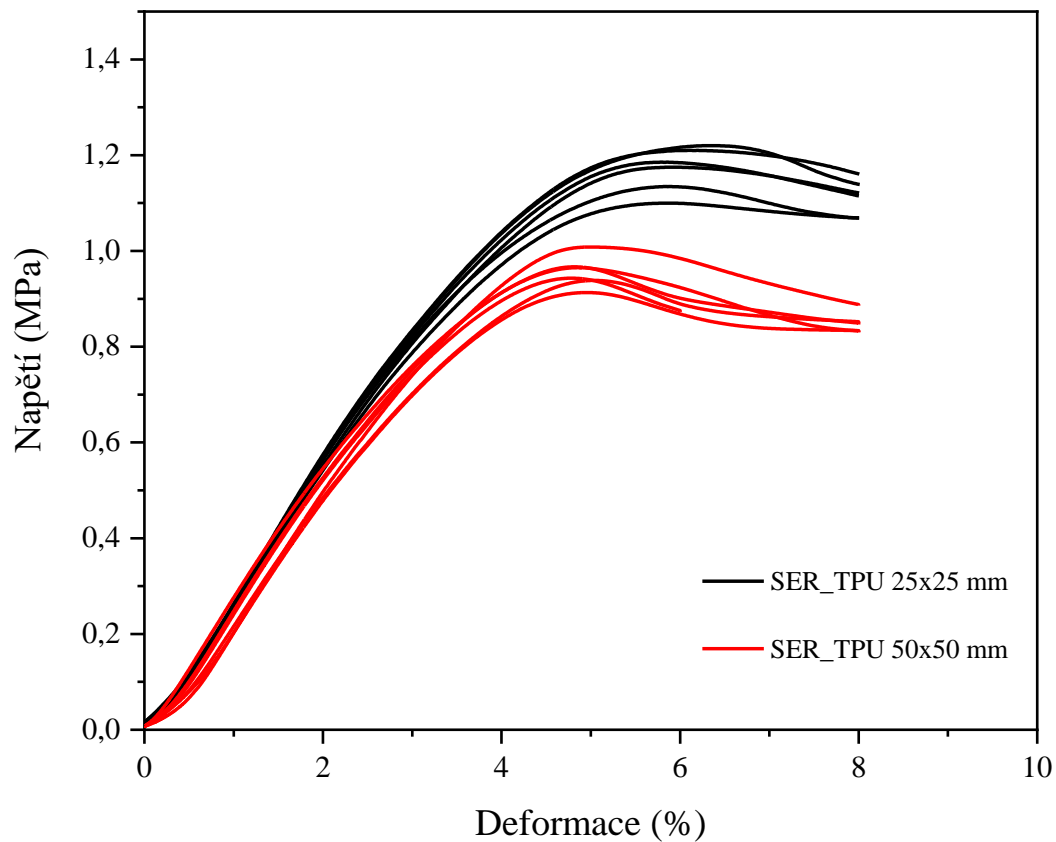
3.2 Vliv počtu jednotkových buněk re-entrantní struktury na auxetické chování

Byly mezi sebou porovnávány dva typy vzorků se stejnou velikostí jednotkových buněk, ale s jejich odlišným počtem. Struktura 50×50 mm měla zhruba čtyřnásobně vyšší počet jednotkových buněk než struktura 25×25 mm. Obě velikosti vzorků byly vytištěny z materiálu s vysokým modulem pružnosti, tedy PET-G a s nízkým modulem pružnosti – TPU.

V grafu na obr. 46 jsou vyneseny deformační křivky pro vzorky připravené tiskárnou Sermoon z materiálu TPU. V Tab. 11 a Tab. 12 jsou ke vzorkům z grafu uvedeny výsledné hodnoty materiálových charakteristik včetně Poissonova poměru a relativní změny porozity. Lze pozorovat, že vzorky s menším počtem (SER_TPU_25×25) jednotkových buněk dosahují vyšší meze kluzu než vzorky s vyšším počtem jednotkových buněk (SER_TPU_50×50). Tato data ukazují, že také průměrná hodnota modulu pružnosti je u vzorků SER_TPU_25×25 nepatrně vyšší, než u vzorků SER_TPU_50×50. Významně se ovšem liší Poissonův poměr, kdy vzorky SER_TPU_50×50 dosahují téměř dvojnásobné záporné hodnoty Poissonova poměru. V případě porozity je tomu naopak, vyšší změnu relativní porozity vykazují vzorky SER_TPU_25×25, a to více jak dvojnásobnou ve srovnání se vzorky SER_TPU_50×50. Zároveň je ale třeba vzít v potaz poměrně velkou relativní odchylku, která je v případě obou typů vzorků vyšší než 15 %.

Vyšší houževnatost vzorků s menším počtem buněk by mohla být důsledkem poruch struktury vzorků. S rostoucí velikostí je vyšší pravděpodobnost výskytu defektů v deformačním poli, což vede k dřívějšímu zborcení struktury. Dalším možným vysvětlením byl vliv podstav, které by bránily deformaci jednotkových buněk v krajních vrstvách, nicméně ten byl vyvrácen v kapitole 3.3. Zvětšení Poissonova poměru se zvětšením vzorku bylo předpokládáno, protože jeho hodnoty by měly být v rámci buněk aditivní. Předpoklad je tedy takový, že navýšíme-li v horizontálním směru počet buněk, úměrně by se měl zvýšit Poissonův poměr, čemuž odpovídají uvedené výsledky. Tuto hypotézu by bylo však třeba ověřit dalšími měřeními.

V případě porozity bylo logicky předpokládáno, že její relativní změna bude růst s velikostí struktury. Vzorky připravené z TPU vykazují v tomto případě reciproké chování.



Obr.46: Deformační křivky dvou velikostí auxetických struktur připravených z TPU

Tab. 11: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků SER_TPU_25×25 mm

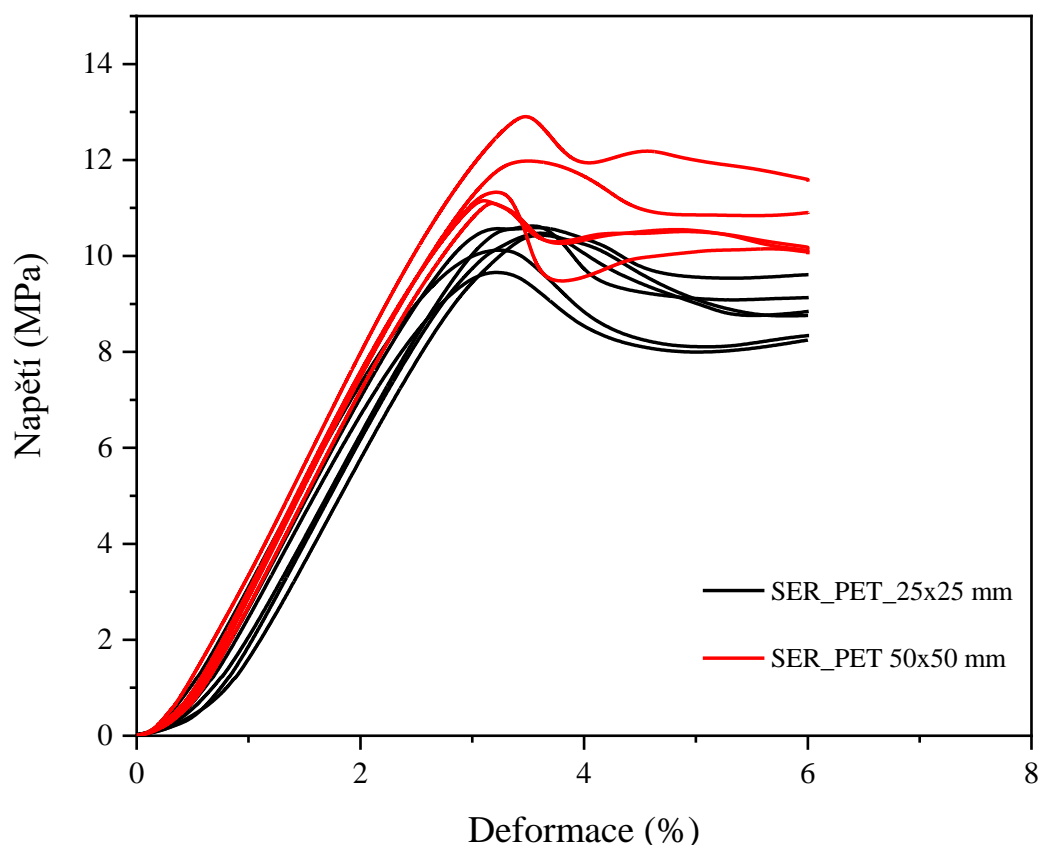
	m [g]	σ_Y [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
TPU_1	4,68	1,10	30,51	-0,45	7,05
TPU_2	4,80	1,19	31,97	-0,50	6,30
TPU_3	4,76	1,18	31,19	-0,47	8,25
TPU_4	4,73	1,21	32,29	-0,44	7,66
TPU_5	4,73	1,13	30,93	-0,43	9,20
TPU_6	4,78	1,22	31,77	-0,44	10,17
Průměr	4,74	1,17	31,44	-0,45	8,11
Odchylka	0,04	0,04	0,62	0,02	1,29
Odchylka [%]	0,803	3,58	1,97	5,19	15,97

Tab. 12: Naměřené a vyhodnocené charakteristiky vzorků SER_TPU_50×50 mm

	m [g]	σ_Y [Mpa]	E [Mpa]	ν [-]	n_{rel} [%]
TPU_1	17,79	0,94	30,23	-0,84	4,00
TPU_2	17,55	0,91	28,54	-0,78	3,75
TPU_3	17,67	0,94	28,45	-0,85	3,29
TPU_4	17,55	0,97	30,14	-0,86	2,40
TPU_5	17,59	1,01	30,53	-0,90	3,87
TPU_6	17,91	0,97	29,28	-0,92	3,86
Průměr	17,68	0,96	29,53	-0,86	3,53
Odchylka	0,13	0,03	0,82	0,05	0,55
Odchylka [%]	0,76	3,09	2,79	5,50	15,63

V grafu na obr. 47 jsou vyneseny deformační křivky pro vzorky připravené tiskárnou Sermoon z materiálu PET-G. Jednotlivé hodnoty materiálových charakteristik jsou již uvedeny v předchozí kapitole 3.1 v Tab. 9 a Tab. 10. U těchto vzorků je možné pozorovat, že se chování tohoto materiálu, který má vyšší modul pružnosti, jeví opačné ve srovnání s TPU, které má modul pružnosti podstatně nižší. U těchto vzorků lze pozorovat, že vzorky SER_PET_50×50 dosahují vyšších hodnot meze kluzu a mají vyšší modul pružnosti, než vzorky SER_PET_25×25. Poissonův poměr je stejně jako v případě vzorků z TPU u větších struktur zápornější, v tomto případě zhruba 1,5×. Změna relativní porozity zhruba odpovídá předpokladům a s větším množstvím buněk se úměrně zvětšila také porozita.

Na základě experimentálních měření je zřejmé, že u materiálu s vysokým modulem pružnosti jako je PET-G, je mechanismus deformace ve srovnání s TPU odlišný. Výsledky naznačují, že deformace těchto vzorků je rovnoměrnější. Houževnatěji se chovají vzorky větších rozměrů a zvětšení porozity větších vzorků je úměrné zvětšení počtu jednotkových buněk. Z výsledků lze konstatovat, že na Poissonův poměr materiál struktury nemá významný vliv.

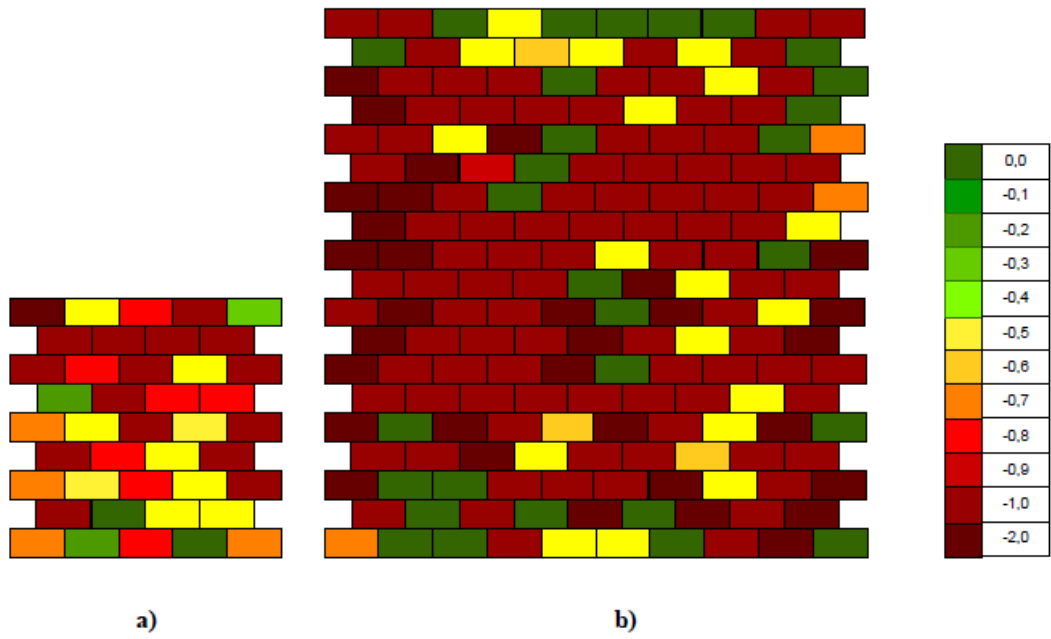


Obr. 47: Deformační křivky dvou velikostí auxetických struktur připravených z PET-G

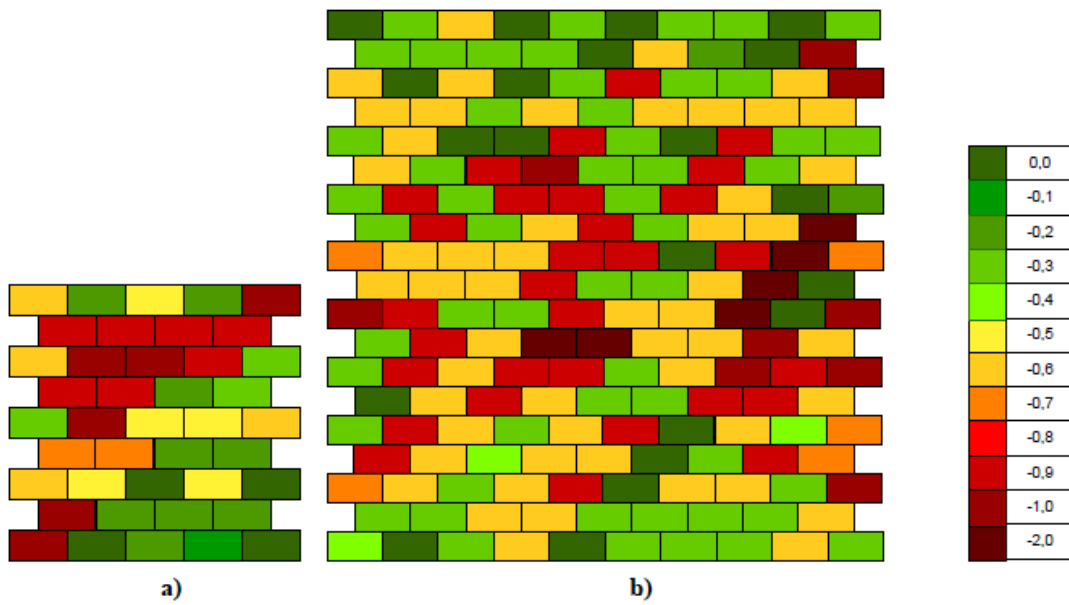
3.3 Vliv tiskárny materiálu na deformační odezvu jednotkových buněk

Ve vzorcích byla změřena deformační odezva elementárních buněk. Výsledky byly zaneseny do schematických obrázků vzorků, kdy jeden obdélník představuje jednu jednotkovou buňku auxetické struktury. Buňky jsou vykresleny v barvách škály uvedené na obr. 48–50 vpravo. Hodnoty na škále nepředstavují hodnoty Poissonova poměru, ale přímo s ním souvisí. Hodnota 0 představuje místa s nejmenší hodnotou Poissonova poměru a hodnota -2 představuje místa s nejvíce zápornou hodnotou Poissonova poměru.

Na obr.48 a obr. 49 je vykreslena deformační odezva jednotlivých buněk vzorků CR_PET a SER_PET. Na snímcích lze sledovat, že u struktur připravených z materiálu PET-G je tendence ke vzniku smykového napětí, které se přenáší po diagonálách skrze celý vzorek. Napětí je strukturou přenášeno poměrně rovnoměrně. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že deformační pole u vzorků SER_PET je homogennější. U vzorků CR_PET je struktura značně defektní, což vede k redistribuci napětí a následnému kolapsu struktury, což je na obr. 48 zřetelné. V případě tiskárny CR 10S by bylo vhodné zkontrolovat teplotu extruzní hlavy, zda není poškozené teplotní čidlo, případně vyměnit ozubené kolečko, které slouží pro posuv materiálu. V důsledku špatných tiskových podmínek jsou vzorky z tiskárny CR_10S subtilnější, jednotkové buňky snáze deformují a struktury vykazují zápornější hodnoty Poissonova poměru.

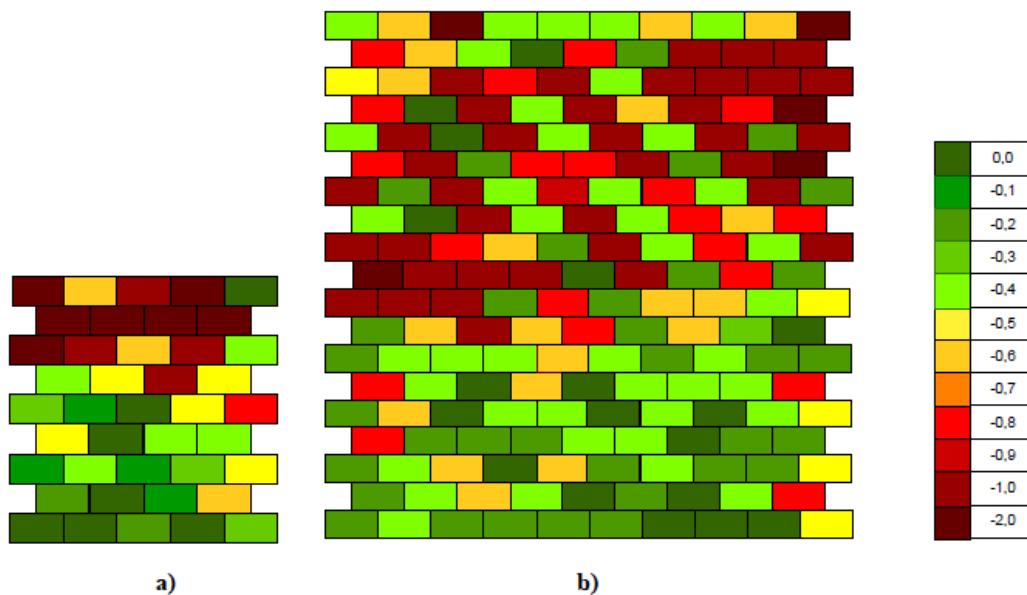


Obr. 48: Schematické znázornění vzorků CR_PET a jejich deformační odezvy v rámci jednotkových buněk



Obr.49: Schematické znázornění vzorků SER_PET a jejich deformační odezvy v rámci jednotkových buněk

Na Obr. je pak vykreslena deformační odezva jednotlivých buněk vzorků SER_TPU. Ze snímků je patrné, že tyto vzorky vykazují odlišný deformační mechanismus ve srovnání s PET-G. U obou velikostí vzorků se struktura bortí pod podstavou, což vylučuje hypotézu o tom, že by podstavy omezovaly deformaci nejbližších buněk, a napětí se nepřenáší do spodních vrstev vzorku. Vzorek SER_TPU_50×50 vykazuje dále značnou deformaci zhruba v polovině výšky struktury. Jak bylo již zmíněno v kap. 3.2, tak na základě získaných poznatků je patrné, že defekty mají v případě flexibilního TPU významný vliv na deformační odezvu. S větším množstvím buněk ve struktuře defektů přibývá, čímž lze vysvětlit subtilnější chování větších vzorků.



Obr.50: Schematické znázornění vzorků SER_TPU a jejich deformační odezvy v rámci jednotkových buněk

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nalezení vztahů mezi typem materiálu, způsobem tvorby objektu FDM technologií a deformačními vlastnostmi vyrobených auxetických struktur.

Bylo zjištěno, že volba 3D tiskárny má na vlastnosti vytištěných struktur významný vliv, a to nejen na tuhost a mez kluzu, ale také na auxetické chování. V důsledku horšího průtoku materiálu skrze trysku u tiskárny Creality CR 10S byl pozorován vyšší rozptyl vlastností mezi jednotlivými tělesy a vyšší hodnoty Poissonova poměru ve srovnání se vzorky tištěnými na tiskárně Sermoon V1 PRO.

Na rozdíl od existujících počítačových simulací auxetik jsme zjistili, že volba materiálu zásadně ovlivňuje celkovou deformační odezvu i auxetické chování vytištěného tělesa. U těles vyrobených z materiálu s vysokým modulem pružnosti byl pozorován odlišný deformační mechanismus oproti vzorkům vyrobených z materiálu s nízkým modulem pružnosti. Softwarová analýza obrazu deformujících se auxetických struktur odhalila u struktur z PET-G homogennější přenos napětí a případné defekty v jejich struktuře významně neovlivňovaly měřené charakteristiky. Naopak u TPU bylo pozorováno, že přítomnost defektů významně omezila přenos napětí mezi jednotlivými auxetickými buňkami v rámci celého tělesa a distribuce deformační odezvy byla velmi nerovnoměrná.

Zvýšení počtu jednotkových buněk v tělese vedlo k nárůstu auxetického efektu projevujícího se více negativním Poissonovým poměrem nezávisle na použitém materiálu. U těles z PET-G dále došlo při navýšení počtu buněk k předpokládanému zvýšení relativní změny porozity, což v případě TPU nebylo pozorováno. Získané unikátní výsledky sice naplnily cíle práce, nicméně otevřely nové otázky, které je třeba zodpovědět pro praktické využití 3D tištěných auxetických struktur v balistické ochraně, ochraně družic a satelitů proti vysokorychlostnímu rázovému namáhání, při konstrukci panelů s laditelnou akustickou emisí a tepelnou vodivostí.

LITERATURA

- [1] PENG, Xiang-Long a Swantje BARGMANN. A novel hybrid-honeycomb structure: Enhanced stiffness, tunable auxeticity and negative thermal expansion. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2021, 15.1.2021 [cit. 2022-10-11]. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106021>
- [2] LU, Chenxi, Mengting HSIEH, Zhifeng HUANG, Chi ZHANG, Yaojun LIN, Qiang SHEN, Fei CHEN a Lianmeng ZHANG. Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials. *Engineering* [online]. 2022, 29.5.2022 [cit. 2022-10-11]. ISSN 2095-8099. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.023>.
- [3] FAN, Junxiang, Lei ZHANG, Shuaishuai WEI, Zhi ZHANG, Seung-Kyum CHOI, Bo SONG a Yusheng SHI. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends. *Materials Today* [online]. 2021, 11/2021 [cit. 2022-10-11]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.04.019>.
- [4] Reddy, P.V., Thomas, S., Choudhury, B. (2017). Design Optimization of Cloaks. In: Choudhury, B. (eds) *Metamaterial Inspired Electromagnetic Applications*. Springer, Singapore. https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1007/978-981-10-3836-5_5
- [5] XU, Cheng, Zhihao REN, ingxuan WEI a Chengkuo LEE. Reconfigurable terahertz metamaterials: From fundamental principles to advanced 6G applications. *IScience* [online]. 2022, 18.2.2022 [cit. 2022-10-12]. ISSN 2589-0042. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103799>.
- [6] LU, Qiangbing, Xin LI, Xiujuan ZHANG, Minghui LU a Yanfeng CHEN. Perspective: Acoustic Metamaterials in Future Engineering. *Engineering*. 2022. ISSN 2095-8099. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.020>
- [7] CHANG, Longfei, Ajuan JIANG, Manting RAO, et al. Progress of low-frequency sound absorption research utilizing intelligent materials and acoustic metamaterials. *Royal Society of Chemistry*. 2021, 2021. Dostupné z: doi:10.1039/D1RA06493B
- [8] LI, Yong, Gaokun YU, Bin LIANG, Xinye ZOU, Guangyun LI, Su CHENG a Jianchun CHENG. Three-dimensional Ultrathin Planar Lenses by Acoustic Metamaterials. *Scientific Reports* [online]. 2015, 4(1) [cit. 2022-11-02]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep06830
- [9] ZHANG, Youming, Hongyi XU a Baile ZHANG. Design, implementation, and extension of thermal invisibility cloaks. *AIP Advances* [online]. 2015, 5(5) [cit. 2022-11-02]. ISSN 2158-3226. Dostupné z: doi:10.1063/1.4913996

- [10] WU, Lingling, Yong WANG, Kuochih CHUNAG, Fugen WU, Qianxuan WANG, Weiqi LIN a Hanqing JIANG. A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation. *Materials Today* [online]. 2021, 2021(44) [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.10.006>
- [11] WU, Shuhao, Zhen LUO, Zuyu LI, Shutian LIU a Lai-Chang ZHANG. Topological design of pentamode metamaterials with additive manufacturing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2021, 2021(377) [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113708>
- [12] Auxetic fibrous structures and their composites: A review. *Composite Structures* [online]. 2022, 2022(290) [cit. 2022-11-19]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115530>
- [13] NABONI, Roberto a Lorenzo MIRANTE. Metamaterial computation and fabrication of auxetic patterns for architecture. *Anais do XIX Congresso da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital 2015* [online]. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015, 2015, 129-136 [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: doi:10.5151/despro-sigradi2015-30268
- [14] REN, Xin, Raj DAS, Phuong TRAN, Tuan Duc NGO a Yi Min XIE. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart Materials and Structures* [online]. 2018, 27(2) [cit. 2022-11-19]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/aaa61c
- [15] YANG, Wei, Zhong-Ming LI, Wei SHI, Bang-Hu XIE a Ming-Bo YANG. Review on auxetic materials: Extreme Damping and Negative Poisson's Ratio. *Journal of Materials Science* [online]. 2004, 39(10), 3269-3279 [cit. 2023-01-27]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1023/B:JMISC.0000026928.93231.e0
- [16] KOLKEN, H. M. A., A. A. ZADPOOR, Xiao-Wen LI a Li MA. Auxetic mechanical metamaterials. *RSC Advances* [online]. 2017, 7(9), 5111-5129 [cit. 2022-11-26]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA27333E
- [17] EVANS, K.E., ALDERSON, A., Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!, *Advanced Materials*, 2000. 12(9): p. 617-628
- [18] LIM, Teik-Cheng, U. RAJENDRA ACHARYA a Yong K. KIM. Longitudinal Modulus of Semi-auxetic Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2010, 29(10), 1441-1445 [cit. 2023-01-30]. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/0731684409103958

- [19] YANG, Sen, Vijaya B. CHALIVENDRA a Yong K. KIM. Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar®/Epoxy laminated composites. *Composite Structures* [online]. 2017, 168, 120-129 [cit. 2023-01-30]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2017.02.034
- [20] GRIMA J N 2010 Auxetic Metamaterials (Strasbourg, France)
- [21] ALDERSON, K.L., R.S. WEBBER, U.F. MOHAMMED, E. MURPHY a K.E. EVANS. An experimental study of ultrasonic attenuation in microporous polyethylene. *Applied Acoustics* [online]. 1997, 50(1), 23-33 [cit. 2023-02-03]. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/S0003-682X(96)00023-0
- [22] IMBALZANO, Gabriele, Phuong TRAN, Tuan D. NGO a Peter V.S. LEE. A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings. *Composite Structures* [online]. 2016, 135(10), 339-352 [cit. 2023-01-30]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.038
- [23] CHO, Hyeonho, Dongsik SEO a Do-Nyun KIM. Mechanics of Auxetic Materials. *Handbook of Mechanics of Materials* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2019, 2019-02-21, 733-757 [cit. 2023-02-03]. ISBN 978-981-10-6883-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-6884-3_25
- [24] The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1982, 382(1782), 25-42 [cit. 2023-02-01]. ISSN 0080-4630. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1982.0087
- [25] L.J. Gibson and M.F. Ashby, Cellular solids. *Advances in Polymer Technology* [online]. 9(2), 165-166 [cit. 2023-02-01]. ISSN 07306679. Dostupné z: doi:10.1002/adv.1989.060090207
- [26] WANG, Xin-Tao, Bing WANG, Xiao-Wen LI a Li MA. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2017, 131-132(9), 396-407 [cit. 2022-11-26]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.05.048
- [27] GRIMA, J. N., K. E. EVANS, Xiao-Wen LI a Li MA. Auxetic mechanical metamaterials. *Journal of Materials Science Letters* [online]. 2017, 19(17), 1563-1565 [cit. 2022-11-26]. ISSN 02618028. Dostupné z: doi:10.1023/A:1006781224002
- [28] LEITE, Carla a Helena PEREIRA. Cork-Containing Barks—A Review. *Frontiers in Materials* [online]. 2017, 3(1782), 25-42 [cit. 2023-02-01]. ISSN 2296-8016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2016.00063

- [29] FISCHER, Sarah C. L., Leonie HILLEN a Chris EBERL. Mechanical Metamaterials on the Way from Laboratory Scale to Industrial Applications: Challenges for Characterization and Scalability. *Materials* [online]. 2020, 13(16) [cit. 2023-02-13]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13163605
- [30] COULAIS, Corentin, Chris KETTENIS a Martin VAN HECKE. A characteristic length scale causes anomalous size effects and boundary programmability in mechanical metamaterials. *Nature Physics* [online]. 2018, 14(1), 40-44 [cit. 2023-02-13]. ISSN 1745-2473. Dostupné z: doi:10.1038/nphys4269
- [31] ÁLVAREZ ELIPE, Juan Carlos a Andrés DÍAZ LANTADA. Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, 21(10) [cit. 2022-11-27]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/21/10/105004
- [32] ZHANG, Zhengyang, Hanxing ZHU, Ru YUAN, Sanmin WANG, Tongxiang FAN, Yacine REZGUI a Di ZHANG. Auxetic interpenetrating composites: A new approach to non-porous materials with a negative or zero Poisson's ratio. *Composite Structures* [online]. 2020, 243(1) [cit. 2023-01-21]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2020.112195
- [33] Yeganeh-Haeri, Amir, et al. "Elasticity of alpha-cristobalite: a silicon dioxide with a negative Poisson's ratio." *Science*, vol. 257, no. 5070, 31 July 1992, pp. 650+. *Gale AcademicOneFile*, link.gale.com/apps/doc/A12561263/AONE?u=googlescholar&sid=googleScholar&xid=29c10038. Accessed 3 Feb. 2023.
- [34] ARROUVEL, Corinne a Jean-Guillaume EON. Understanding the Surfaces and Crystal Growth of Pyrite FeS₂. *Materials Research* [online]. 2019, 22(1) [cit. 2023-01-21]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-1140
- [35] MAZLOOMI, Mohammad Sadegh, Mostafa RANJBAR, Luca BOLDRIN, Fabrizio SCARPA, Sophoclis PATSIAS a Neriman OZADA. Vibroacoustics of 2D gradient auxetic hexagonal honeycomb sandwich panels. *Composite Structures* [online]. 2018, 187, 593-603 [cit. 2023-02-06]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2017.10.077
- [36] NOVAK, Nejc, Matej VESENJAK, Zoran REN, Fabrizio SCARPA, Sophoclis PATSIAS a Neriman OZADA. Computational Simulation and Optimization of Functionally Graded Auxetic Structures Made From Inverted Tetrapods. *Physica status solidi (b)* [online]. 2017, 254(12), 593-603 [cit. 2023-02-06]. ISSN 03701972. Dostupné z: doi:10.1002/pssb.201600753

- [37] ZAMANI, Mohammad Hossein, Mohammad HEIDARI-RARANI a Keivan TORABI. *A novel graded auxetic honeycomb core model for sandwich structures with increasing natural frequencies* [online]. 2022, 24(2), 1313-1339 [cit. 2023-02-08]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/10996362211030565
- [38] ZHANG, Junhua, Baojuan DONG a Wei ZHANG. *Dynamic Crushing of Gradient Auxetic Honeycombs* [online]. 2021, 9(3), 421-431 [cit. 2023-02-08]. ISSN 2523-3920. Dostupné z: doi:10.1007/s42417-020-00236-z
- [39] XU, Mengchuan, Ziran XU, Zhong ZHANG, Hongshuai LEI, Yingchun BAI a Daining FANG. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2019, 159, 43-57 [cit. 2023-02-10]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044
- [40] FAN, Peng, Yu CHEN, Jian XIONG, Hong HU, Yingchun BAI a Daining FANG. In-plane mechanical properties of a novel hybrid auxetic structure: Theoretical and experimental studies. *Smart Materials and Structures* [online]. 2022, 31(7), 43-57 [cit. 2023-02-10]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/ac68b5
- [41] JOSEPH, Athul, Vinyas MAHESH a Dineshkumar HARURSAMPATH. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. *Advances in Manufacturing* [online]. 2021, 2021(9) [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: doi:10.1007/s40436-021-00357-y
- [42] CIOBOTA, Nastase-Dan a Gheorghe GHEORGHE. 3D Complex Structures Through Fused Deposition Modeling as a Rapid Prototyping Technology Designed for Replacing Anatomic Parts of Human Body. *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics* [online]. 2018, 16(15), 30-33 [cit. 2022-12-31]. ISSN 2537-3161. Dostupné z: doi:10.1515/bsmm-2018-0016
- [43] WANG, Jia-Chang, Manuel RUILOVA a Sheng-Jen HSIEH. A web-based platform for automated vat photopolymerization additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2022, 119(3-4), 2721-2742 [cit. 2022-12-31]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-08318-2
- [44] SELIMIS, Alexandros, Vladimir MIRONOV a Maria FARSARI. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing. *Microelectronic Engineering* [online]. 2015, (132), 83-89 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.10.001
- [45] Mai Trang Do. Fabrication of submicrometer 3D structures by one-photon absorption direct laser writing and applications. *Optics [physics.optics]*. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2015. English.

- [46] Mantada, Phaneendra & Mendřický, Radomír & Šafka, Jiří. (2017). Parameters influencing the precision of various 3D printing technologies. *MM Science Journal*. 2017. 2004-2012. 10.17973/MMSJ.2017_12_201776.
- [47] ACUNA, Daniel, Francisco GUTIÉRREZ, Rodrigo SILVA, Humberto PALZA, Alvaro S. NUNEZ a Gustavo DÜRING. A three step recipe for designing auxetic materials on demand. *Communications Physics* [online]. 2022, 5(1) [cit. 2023-02-22]. ISSN 2399-3650. Dostupné z: doi:10.1038/s42005-022-00876-5
- [48] KHAN, Sohaib Z., S.H. MASOOD, Ryan COTTAM, P. TANDON, M. GUO a Gustavo DÜRING. Mechanical properties in tensile loading of H13 re-entrant honeycomb auxetic structure manufactured by direct metal deposition. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2015, 34(1) [cit. 2023-02-22]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20153401004
- [49] Creality3D CR-10S 3D Printer. In: *MatterHackers* [online]. 2023 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/l/creality-cr-10s-3d-printer/sk/MDDVR1KC>
- [50] Creality Sermoon V1. In: *Creality* [online]. Blansko: 2022 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-sermoon-v1/>
- [51] ZAABA, Nor Fasihah a Mariatti JAAFAR. *A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation* [online]. 2020, 60(9), 2061-2075 [cit. 2023-02-11]. ISSN 0032-3888. Dostupné z: doi:10.1002/pen.25511
- [52] TECHNICAL DATA SHEET: PET-G Premium. In: *Smart 3D* [online]. 2022 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://smart3d.s2.cdn-upgates.com/n/n63c716a2896df-en-tds-spectrum-petg-premium.pdf>
- [53] TECHNICAL DATA SHEET: S-Flex 98A. In: *Smart 3D* [online]. 2022 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://smart3d.s2.cdn-upgates.com/8/863c718a969f9e-en-tds-spectrum-sflex-98a.pdf>

Seznam zkratek

PET-G	Polyethylentereftalát glykol
TPU	Termoplastický polyetherový polyuretan
EMM	Elektrické metamateriály
AMM	Akustické metamateriály
TMM	Tepelné metamateriály
MMM	Mechanické metamateriály
THz	Terahertzové
AC	Acoustic cloaking; Akustický plášť
LFV	Nízko frekvenční zvukové vlny
AL	Acoustic lens; Akustické čočky
PMM	Pentamodové metamateriály
UHMWPE	ultravysokomolekulární polyetylen
AGAH	Angular Gradient Auxetic Honeycomb, úhlově gradientní voštinové struktury
TGAH	Thikness Gradient Auxetic Honeycombs, auxetické struktury s gradientem tloušťky stěny
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografie
DLW	Direct Lase Writing, Přímý laserový zápis
SLM	Selective Laser Melting, Selektivní tavení laserem
SLS	Selective Laser Sintering, Selektivní laserové slinování
SEBM	Selective Electron Beam Melting, Selektivní tavení elektronovým paprskem
PLA	Polylactic acid, polymléčné kyselina
ABS	Akrylonitril-butadien-styren

Seznam symbolů

n	index lomu	(-)
θ	úhel lomu na rozhraní	(°)
q	tepelný tok	(W)
λ	koeficient tepelné vodivosti	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
T	teplota	(K)
ν	poissonův poměr	(-)
ε	relativní deformace	(-)
E	youngův modul pružnosti	(Pa)
G	smykový modul pružnosti	(Pa)
K	objemový modul pružnosti	(Pa)
H	tvrdost	(-)
N_{rel}	porozita	(%)
V_p	objem pórů	(-)
V_c	celkový objem	(-)
m	hmotnost	(g)
σ_Y	mez kluzu	(MPa)