



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## MIKRO-VOŠTINOVÉ ABSORBÉRY NÁRAZU

MICRO-CELLULAR IMPACT ABSORBERS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Rakušan

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skalka, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Jakub Rakušan</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Skalka, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Mikro–voštinové absorbéry nárazu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Absorbéry se používají pro tlumení velké nárazové energie. Kinetická energie dopadajícího objektu se „absorbují“ řízenou deformací vnitřních prvků struktury absorbéro. Velikost absorbované energie závisí na typu a parametrech vnitřní struktury, použitím materiálu, případně dalších materiálech použitých jako plnivo v dutinách struktury absorbéro. Jedná se o aktuální problematiku, kterou se zabývá např. automobilový průmysl, armáda či lékařství.

Bakalářská práce bude zaměřena na absorbéry s (ne)auxetickou mikro–voštinovou strukturou. Tato struktura bude výpočtově modelována ve 2D. K řešení bude použita metoda konečných prvků.

#### Cíle bakalářské práce:

1. Provedení rešeršní studie související s řešenou problematikou
2. Vytvoření (2D) výpočtového modelu vybrané (ne)auxetické struktury
3. Numerická simulace dopadové zkoušky
4. Analýza výsledků numerické simulace
5. Zhodnocení dosažených výsledků s ohledem na možné využití v praxi

#### Seznam doporučené literatury:

DOWLING, N.E.: Mechanical behavior of materials. Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, 2013. ISBN 01-313-9506-8.

LIM, T.C.: Auxetic Materials and structures, 2015, Springer, Singapore

AL-RIFAIE, H., SUMELKA, W.: Development of a New Shock Absorbing Uniaxial Graded Auxetic Damper, Materials, 2019, 12, 2573; doi:10.3390/ma12162573

ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L.: The Finite Element Method, Butterwoth-Heineman, Oxford, 2000

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá mikro-voštinovými absorbéry nárazu. Mikro-voštinový absorbér přeměňuje kinetickou energii dopadajícího objektu na deformační energii vnitřní struktury absorbéru. Práce se zabývá dvěma typy absorbérů, a to absorbérem s vnitřní auxetickou strukturou a absorbérem s vnitřní neauxetickou strukturou. U obou vnitřních struktur byla zachována stejná porozita pro následné srovnání charakteristik jednotlivých absorbérů. V rámci této práce byla provedena simulace dopadové zkoušky. Při této zkoušce do absorbéru dopadaly objekty (válečky) různého průměru, stejné délky (totožné s tloušťkou absorbéru) a s různou kinetickou energií. Pro řešení tohoto problému byla využita metoda konečných prvků (explicitní řešení). Výstupem studie bylo srovnání simulací dopadové zkoušky do auxetické a neauxetické struktury.

## KLÍČOVÁ SLOVA

MKP, Absorbér, Auxetická struktura, Mikro-voštiny, Dopadová zkouška

## ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on micro-cellular impact absorbers. The micro-cellular absorber converts the kinetic energy of the impacting object into the strain energy of the internal structure of the absorber. The thesis focuses on two types of absorbers, namely the absorber with internal auxetic structure and the absorber with internal non-auxetic structure. The same porosity has been kept for both internal structures for further comparison of the characteristics of both the absorbers. As part of this thesis, an impact test was simulated. In this test, objects (cylinders) of different diameters, the same length (identical to the absorber thickness), and different kinetic energy were impacted into the absorber. The finite element method (explicit solution) was used to solve this problem. The output of the study was a comparison of simulations of the impact test into auxetic and non-auxetic structures.

## KEYWORDS

FEM, Absorber, Auxetic structure, Honey-comb structure, Drop test

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAKUŠAN, Jakub. Mikro-voštinové absorběry nárazu [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140356>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Skalka, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma *Mikro-voštinové absorbéry nárazu* jsem napsal samostatně pod vedením Ing. Petra Skalky, Ph.D. a s použitím odborné literatury, jejíž seznam se nachází na konci práce.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Jakub Rakušan

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Petru Skalkovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup, ochotu, trpělivost a cenné rady při vypracování této práce. Také bych chtěl poděkovat i mé rodině a blízkým, kteří mě ve studiu podporovali.

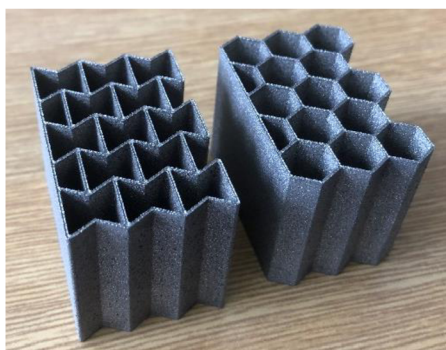
## Obsah

1. ÚVOD.....	9
2. FORMULACE PROBLÉMU.....	10
3. CÍLE PRÁCE.....	10
4. REŠERŠNÍ ČÁST .....	11
4.1. Základní materiálové charakteristiky auxetické struktury.....	11
4.2. Auxeticita.....	12
4.2.1. Vývoj auxetických materiálů.....	12
4.2.2. Auxetické materiály.....	13
4.2.3. Mechanické vlastnosti auxetických struktur.....	13
4.2.4. Využití auxetických materiálů.....	13
4.3. Absorbéry .....	14
4.3.1. Mechanické absorbéry.....	14
4.3.2. Praktické využití mechanických absorbérů.....	14
5. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ.....	15
5.1. Model geometrie absorbéru.....	15
5.2. Model materiálových vlastností vnitřní struktury absorbéru.....	17
5.3. Model okrajových a počátečních podmínek dopadové zkoušky.....	18
6. REALIZACE VÝPOČTOVÉHO MODELOVÁNÍ.....	19
7. PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ .....	20
7.1. Porovnání deformační odezvy auxetické a neauxetické vnitřní struktury na dopadající objekt.....	20
7.1.1. Zrychlení dopadajícího objektu.....	23
7.1.2. Hloubka průrazu dopadajícího objektu.....	24
7.1.3. Závislost hloubky průrazu na kinetické energii dopadajícího objektu... ..	25
7.1.4. Závislost zrychlení na hloubce průrazu dopadajícího objektu.....	25
8. ZÁVĚR .....	29
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	31
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....	32
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	33



## 1. ÚVOD

Voština je struktura s danou rovinnou geometrií (např. tvar šestihranu (obr. 1-1 vpravo)), která je extrudována do prostoru. V anglické literatuře se využívá termín honeycomb structure a pro auxetickou variantu téže struktury re-entrant honeycomb structure. Vzor pro tuto strukturu lze najít v přírodě např. ve včelích plástvích, v kostech a listech. Počátek hojnějšího využití voštinové struktury se datuje již v 18. století. Nejdříve se vyráběla z lepenky. Roku 1915 si nechal Hugo Junkers jako první patentovat kovovou voštinovou konstrukci [1].



Obr. 1-1 Voštinová honeycomb struktura: vlevo neauxetická struktura, vpravo auxetická struktura

Ve 20. století jsou první zmínky o tom, že voštinová struktura může mít i záporný úhel mezi trámečky základní buňky (viz obr. 1-1 vlevo). Poté bylo zjištěno, že tato struktura má negativní Poissonovo číslo. Tato vlastnost se nazývá auxeticita.

Absorpce (z latinského absorbere) znamená pohlcování [2]. Absorbovat lze různé energie např. kinetickou. Pojmenování „pohlčení“ není zcela přesné, jelikož ze zákona o zachování energie vyplývá, že se může energie pouze přeměňovat např. z kinetické energie na deformační.

Mikro-voštinový absorbér v kombinaci s nynějšími technologiemi nabízí široké spektrum využití. Může absorbovat velké množství kinetické energie dopadajícího objektu při relativně malé hmotnosti absorbéru. S technologií 3D tisku vzrostla možnost rozvoje v tomto odvětví. Tato technologie je předurčena k tvorbě různých struktur, včetně těch s velkou pórovitostí, což bylo s konvenčními technologiemi velmi obtížné. Vlastnosti těchto absorbérů se dají optimalizovat vhodnou volbou vstupních parametrů, jako např. tloušťka stěny, velikost základní buňky, ale taktéž úhel  $\alpha$ .

## 2. FORMULACE PROBLÉMU

Mikro-voštinové absorbéry se využívají pro tlumení velké nárazové energie v relativně krátkém časovém úseku. Kinetická energie dopadajícího objektu je „absorbována“ pomocí řízené deformace vnitřní struktury absorbéru. Deformací vnitřní struktury absorbéru může vznikat tzv. návalek. Ten napomáhá přeměně kinetické energie na deformační. Absorpce této energie vzroste z důvodu zapojení větší oblasti struktury skrze vzniklý návalek. Velikost absorbované energie závisí na velkém množství parametrů např. na rozměrech základní buňky vnitřní struktury absorbéru, na vnějších rozměrech absorbéru (na výšce, šířce, hloubce), na materiálu vnitřní struktury, popřípadě na plnivu dutin. Také lze využít kombinaci více velikostí základní buňky vnitřní struktury. Tyto struktury mají v praxi široké spektrum využití, od lékařství až po armádu.

Pro určení deformačně-napěťové odezvy vnitřní struktury absorbéru byl vytvořen výpočtový 2D model. Výpočtovým modelováním byla simulována dopadová zkouška. Do vnitřní struktury absorbéru dopadal zkušební objekt (váleček) s různým průměrem o různé kinetické energii. Data z numerických simulací byla využita pro určení vlastností analyzovaných absorbérů.

## 3. CÍLE PRÁCE

Cíle této práce se dají shrnout v následujících bodech:

- Provedení rešeršní studie o dané problematice.
- Vytvoření 2D výpočtového modelu pro auxetické a neauxetické struktury.
- Numerická simulace dopadové zkoušky pro dané modely.
- Analýza výsledků numerických simulací.
- Zhodnocení výsledků těchto simulací a porovnání vlastností auxetické a neauxetické struktury a možné využití těchto struktur pro praxi.

## 4. REŠERŠNÍ ČÁST

Rešeršní část se zabývá dvěma hlavními problémy. První část je věnována vysvětlení auxeticity, jejímu historickému vývoji a ukázce různých struktur, které vykazují auxetické chování. Druhá část se věnuje problematice absorberů.

### 4.1. Základní materiálové charakteristiky auxetické struktury

Za základní mechanické charakteristiky elastického chování materiálu jsou považovány:  $E$  (Youngův modul pružnosti),  $\mu$  (Poissonovo číslo, v zahraniční literatuře se běžně používá  $\nu$ ),  $K$  (Objemový modul pružnosti) a  $G$  (Modul pružnosti ve smyku).

Youngův modul pružnosti je interpretován jako směrnice v tahovém diagramu pro elastickou oblast. Je definován tímto vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (4.1)$$

kde  $\sigma$  je normálové napětí (tahové či tlakové) a  $\varepsilon$  je poměrné přetvoření ve směru zatížení.

Poissonovo číslo lze vyjádřit jako poměr přetvoření v podélném a příčném směru.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \quad (4.2)$$

kde  $\varepsilon_y$  je přetvoření v příčném směru a  $\varepsilon_x$  v podélném. Konvenční materiál má Poissonovo číslo mezi 0 a 0,5. Toto číslo zpravidla závisí na krystalické mřížce [3]:

$$\mu_{fcc,hcp} \geq \mu_{bcc} \geq \mu_{cd}, \quad (4.3)$$

kde FCC znamená „face centered cubic“, HCP „hexagonal closed packed“, BCC „body centered cubic“ a CD „cubic diamond“.

Rovnice pro Modul pružnosti ve smyku ( $G$ ) a Objemový modul pružnosti ( $K$ ) uvedené níže jsou platné pouze pro izotropní materiál [4].

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4.4)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (4.5)$$

Kombinací rovnic (4.4) a (4.5) lze získat rovnice:

$$\frac{1 + \mu}{1 - 2\mu} = \frac{3K}{2G} \quad (4.6)$$

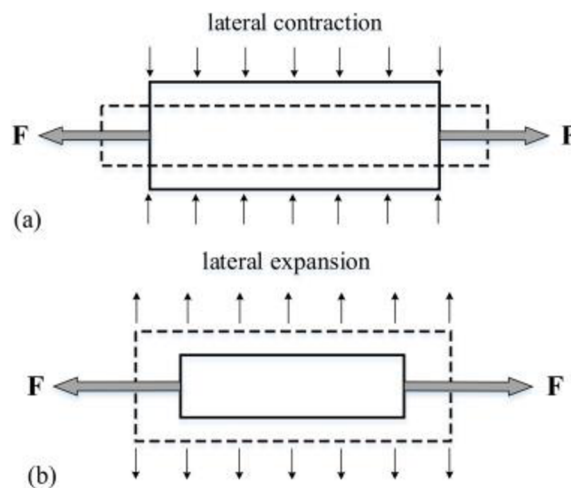
při úvaze kladné hodnoty obou modulů musí platit podmínka zapsána jako nerovnice:

$$\frac{1 + \mu}{1 - 2\mu} \geq \frac{3}{2}. \quad (4.7)$$

Z řešení této nerovnice vyplývá pro lineárně elastický izotropní materiál hodnota Poissonova čísla v intervalu  $(-1; 0,5)$  [5].

## 4.2. Auxeticita

Auxetický materiál, jinými slovy také materiál s negativním Poissonovým číslem, je specifický svým chováním při osovém zatížení (tahovém či tlakovém). Při tahovém zatížení zvětšuje svůj objem. Slovo auxetický pochází z řeckého auxetikos, což znamená zvětšitelný. Tento pojem poprvé použil profesor Ken Evans [6]. V knize (A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity) publikované roku 1944 A. E. H. Love popsal přírodní auxetické materiály jako kostní tkáň, kočičí kůže, kůže kravského vemena a přírodní minerály jako např. monokrystal pyritu ( $FeS_2$ ) [3]. Z tohoto vyplývají dvě možnosti, jak lze dosáhnout auxeticity. To je možno využitím auxetického materiálu nebo pomocí speciální struktury. Auxeticita materiálu je na molekulární úrovni. Druhou možností, jak dosáhnout auxeticity je pomocí modifikace (výroby) vnitřní struktury, tedy se jedná o makroskopickou úroveň. Dosáhnou auxeticity vnitřní struktury lze například pomocí změny úhlu, kterou svírají trámečky základní buňky struktury viz obr. 1-1, kde je tato změna patrná. Druhá možnost je obecně více využívána. Je snadněji dosažitelná a také dává větší prostor optimalizaci svých vlastností, tudíž lze vytvořit strukturu „šitou na míru“ a díky tomu má struktura široké možnosti použití. Taková struktura může být vyrobena z klasických materiálů jako např. kov, plast atd.



Obr. 4-1 Chování a) neauxetické b) auxetické struktury [7]

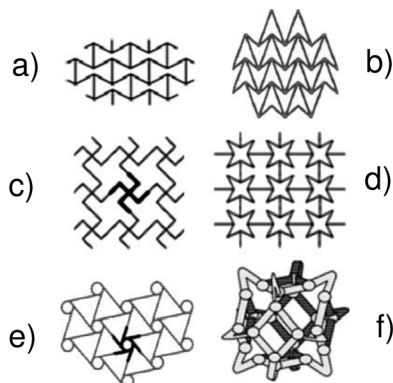
Na obr. 4-1 a) neauxetické a b) auxetické struktury je zobrazen viditelný rozdíl chování těchto dvou struktur. Auxetická struktura při tahovém zatížení zvětšuje svůj objem naproti tomu neauxetická (konvenční) struktura svůj objem zmenšuje.

### 4.2.1. Vývoj auxetických materiálů

První, kdo zmínil, že Poissonovo číslo by mohlo nabývat záporných hodnot byl Jean Claude Barré de Saint-Venant roku 1848, ale to pouze pro anizotropní materiál. Auxetickou strukturu jako první vytvořil Roderick Lakes. Vytvořil ji z pěny, která měla  $\mu = -0,8$ . Tato struktura je nazývána „re-entrant structure“, což ve volném překladu znamená struktura s ostrým úhlem vnitřní struktury viz struktura na obr. 1-1 vlevo [8]. Dále se touto strukturou zabýval Gibson. Určil auxetický efekt voštinových struktur. U těchto struktur se deformují trámečky vnitřní struktury ohybem [3].

#### 4.2.2. Auxetické materiály

Auxetickými materiály mohou být polymery, kovové pěny nebo anizotropní vláknové kompozity [3]. Jak již bylo dříve zmíněno, existují speciální struktury s auxetickými vlastnostmi. Ukázky těchto struktur je možno vidět na obr. 4-2. Tyto struktury mohou být 2D i 3D čili rovinné stejně jako prostorové.

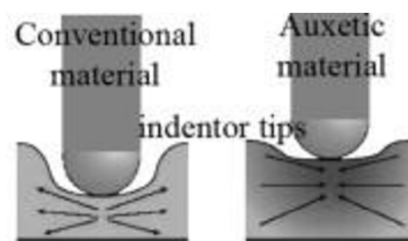


Obr. 4-2 Typy auxetických struktur upraveno z [3]

První struktura (a) re-entrant je předmětem studia této bakalářské práce, b) „double arrow-head“, c) „missing rib“, d) „star-shaped honeycomb topology“, e) „Hexa-chiral“ a poslední f) se nazývá „3d re-entrant“.

#### 4.2.3. Mechanické vlastnosti auxetických struktur

Auxetické struktury mají specifické vlastnosti, jsou vysoce odolné vůči smyku, tudíž Modul pružnosti ve smyku ( $G$ ) nabývá vysokých hodnot. Oproti tomu mají nižší odolnost vůči tahu (tlaku) z důvodu své porozity [3].



Obr. 4-3 Ukázka deformace auxetické a neauxetické struktury při vnikání cizích částic [3]

Na obr. 4-3 je možno vidět „bránění“ vnitřní struktury auxetického materiálu vůči vniku cizích těles, což plyne z auxeticity. Tedy auxetický materiál při vniku cizích těles lokálně sníží svou porozitu a nabývá vyšších hodnot tvrdosti [3].

#### 4.2.4. Využití auxetických materiálů

Auxetické materiály mají široké využití. Jsou vhodné pro aplikace, kde je potřeba:

- Odolnost vůči smykovému napětí
- Odolnost vůči vniku cizích těles (tvrdost)
- Absorpce energie

Jako příklady odvětví, kde se tato struktura dá využít, je textilní průmysl (podrážka obuvi, nebo pro tzv. chytré oblečení, které kontroluje zápach), nebo pro piezoelektrické

součásti (vznik malé elektrické energie deformací), lopatky turbín v letadlech, helmy v armádě a potenciálně jako implantáty (kostní nebo zubní) [3].

### 4.3. Absorbéry

Jak bylo již v úvodu zmíněno, absorbovat znamená pohlcovat, resp. energii přeměňovat např. kinetickou energii na deformační [2]. Mohou pohlcovat mechanickou energii, záření a jiné formy energií. Tato práce se zabývá pouze mechanickými absorbéry.

#### 4.3.1. Mechanické absorbéry

Absorbéry mechanické energie je možno chápat jako porézní strukturu, která pohltí (disipuje) kinetickou energii pomocí řízené deformace vnitřní struktury [9]. Takové absorbéry mají široké spektrum využití ve strojním a stavebním inženýrství [9].

Mechanické absorbéry lze dělit na aktivní a pasivní. Toto rozdělení lze popsat na tanku, kde za pasivní absorbér je považován pancíř a za aktivní tzv. reaktivní pancíř. Tento pancíř při dotyku indentoru (v našem případě náboje) vybuchne a tím absorbuje energii indentoru, funguje na principu akce a reakce.

V současnosti pozorujeme výrazný nárůst využití absorbérů. S rozvojem 3D tisku a jiných moderních technologií mohou být ze struktur, které jsou porézní, tím pádem mají nižší hustotu než plný blok téhož materiálu. Příkladem jsou kovové pěny, voštinové struktury, které mohou, ale nemusí být auxetické. Takové struktury jsou převážně vyvíjeny z důvodu celkové nízké hmotnosti, vysoké pevnosti, popřípadě tvrdosti, ale také kvůli dobrým disipativním vlastnostem.

Vytvořením voštinových struktur technologií 3D tisku je umožněno vyrábět struktury, jejichž rozměry základní buňky a rozměry celého absorbéru odpovídají požadavkům pro danou aplikaci.

#### 4.3.2. Praktické využití mechanických absorbérů

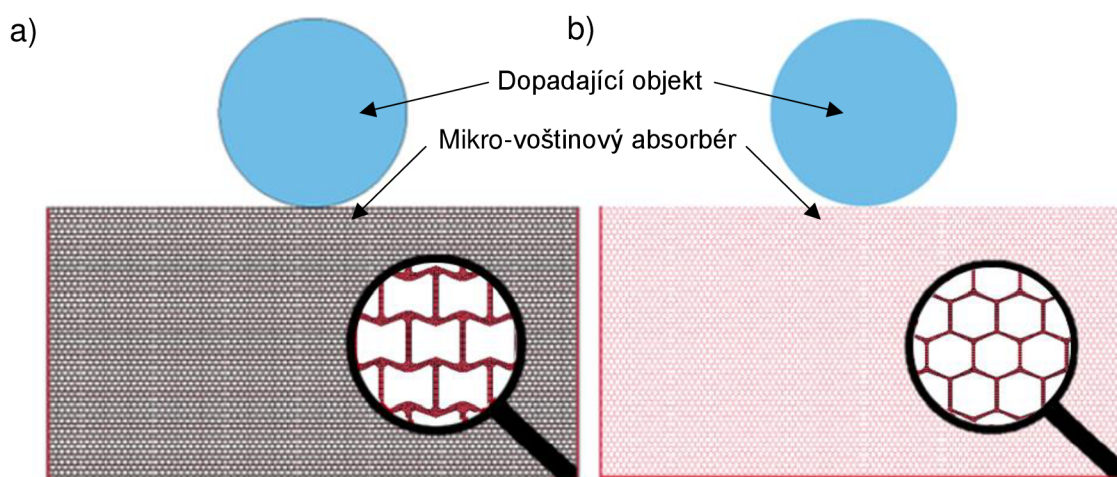
Mechanické absorbéry lze použít ve více odvětvích. Můžou být k vidění v dopravě jako nárazníky nebo tlumiče. V armádě jsou zastoupeny ochranné prvky jako např. helmy a neprůstřelné vesty. Dalším příkladem je podrážka obuvi.

## 5. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Předmětem výpočtového modelování byly mikro-voštinové absorbéry s auxetickou a neauxetickou vnitřní strukturou. Výpočtové modelování je tvořeno dílčími výpočtovými modely, jako model geometrie, model materiálových vlastností a model okrajových a počátečních podmínek.

### 5.1. Model geometrie absorbéru

Model byl diskretizován pomocí rovinných lineárních prvků s plnou integrací. Odezva struktury je řešena v podmínce rovinné deformace. Maximální velikost prvku pro diskretizaci modelu geometrie vnitřní struktury absorbéru byla  $0,075 \text{ mm}$ .



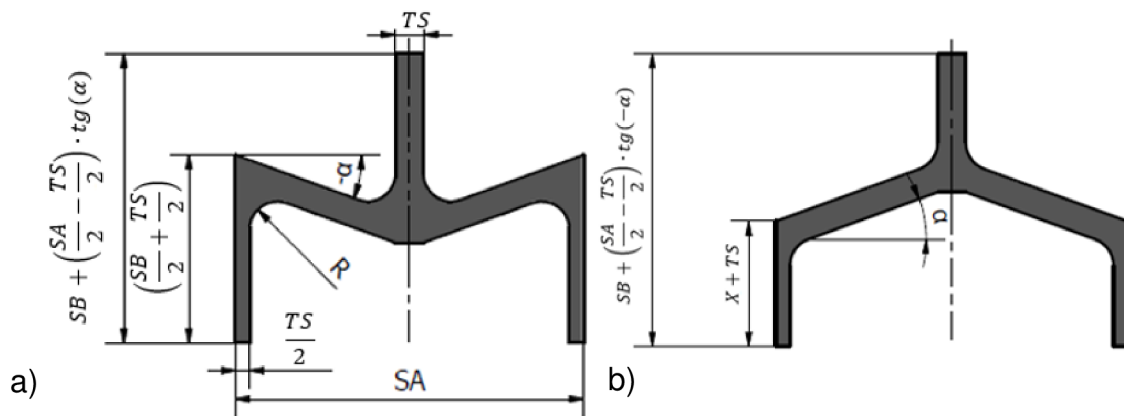
Obr. 5-1 Model geometrie absorbéru a) s auxetickou strukturou a ukázkou diskretizace b) s neauxetickou strukturou a ukázkou diskretizace

Na obr. 5-1 je vyobrazen mikro-voštinový absorbér s dopadajícím objektem (válečkem) o průměru  $75 \text{ mm}$  s detailem vnitřní struktury, a) je auxetická vnitřní struktura (Auxet) a b) je neauxetická vnitřní struktura (Neauxet). Absorbér u obou variant (Auxet, Neauxet) měl konstantní rozměry: šířka  $212 \text{ mm}$ , výška  $110 \text{ mm}$  a tloušťka  $1 \text{ mm}$ . Ve 2D modelu byla uvažována jednotková tloušťka.

Pro výpočet porozity byl využit následující vztah:

$$P = 1 - \frac{S_1}{S}, \quad (5.1)$$

kde  $P$  značí porozitu,  $S_1$  plochu odpovídající vnitřní struktuře a  $S$  plochu připadající na vnitřní buňku. Dle výše uvedeného vztahu byly navrženy parametry tak, aby obě uvažované struktury měly stejnou porozitu.



Obr. 5-2 Základní buňka a) auxetické struktury b) neauxetické struktury

Na obr. 5-2 je zobrazena geometrie základní buňky a) auxetické struktury a b) je neauxetické struktury. Kóty chybějící na obr. 5-2 b) jsou totožné s obr. 5-2 a). K určení parametru  $X$  byl použit tento vztah:

$$X = \left(\frac{TS}{2}\right) \cdot (\tan(\alpha) - 1) + \left(\frac{SB}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{SA \cdot \tan(\alpha)}{SB - TS}\right). \quad (5.2)$$

Rozměry základní buňky ve vertikálním směru pro výše uvedené struktury jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Vertikální rozměry základní buňky vnitřní struktury absorbéru

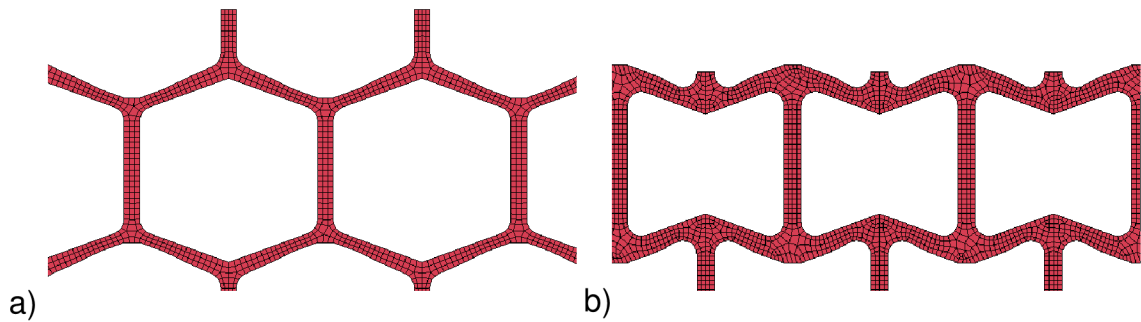
Auxet	2,081 mm
Neauxet	2,081 mm

Pro obě struktury byla použita tzv. Honeycomb structure. Tato struktura se skládá z buněk ve tvaru šestihranu. Úhel pro auxetický model je  $\alpha = -20^\circ$  a pro neauxetický  $\alpha = 20^\circ$ . U obou řešených variant byl předpokládán přechodový rádius  $R$ . Tento rádius je možno vidět na obr. 5-2, byl zvolen na základě měření ze 3D tisku. Další rozměry základní buňky vnitřní struktury jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Vstupní parametry

$SA$	Horizontální rozměr	2,5	[mm]
$SB$	Vertikální rozměr	2,5	[mm]
$TS$	Tloušťka trámečku	0,2	[mm]
$R$	Rádius	0,2	[mm]





Obr. 5-3 Vrchní dopadová vrstva struktury absorbéru a) neauxetická vnitřní struktura b) auxetická vnitřní struktura

Neauxetická vnitřní struktura absorbéru oproti auxetické variantě byla rozdílná ve vrchní vrstvě dopadové ploše. Obr. 5-3 znázorňuje rozdílnou geometrii povrchu vnitřní struktury. Ve vyobrazení a) (Neauxet) existují trámečky rovnoběžné se směrem dopadu (vertikální trámečky povrchové vrstvy vnitřní struktury), pro Auxet (b)) nebyly vytvořeny. Tyto trámečky by měli mít vliv na maximální zrychlení při dopadu. Dále jsou v práci zkoumány vlivy těchto trámečků.

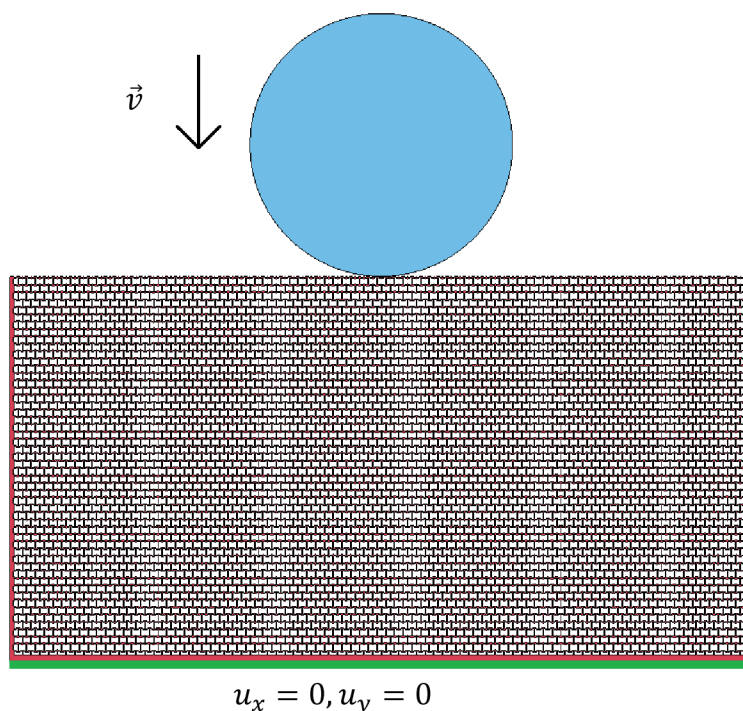
Dopadající váleček měl následující průměry: 10 mm, 25 mm, 50 mm a 75 mm . Maximální velikost prvku diskretizace válečku byla 0,5 mm.

## 5.2. Model materiálových vlastností vnitřní struktury absorbéru

Ve výpočtovém modelu byl použit bilineární elasto-plastický model materiálu s těmito vlastnostmi:

- Hustota:  $\rho = 8310 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$
- Youngův modul pružnosti:  $E = 230 \text{ GPa}$
- Mez kluzu:  $Re = 350 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti:  $Rm = 900 \text{ MPa}$
- Tangenciální modul (zpevnění)  $E_T = 2750 \text{ MPa}$

### 5.3. Model okrajových a počátečních podmínek dopadové zkoušky



Obr. 5-4 Okrajové a počáteční podmínky aplikované na model absorbéru

Okrajovými podmínkami mikro-voštinového absorbéru byly nulové posuvy ve směru  $x$  a  $y$  předepsány pro spodní hranu desky znázorněnou zeleně na obr. 5-4. Tyto okrajové podmínky byly totožné pro auxetickou i neauxetickou vnitřní strukturu absorbéru. Také podmínka rovinné deformace je uvažována pro oba modely. Desky po bočních stranách slouží pouze k udržení tvaru absorbéru, žádné okrajové podmínky na nich nebyly uvažovány.

Dopadající objekt (váleček) byl v numerických simulacích uvažován absolutně tuhý (Rigid body). Výpočtové modely byly vytvořeny pro 6 kinetických energií. Základní kinetická energie byla  $E_{k1} = 30,7 J$  a její násobky byly: 10, 25, 50, 75 a 100. K dosažení těchto násobků byla výpočtově modelována hustota válečku, tudíž i jeho celková hmotnost.

Dopadající objekt (váleček) padal volným pádem z výšky  $5 m$ , proto byla uvažována dopadová rychlost  $v = 10 m \cdot s^{-1}$  (viz obr. 5-4) jako počáteční podmínka. Pro výpočet této rychlosti byl použit vztah:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (5.3)$$

Tato rychlost byla stejná pro všechny numerické simulace dopadové zkoušky.

## 6. REALIZACE VÝPOČTOVÉHO MODELOVÁNÍ

Výpočtové modelování bylo realizováno v určitém časovém úseku dopadové zkoušky (tj. od prvního kontaktu dopadajícího objektu, až po jeho zastavení), jednalo se tedy o explicitní řešení. V rámci výpočtového modelu byl taktéž podstatný kontakt mezi absorbérem a dopadajícím objektem (válečkem). Stejně tak jako mezi jednotlivými trámečky při porušení vnitřní struktury absorbéru.

Zrychlení, rychlost, hloubka průrazu, kinetická energie dopadajícího objektu (válečku) byly popsány na základě deformační odezvy vnitřní struktury. Elastické odpružení struktury je mimo oblast zájmu.

Realizace výpočtového modelování probíhala v softwaru ANSYS LS-DYNA. Zde probíhaly časově náročné numerické simulace. Bylo provedeno 48 simulací dopadových zkoušek. Poté byla data zpracována v softwaru MATLAB.

## 7. PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Pro dopadající objekt (váleček) byly vyhodnocovány následující veličiny: kinetická energie ( $E_k [J]$ ), zrychlení ( $a [g]$ ), maximální zrychlení ( $a_{max} [g]$ ), rychlost ( $v [m \cdot s^{-1}]$ ), hloubka průrazu ( $y [mm]$ ) a maximální hloubka průrazu ( $Y [mm]$ ).

Kinetická energie je dopočítávána z rychlosti válečku, z této veličiny lze vyčíst jakou energii zvládne absorbér pojmout. Zrychlení udává odezvu struktury vůči dopadajícímu válečku. Pro lepší představivost je zrychlení v celé práci uvažováno v násobcích tíhového (gravitačního) zrychlení. Maximální hloubka průrazu je podstatná pro dimenzování procesní zóny absorbéru.

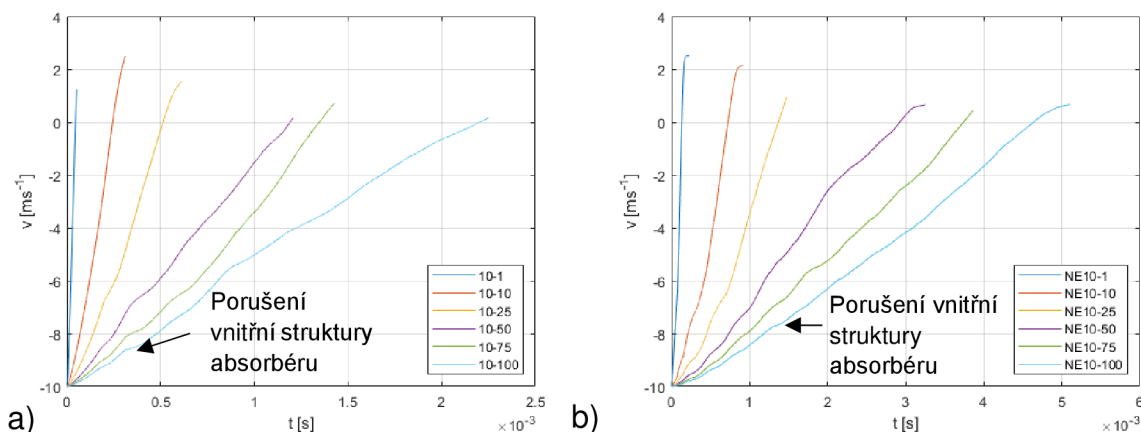
Při realizaci výpočtového modelování byly pro přehlednost vytvořeny zkratky. Tab. 3 obsahuje vysvětlení zkratk. Ty jsou taktéž využívány jako legenda v grafech.

Tab. 3 Legenda výsledků

10-10	Auxetická struktura a dopadající váleček o průměru 10 mm a 10 násobné hmotnosti
NE75-1	Neauxetická struktura s dopadajícím válečkem o průměru 75 mm a základní hmotnosti

Nejprve byly porovnány deformační odezvy auxetické struktury a neauxetické struktury na něž dopadal váleček stejného průměru, kde byly popsány výše uvedené veličiny a z toho vytvořeny závěry této práce.

### 7.1. Porovnání deformační odezvy auxetické a neauxetické vnitřní struktury na dopadající objekt



Obr. 7-1 Závislost rychlosti na čase pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti a) pro auxetickou strukturu, b) pro neauxetickou strukturu

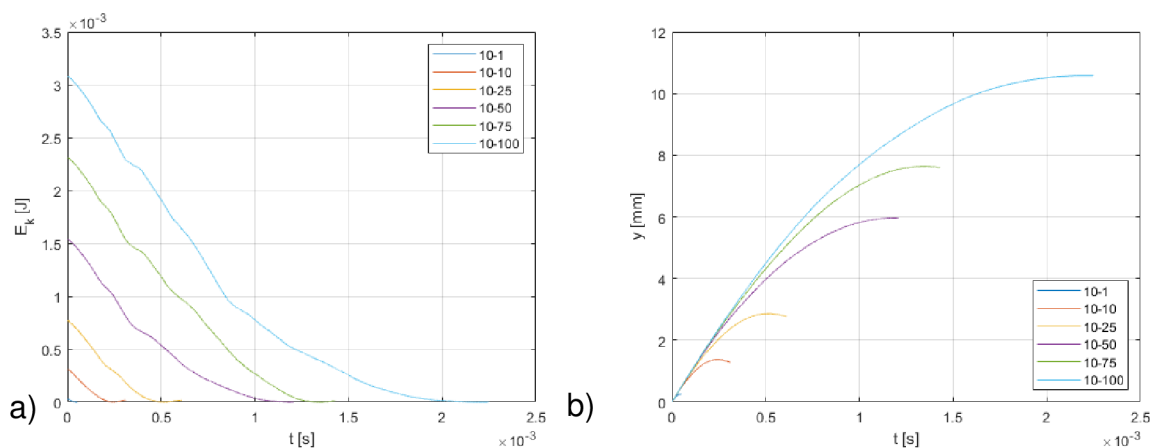
Na obr. 7-1 jsou vidět závislosti rychlosti na čase pro auxetickou a neauxetickou vnitřní strukturu absorbéru. Na obr. 7-1 a) je patrná lineární závislost pro variantu 10-1 a 10-10. Pro obr. 7-1 b) je tato lineární závislost pouze pro variantu NE10-1. Při vyšších násobcích hmotnosti (kinetických energiích) lze pozorovat porušení vnitřní struktury absorbéru. To lze poznat na závislosti rychlosti na čase nelineárním chováním (viz vyznačená oblast obr. 7-1 a) a b)). Pro výše zmíněné varianty (10-1, 10-10, NE10-1)

nedochází k překonání meze pevnosti, tudíž nenastává porušování trámečků. Průměrného zrychlení dopadajícího válečku je uvedeno v tab. 4:

Tab. 4 Průměrná hodnota zrychlení dopadajícího válečku

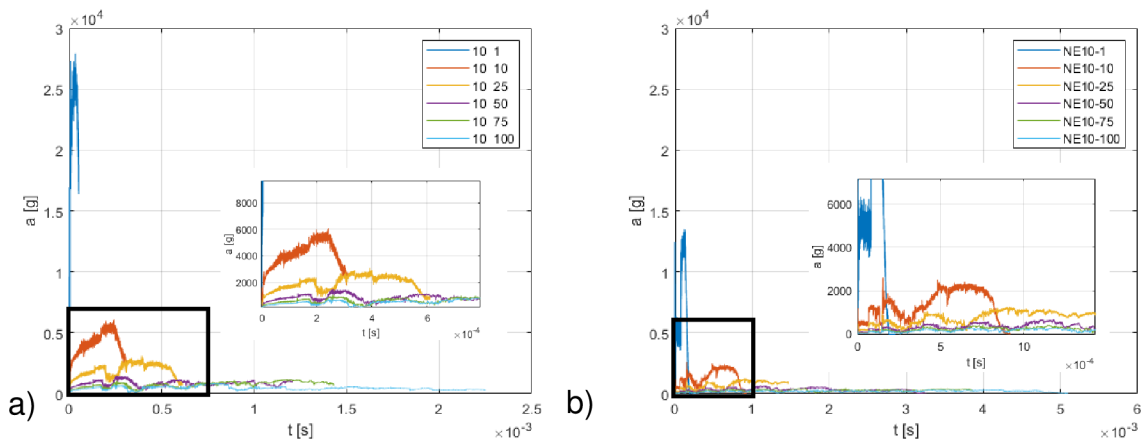
$x_m$	Auxet $a_{avg}$ [g]	Neauxet $a_{avg}$ [g]
1	$2,1860 \cdot 10^4$	$7,5525 \cdot 10^3$
10	$4,1157 \cdot 10^3$	$1,3721 \cdot 10^3$
25	$1,9577 \cdot 10^3$	728
50	842	342
75	744	270
100	456	216

Kde  $x_m$  je násobek hmotnosti dopadajícího válečku. Zde je na patrná nižší tuhost neauxetické varianty z nižšího průměrného zrychlení. Hodnoty uvedené v tab. 4 lze vyjádřit jako směrnici změny rychlosti na čase.



Obr. 7-2 a) Závislost  $E_k$  na čase pro auxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti, b) Závislost hloubky průrazu na čase pro auxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti

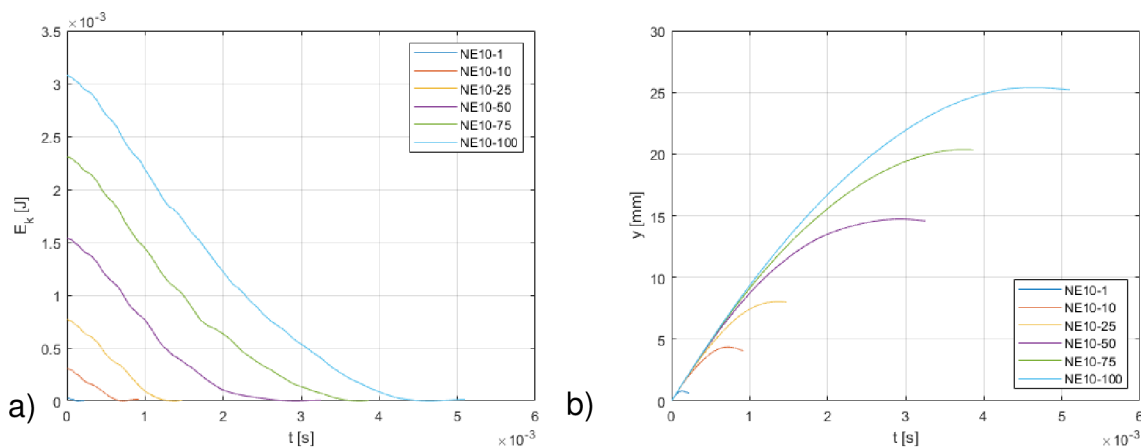
Na obr. 7-2 a) je vyobrazena závislost kinetické energie dopadajícího válečku na čase. Pro nižší násobky hmotnosti válečku je pozorováno kvadratické chování, ale s rostoucími násobky hmotnosti válečku se tato charakteristika mění. Příkladem takového chování je tvorba „návalku“, který vzniká borcením trámečků vnitřní struktury absorberu. Závislost hloubky průrazu na čase (obr. 7-2 b)) ukazuje, že s rostoucím násobkem hmotnosti válečku roste jeho maximální hloubka průrazu.



Obr. 7-3 Závislost zrychlení na čase pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti a) pro auxetickou strukturu, b) pro neauxetickou strukturu

Závislost zrychlení dopadajícího válečku na čase pro obě struktury je vyobrazena na obr. 7-3. Již na první pohled je patrný skokový rozdíl maximálního zrychlení pro různé násobky hmotnosti válečku. Dále jsou na obr. 7-3 a) též vidět maxima v počáteční fázi dopadu, narozdíl od obr. 7-3 b). Toto je zapříčiněno vertikálními trámečky povrchové vrstvy vnitřní struktury uvažovanými pouze u neauxetické varianty. Z toho plyne, že trámečky mají vliv na maximální zrychlení, které se jimi dá redukovat.

Viditelný rozdíl mezi jednotlivými násobky hmotnosti dopadajícího válečku je v časovém úseku trvání maximálního zrychlení. Pro nízké hodnoty těchto násobků je časový úsek výrazně kratší. Taktéž lze sledovat, že pro násobky hmotnosti válečku vyšší než 10-50 není první vrchol maximem, tedy mění se redistribuce zrychlení. U neauxetických variant toto není tak patrné z důvodu vertikálních trámeček vrchní povrchové vrstvy.

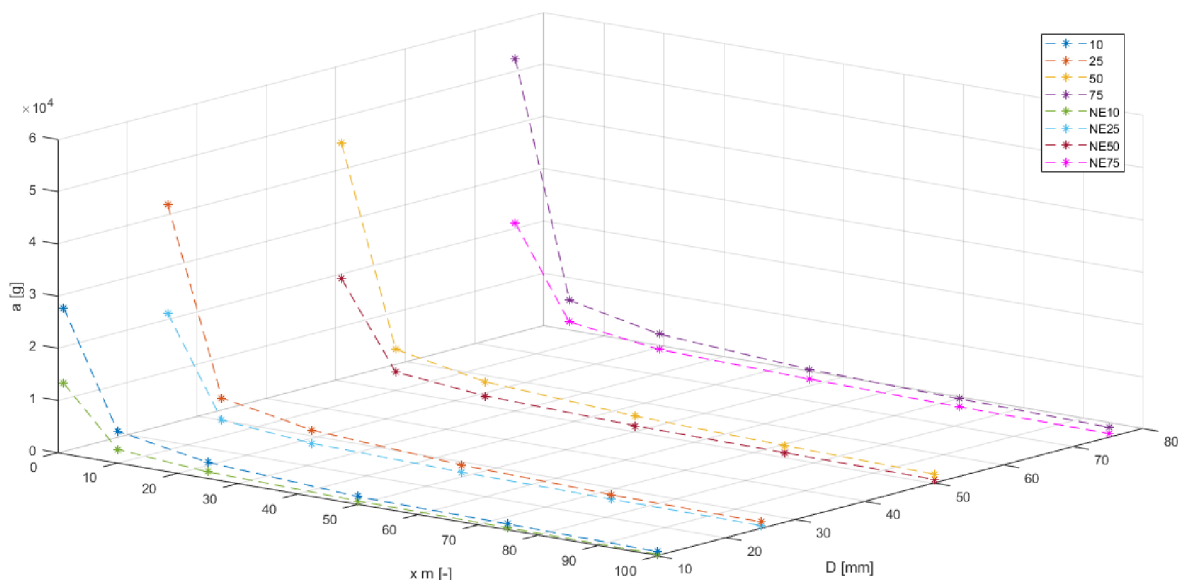


Obr. 7-4 a) Závislost  $E_k$  na čase pro neauxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti, b) Závislost hloubky průrazu na čase pro neauxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti

Závislosti kinetické energie dopadajícího válečku na čase (obr. 7-4) mají podobné trendy jako tomu je na obr. 7-2. Tato podobnost průběhů se dala předpokládat z důvodu obdobných podmínek dopadové zkoušky pro obě struktury. Obr. 7-2 a) a obr. 7-4 a) se liší časem pohlcení kinetické energie dopadajícího válečku. Auxetická varianta vnitřní struktury pohltí stejnou energii za výrazně kratší čas. To je také jeden

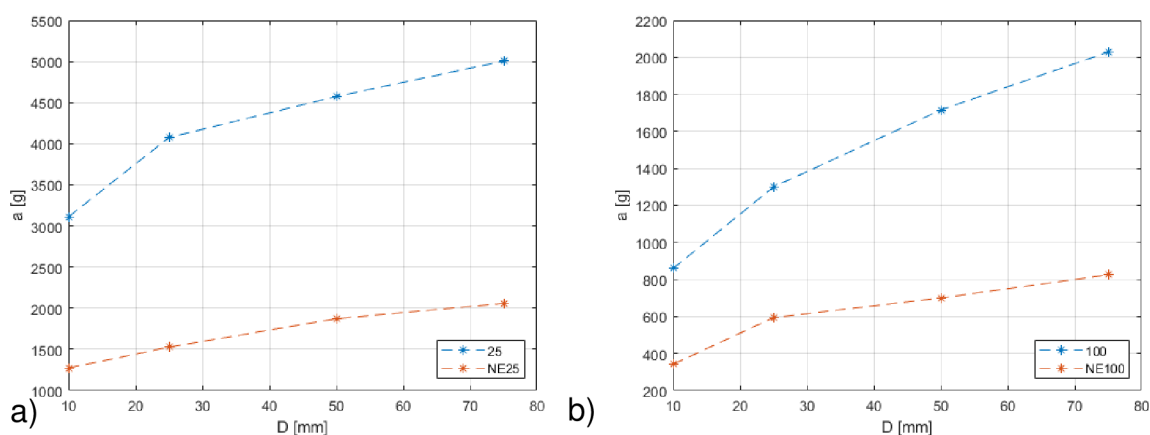
z důvodů vyššího maximálního zrychlení dopadajícího válečku (vyšší zrychlení znamená rychlejší pokles kinetické energie). Obr. 7-2 b) a obr. 7-4 b) mají různé maximální hloubky průrazu. Z tohoto lze také vyvodit nižší tuhost mikro-voštinového absorbéru s neauxetickou vnitřní strukturou.

### 7.1.1. Zrychlení dopadajícího objektu



Obr. 7-5 Závislost  $a_{max}$  na násobku hmotnosti a průměru dopadajícího objektu

Na obr. 7-5 je vidět závislost maximálního zrychlení při dopadu na průměru válečku a na jeho násobku hmotnosti ( $x_m$ ). Z těchto dat je patrný pokles maximálního zrychlení pro vyšší násobky hmotnosti. Také lze pozorovat s rostoucí hmotností klesající rozdíl maximálního zrychlení auxetické a neauxetické vnitřní struktury.

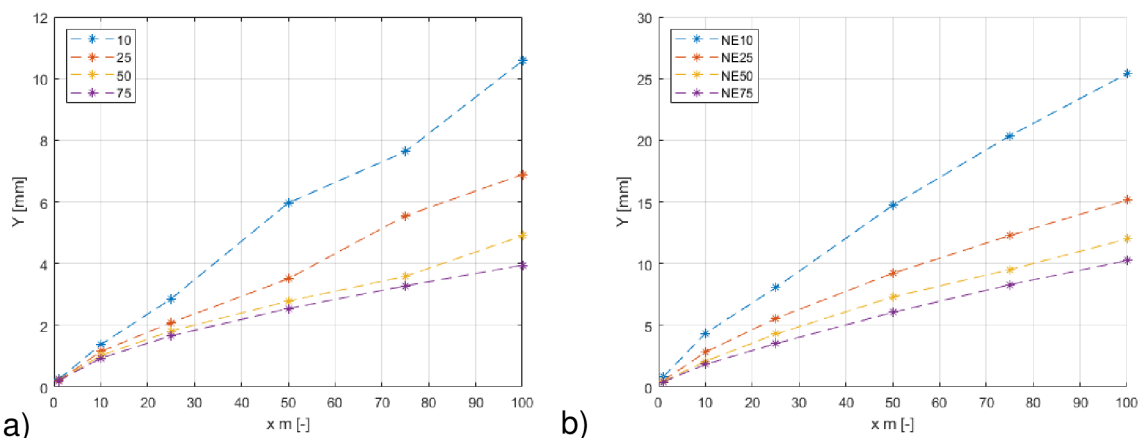


Obr. 7-6 Závislost  $a_{max}$  na průměru dopadajícího objektu při konstantní násobku hmotnosti a) 25 b) 100

Na obr. 7-6 je možno vidět závislost maximálního zrychlení pro konstantní násobek hmotnosti pro a) 1 a b) 100 a je zde patrný nárůst zrychlení pro rostoucí průměr dopadajícího válečku.

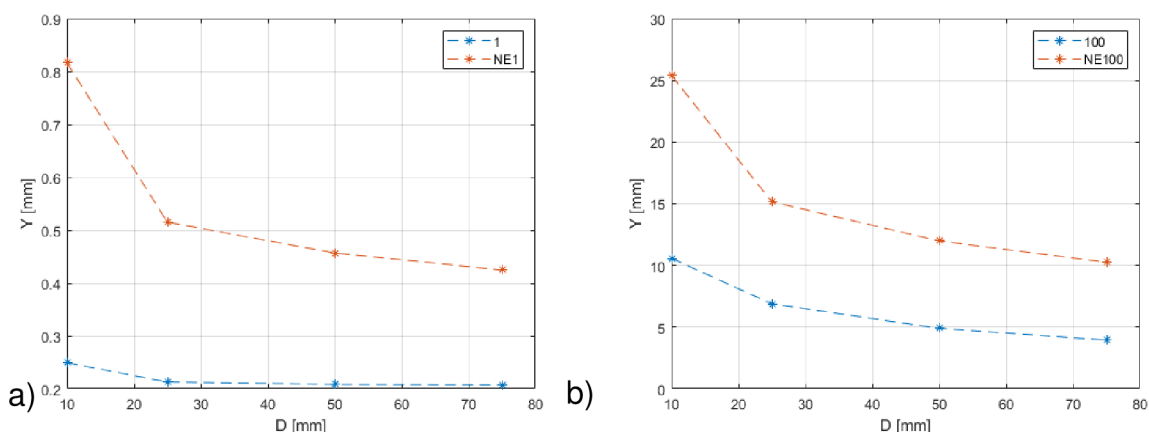
### 7.1.2. Hloubka průrazu dopadajícího objektu

Hloubka průrazu na násobku hmotnosti ukázala závislosti, podle kterých je možno udělat první odhad minimální výšky absorbéru při známém průměru dopadajícího válečku a jeho hmotnosti.



Obr. 7-7 Závislosti hloubky průrazu na násobku hmotnosti dopadajícího válečku pro a) auxetickou vnitřní strukturu b) neauxetickou vnitřní strukturu

Na obr. 7-7 jsou vidět závislosti hloubky průrazu na násobku hmotnosti pro a) auxetickou vnitřní strukturu, b) neauxetickou vnitřní strukturu. Je zde patrná, již dříve zmíněná, nižší tuhost neauxetické varianty vnitřní struktury. Toto je zobrazeno na deformační odezvě vnitřní struktury pro variantu 10 (Auxet 10) a NE75 (Neauxet 75), kde jsou podobné hloubky průrazu. Váleček (10 100) má nejvyšší hloubku průrazu, tedy je nejhorší variantou z hlediska hloubky průrazu pro auxetickou vnitřní strukturu, opakem je varianta NE75-100, která je z tohoto ohledu nejlepší pro neauxetickou variantu. Důležitou roli zde hraje průměr dopadajícího válečku vzhledem k velikosti základní buňky vnitřní struktury absorbéru. Pro malý váleček je zapojena menší plocha absorbéru a váleček se dostane do větší hloubky, než je tomu u větších průměrů válečku.



Obr. 7-8 Závislost hloubky průrazu na průměru pro konstantní hmotnost a) 1 b) 100

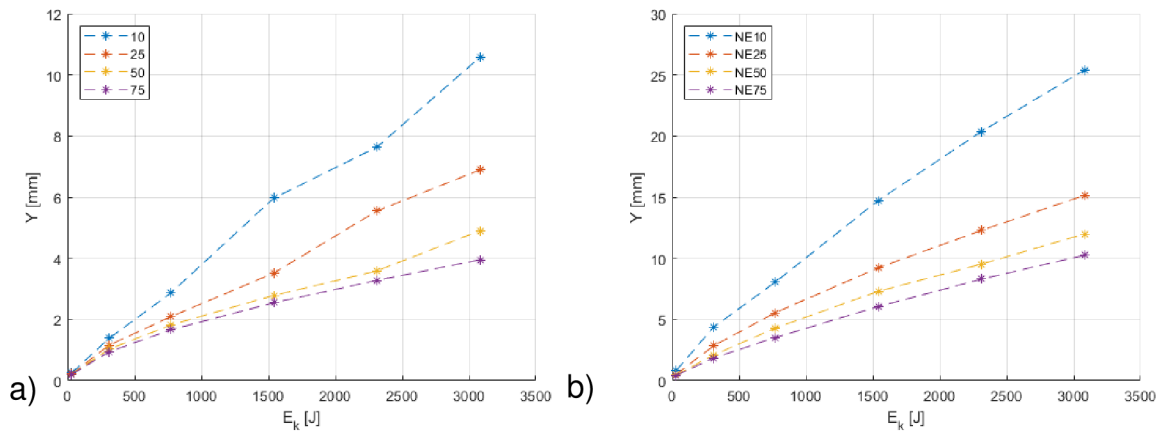
Na obr. 7-8 je vidět maximální hloubka průrazu v závislosti na průměru válečku pro konstantní násobek hmotnosti. Z tohoto lze vyvodit, že s rostoucím průměrem klesá hloubka průrazu. Tento pokles je z důvodu zapojení větší části vnitřní struktury



absorbéru. Tudíž lze absorbovat stejnou energii při menší hloubce průrazu. Z obr. 7-8 je patrná vyšší citlivost na průměr válečku neauxetické varianty vnitřní struktury.

### 7.1.3. Závislost hloubky průrazu na kinetické energii dopadajícího objektu

Z níže uvedených grafů lze odhadnout hloubku průrazu pro daný průměr válečku s danou kinetickou energií.

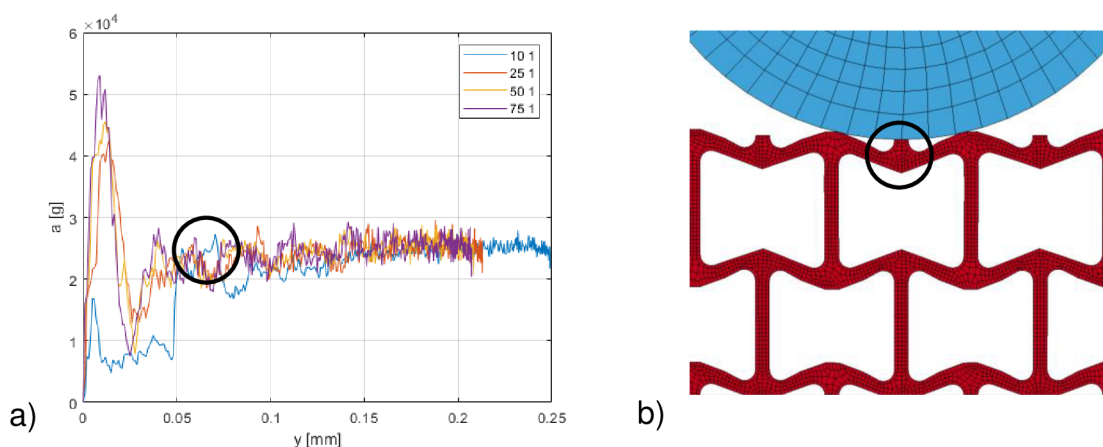


Obr. 7-9 Závislost maximální hloubky průrazu na kinetické energii dopadajícího válečku pro a) auxetickou strukturu b) neauxetickou strukturu

Z uvedeného obr. 7-9 a) je patrná závislost (nejvíce u 10), kde s rostoucí energií prudce roste maximální hloubka průrazu. To znamená, že při vyšší energii průměru 10, absorbér nebyl tak efektivní z hlediska minimalizace hloubky průrazu jako pro nižší hodnoty energií. Ovšem z hlediska minimalizace zrychlení byl nejefektivnějším.

### 7.1.4. Závislost zrychlení na hloubce průrazu dopadajícího objektu

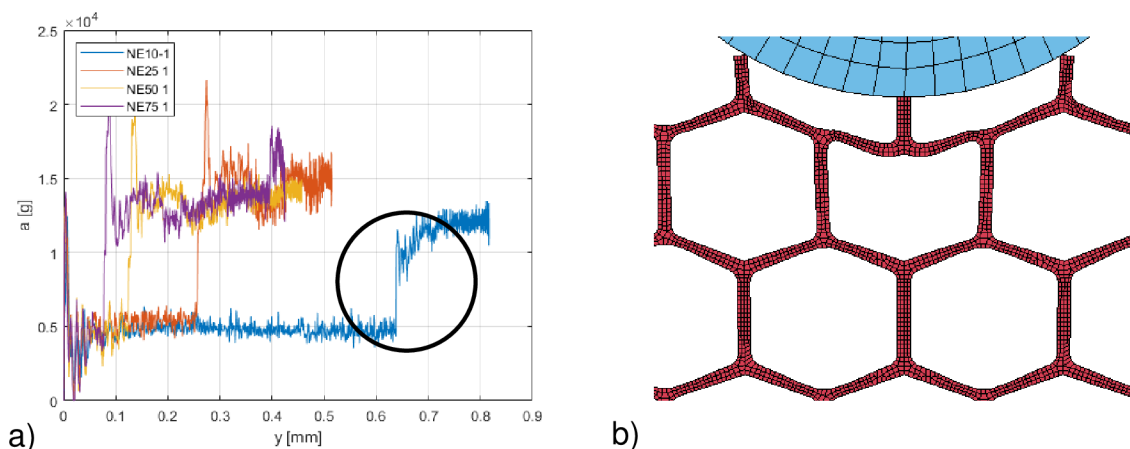
Na této závislosti byla ukázána deformace vnitřní struktury absorbéru.



Obr. 7-10 Závislosti zrychlení na  $E_k$  při konstantním násobku hmotnosti 1 a) auxetické struktury b) vnitřní auxetická struktura při maximálním zrychlení dopadajícího válečku (varianta 10-1)

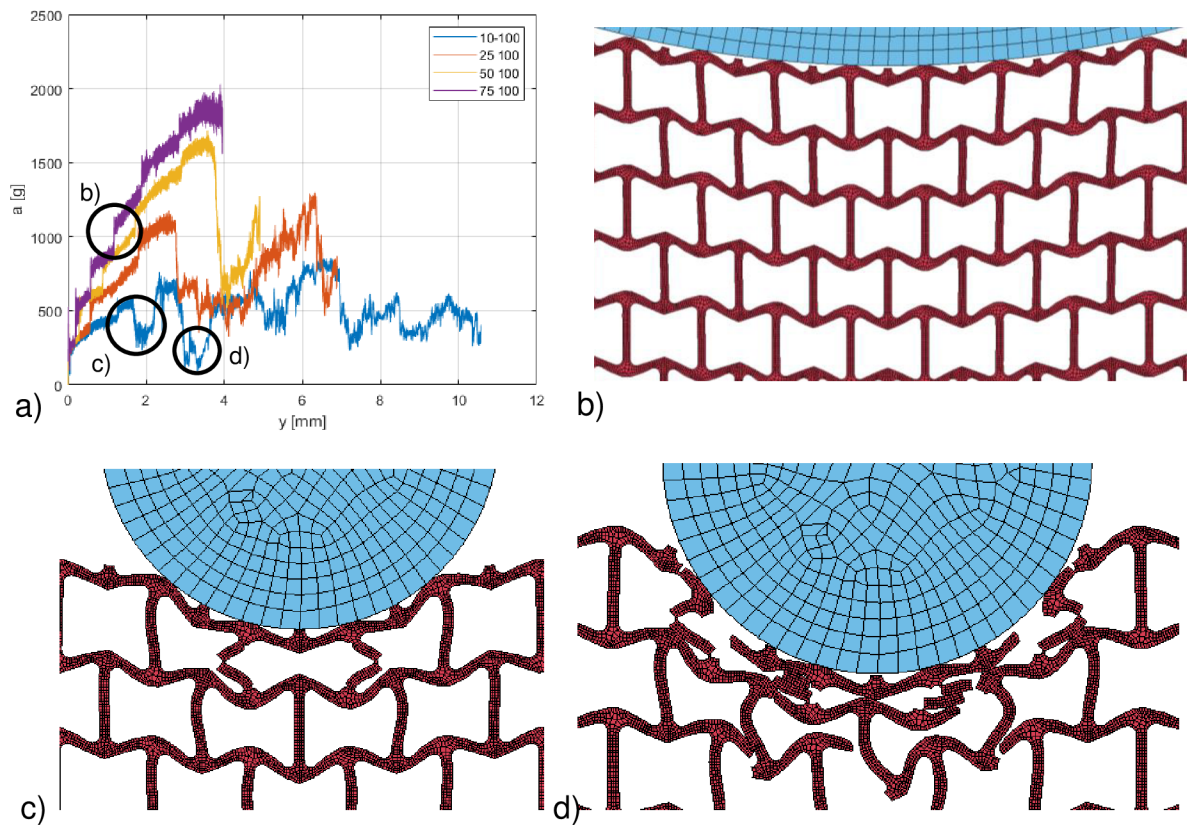
Pouze pro nízké násobky hmotnosti dopadajícího válečku do Auxet (obr. 7-10 a)) lze vidět, že po určité uražené dráze, kdy lze pozorovat maximální zrychlení dopadajícího válečku, se zrychlení ustálí. V levé části grafu se liší průběh zrychlení. Pro variantu s nejmenším válečkem (10-1) je maximum oproti ostatním variantám posunutě (viz černě vyznačená oblast obr. 7-10 a). Na obr. 7-10 b) je vyobrazena dopadová zkouška

v okamžiku nejvyššího zrychlení. U této varianty se absorpce liší z důvodu jiného rozložení kontaktů vnitřní struktury a dopadajícího válečku. Zde je zapojena i prostřední část na základní buňky (viz černě vyznačená oblast obr. 7-10 a).



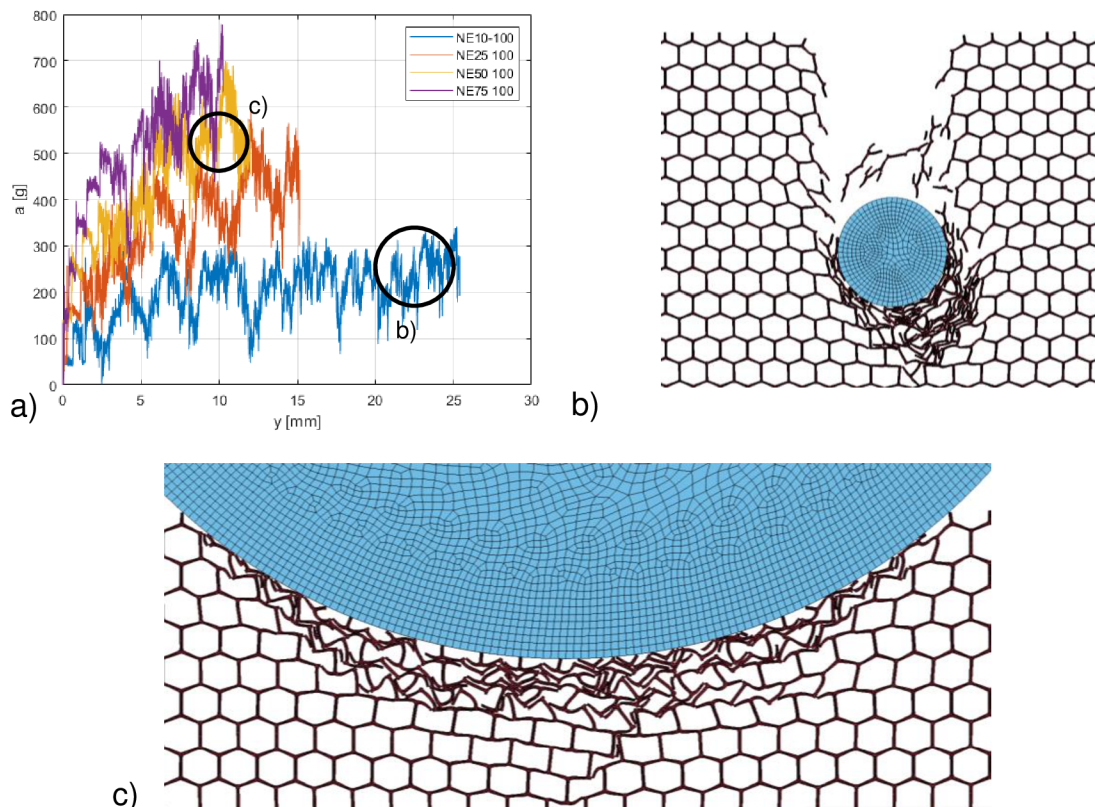
Obr. 7-11 a) Závislosti zrychlení na  $E_k$  při konstantním násobku hmotnosti 1 pro neauxetickou strukturu b) vnitřní neauxetická struktura při maximálním zrychlení dopadajícího válečku (varianta NE10-1)

Oproti závislosti na obr. 7-10 a) nelze z obr. 7-11 a) vyčíst výše zmíněný trend. Důvodem je rozdílná tuhost absorbérů, a především vertikální trámečky povrchové vrstvy vnitřní struktury. Z pravé části grafu je patrná nižší tuhost absorbéru, což ukazuje nižší maximální hodnoty zrychlení. Stlačením prvního vertikálního trámečku povrchové vrstvy vnitřní struktury se absorbuje část energie, proto je poté nižší maximální zrychlení. To je rozdíl oproti Auxet, kde maximální zrychlení vzniká v první fázi dopadu. Na obr. 7-11 b) je zobrazen okamžik, pro variantu NE10-1, kdy dopadající váleček získal nejvyšší zrychlení. Prudký nárůst zrychlení je zapříčiněn zapojením dalších dvou trámečků. Všechny skokové nárůsty na obr. 7-11 a) souvisí se zapojením okolních trámečků stejně jako na obr. 7-11 b). Zapojení při vyšší kinetické energii je zapříčiněno větším průměrem válečku.



Obr. 7-12 a) Závislosti zrychlení na  $E_k$  při konstantním násobku hmotnosti 100 auxetické struktury b) vnitřní auxetická struktura při  $E_k = 2700$  J dopadajícího válečku (varianta 75-100) c) vnitřní auxetická struktura při  $E_k = 2700$  J dopadajícího válečku (varianta 10-100) d) vnitřní auxetická struktura při  $E_k = 2250$  J dopadajícího válečku (varianta 10-100)

U obr. 7-12 je možné vidět zrychlení pro 100 násobek hmotnosti. Z tohoto vyobrazení lze odvodit, že pouze varianta 75-100 zůstala neporušená. Postupný nárůst zrychlení lze přiřadit tomu, že před objektem vzniká tzv. „návalek“, který přispívá k brždění. U varianty 50-100 je patrné, že postupně vzniká „návalek“ a pak lze vidět porušení absorbéru a pokračování v tvorbě „návalku“. Tento trend je také možno pozorovat u menších průměrů.



Obr. 7-13 a) Závislosti zrychlení na  $E_k$  při konstantním násobku hmotnosti 100 neauxetické struktury b) vnitřní neauxetická struktura při  $E_k = 250$  J dopadajícího válečku (varianta 10-100) c) vnitřní neauxetická struktura při  $E_k = 250$  J dopadajícího válečku (varianta 75-100)

Na obr. 7-13 a) je možné vidět, že u Neauxet se struktura porušuje pro všechny průměry dopadajícího válečku a tím vzniká „návalek“, který přispívá k vyššímu brzdnému zrychlení neauxetické struktury. Ze závislosti  $a$  na  $E_k$  je možno vyvodit, že pro Neauxet (která je méně tužší), vzniká nižší zrychlení než u Auxet. Pro vyšší násobky hmotnosti se struktura bortí, tudíž je potřeba absorbér vyšších rozměrů pro pohlcení stejné energie jako u Auxet. Obr. 7-13 b) a c) znázorňuje okamžik, ve kterém je zbývající kinetická energie 250 J. Lze pozorovat, že váleček menšího průměru vytvořil návalek na menší ploše (více poničil vnitřní strukturu absorbéru) než tomu je u většího průměru.

Při řízení tloušťky absorbéru a délky dopadajícího válečku, lze nastavit hloubku dopadu. Jinými slovy, pokud absorbér bude mít větší tloušťku a váleček bude mít stejný průměr, tak se hloubka průrazu zmenší.

## 8. ZÁVĚR

Z výsledného porovnání dvou analyzovaných struktur vyplývá, že pro potřeby maximální možné míry redukce zrychlení dopadajícího objektu je vhodnější neauxetická struktura, která absorbuje energii pomaleji než auxetická. Oproti tomu auxetická struktura je vhodná na využití, kdy nezáleží na maximálním zrychlení, ale na pohlcení vysoké energie na co nejkratší dráze průrazu viz obr. 7-7, kde je vidět rozdíl hloubky průrazu.

Za možnou optimalizaci lze považovat úpravu parametrů vnitřní struktury jako je úhel, který svírají trámečky základní buňky a velikost buňky. Vertikální trámečky povrchové vrstvy vnitřní struktury mají pozitivní vliv na hodnotu maximálního zrychlení. Neauxetický absorbér je vhodný pro absorpci energie při maximální možné míře redukce zrychlení. Naopak při stejné porozitě je pro vyšší rychlosti a energie vhodný auxetický. Změnou porozity je možno absorbér dimenzovat na určitou energii, kterou pojme.

Vhodnou volbou poměru velikosti základní buňky vůči dopadajícímu předmětu lze řídit velikost možné pohlcené energie absorbérem. Tento trend je nejlépe pozorovatelný u hloubky průrazu. Využitím větší plochy absorbéru (dopadající váleček s větším průměrem) je pohlcena na kratší vzdálenosti stejná energie oproti menším průměrům dopadajícího válečku, kdy je energie pohlcována na delší dráze.

Velkou výhodou výroby struktur na 3D tisku je možnost struktury kombinovat. Například na povrchu může být struktura s nízkou porozitou a hlouběji ve struktuře využita struktura s vyšší porozitou. Dále pomocí porozity lze dopadající objekt směřovat na určité místo. Také je možno vyplnit póry například pomocí pěny, která změní vlastnosti absorbéru.

Numerická simulace dopadové zkoušky auxetické i neauxetické vnitřní struktury pro nízké násobky hmotnosti se skládala pouze z jedné části. Při stačení zde vznikla pouze k plastická deformaci, kterou se pohltila kinetická energie dopadajícího válečku. Pro vyšší násobky hmotnosti bylo možné pozorovat stlačení, při kterém došlo k porušení struktury z důvodu překonání meze pevnosti, zborily se buňky vrstvy struktury, které byly v kontaktu s válečkem a vytvořil se návalek, díky kterému se zvýšilo brzdné zrychlení. Pokud absorbér nebyl schopen pohltit zbytek kinetické energie pouze deformací bez porušení vrstvy struktury při stlačení, tak se zborila další vrstva vnitřní struktury absorbéru. Tento děj se opakoval, dokud se váleček nezastavil. Rozdílem u vyšších násobků hmotnosti dopadajícího válečku pro auxetickou a neauxetickou strukturu byla velikost vytvořeného návalku a také jeho tvorba. U auxetické varianty se nejdříve porušily trámečky vertikální vnitřní struktury, naproti tomu u neauxetické varianty se nejdříve porušily horizontální trámečky. Tento rozdíl je zapříčiněn auxeticitou jedné z variant.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] The History of Sandwich Construction and Honeycombs. In: *EconHP Holding* [online]. Halle a. d. Saale: EconHP Holding, 2015 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www.econhp.com/history/>
- [2] OTTO, Jan. *Ottův slovník naučný: První díl. 2. dotisk*. Praha: ARGO, 1888. ISBN 80-7185-058-6.
- [3] PRAWOTO, Yunan. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational materials science* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2012, **58**, 140-153 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0927-0256. Dostupné z: [doi:10.1016/j.commatsci.2012.02.012](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012)
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] FUNG, Y. C. *Foundations of Solid Mechanics*. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1965. ISBN 0133299120.
- [6] EVANS, K., M. NKANSAH, I. HUTCHINSON a S. ROGERS. Molecular network design. *Nature (London)* [online]. LONDON: MACMILLAN MAGAZINES LTD, 1991, **353**(6340), 124-124 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: [doi:10.1038/353124a0](https://doi.org/10.1038/353124a0)
- [7] ZHANG, Jianjun, Guoxing LU a Zhong YOU. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. *Composites. Part B, Engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **201**, 108340 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesb.2020.108340](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108340)
- [8] GREAVES, G. Neville. Poisson's ratio over two centuries: challenging hypotheses. *Notes and records of the Royal Society of London* [online]. LONDON: The Royal Society, 2013, **67**(1), 37-58 [cit. 2022-04-12]. ISSN 0035-9149. Dostupné z: [doi:10.1098/rsnr.2012.0021](https://doi.org/10.1098/rsnr.2012.0021)
- [9] AL-RIFAIE, Hasan a Wojciech SUMELKA. The Development of a New Shock Absorbing Uniaxial Graded Auxetic Damper (UGAD). *Materials* [online]. Switzerland: MDPI AG, 2019, **12**(16), 2573 [cit. 2022-04-16]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma12162573](https://doi.org/10.3390/ma12162573)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Auxet		Auxetická struktura
MKP		Metoda konečných prvků
Neauxet		Neauxetická struktura
$a$	$[g]$	Zrychlení
$a_{max}$	$[g]$	Maximální zrychlení
$a_{avg}$	$[g]$	Průměrné zrychlení
$E$	$[GPa]$	Youngův modul pružnosti
$E_k$	$[J]$	Kinematická energie
$E_T$	$[MPa]$	Tangenciální modul pružnosti
$F$	$[N]$	Síla
$G$	$[GPa]$	Modul pružnosti ve smyku
$K$	$[GPa]$	Objemový modul pružnosti
$m$	$[kg]$	Hmotnost
$P$	$[-]$	Porozita
$Re$	$[MPa]$	Mez kluzu
$Rm$	$[MPa]$	Mez pevnosti
$x_m$	$[-]$	Násobek hmotnosti dopadajícího objektu
$y$	$[mm]$	Hloubka průrazu
$Y$	$[mm]$	Maximální hloubka průrazu
$v$	$[mm \cdot s^{-1}]$	Rychlost
$\alpha$	$[^\circ]$	Úhel svíraný trámečky základní buňky
$\varepsilon$	$[-]$	Přetvoření
$\mu$	$[-]$	Poissonovo číslo
$\nu$	$[-]$	Poissonovo číslo v zahraniční literatuře
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota
$\sigma$	$[MPa]$	Normálové napětí

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Voštinová honeycomb struktura: vlevo neauxetická struktura, vpravo auxetická struktura.....	9
Obr. 4-1 Chování a) neauxetické struktury b) auxetické struktury [7] .....	12
Obr. 4-2 Typy auxetických struktur upraveno z [3].....	13
Obr. 4-3 Ukázka deformace auxetické a neauxetické struktury při vnikání cizích částic [3].....	13
Obr. 5-1 Model geometrie absorbéru a) s auxetickou strukturou a ukázkou diskretizace b) s neauxetickou strukturou a ukázkou diskretizace.....	15
Obr. 5-2 Základní buňka a) auxetické struktury b) neauxetické struktury .....	16
Obr. 5-3 Vrchní dopadová vrstva struktury absorbéru a) neauxetická vnitřní struktura b) auxetická vnitřní struktura.....	17
Obr. 5-4 Okrajové a počáteční podmínky aplikované na model absorbéru.....	18
Obr. 7-1 Závislost rychlosti na čase pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti a) pro auxetickou strukturu, b) pro neauxetickou strukturu.....	20
Obr. 7-2 a) Závislost $E_k$ na čase pro auxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti, b) Závislost hloubky průrazu na čase pro auxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti .....	21
Obr. 7-3 Závislost zrychlení na čase pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti a) pro auxetickou strukturu, b) pro neauxetickou strukturu.....	22
Obr. 7-4 a) Závislost $E_k$ na čase pro neauxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti, b) Závislost hloubky průrazu na čase pro neauxetickou strukturu – pro průměr dopadajícího válce 10 mm o různé hmotnosti .....	22
Obr. 7-5 Závislost $amax$ na násobku hmotnosti a průměru dopadajícího objektu ....	23
Obr. 7-6 Závislost $amax$ na průměru dopadajícího objektu při konstantním násobku hmotnosti a)25 b)100 .....	23
Obr. 7-7 Závislosti hloubky průrazu na násobku hmotnosti dopadajícího válečku pro a) auxetickou vnitřní strukturu b) neauxetickou vnitřní strukturu .....	24
Obr. 7-8 Závislost hloubky průrazu na průměru pro konstantní hmotnost a)1 b) 100	24
Obr. 7-9 Závislost maximální hloubky průrazu na kinetické energii dopadajícího válečku pro a) auxetickou strukturu b) neauxetickou strukturu .....	25
Obr. 7-10 Závislosti zrychlení na $E_k$ při konstantním násobku hmotnosti 1 a) auxetické struktury b) vnitřní auxetická struktura při maximálním zrychlením dopadajícího válečku (varianta 10-1) .....	25
Obr. 7-11a) Závislosti zrychlení na $E_k$ při konstantním násobku hmotnosti 1 pro neauxetickou strukturu b) vnitřní neauxetická struktura při maximálním zrychlením dopadajícího válečku (varianta NE10-1).....	26
Obr. 7-12 a) Závislosti zrychlení na $E_k$ při konstantním násobku hmotnosti 100 auxetické struktury b) vnitřní auxetická struktura při $E_k = 2700 J$ dopadajícího válečku (varianta 75-100) c) vnitřní auxetická struktura při $E_k = 2700 J$ dopadajícího válečku (varianta 10-100) d) vnitřní auxetická struktura při $E_k = 2250 J$ dopadajícího válečku (varianta 10-100) .....	27
Obr. 7-13 a) Závislosti zrychlení na $E_k$ při konstantním násobku hmotnosti 100 neauxetické struktury b) vnitřní neauxetická struktura při $E_k = 250 J$ dopadajícího válečku (varianta 10-100) c) vnitřní neauxetická struktura při $E_k = 250 J$ dopadajícího válečku (varianta 75-100) .....	28



## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Vertikální rozměry základní buňky vnitřní struktury absorberu .....	16
Tab. 2 Vstupní parametry .....	16
Tab. 3 Legenda výsledků .....	20
Tab. 4 Průměrná hodnota zrychlení dopadajícího válečku.....	21