

Univerzita Karlova

Pedagogická fakulta

Katedra biologie a enviromentálních studií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití 3D tisku pro tvorbu vzdělávacích modelů rostlinných pletiv

The Use of 3D Printing for the Creation of Plant Tissue Educational Models

Hynek Nešpor

Vedoucí práce: PhDr. Karel Vojíš, Ph.D.

Studijní program: Biologie, geologie a enviromentalistika se zaměřením na vzdělávání

Odevzdáním této bakalářské práce na téma Využití 3D tisku pro tvorbu vzdělávacích modelů rostlinných pletiv potvrzuji, že jsem ji vypracoval pod vedením vedoucího práce samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Prohlašuji, že jsem při její tvorbě nepoužil nástrojů umělé inteligence jiným způsobem, než je uvedeno ve vyjádření, které je součástí textu práce. Dále potvrzuji, že tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 14. 4. 2025

Tímto bych chtěl poděkovat PhDr. Karlu Vojířovi, Ph.D. za odborné vedení práce, za jeho věcné a cenné rady a ochotu a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat i všem, kteří se podíleli na hodnocení modelů v práci řešených.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou 3D tištěných modelů rostlinných pletiv určených jako didaktické pomůcky pro výuku biologie na gymnáziích. Vychází z potřeby cenově dostupných a názorných modelů, které by mohly nahradit komerčně dostupné pomůcky, jejichž pořizovací cena je často velmi vysoká. Práce stručně shrnuje základní typy rostlinných pletiv a popisuje metodiku jejich převodu do trojrozměrné podoby pomocí softwaru pro 3D modelování. Následně se zaměřuje na proces přípravy a realizace fyzických modelů pomocí 3D tisku. Vytisknuté modely byly v rámci práce analyzovány a jejich design iterativně upravován na základě odborné zpětné vazby v několika po sobě jdoucích generacích. Hlavním cílem a zároveň výstupem bakalářské práce je finální generace 3D modelů rostlinných pletiv posouzená odborníky, která může rozšířit výukové možnosti bez nutnosti vysokých finančních nákladů.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, rostlinná pletiva, výukové modely, učební pomůcky, anatomie rostlin

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the creation of 3D-printed models of plant tissues intended as educational tools for teaching biology at grammar schools. It responds to the need for affordable and visually clear models that could replace commercially available teaching aids, which are often prohibitively expensive. The thesis briefly summarizes the basic types of plant tissues and describes the methodology used to convert them into three-dimensional representations using 3D modeling software. It then concentrates on the process of preparing and manufacturing the physical models through 3D printing. The printed models were analyzed during the course of the work, and their design was iteratively improved based on expert feedback over several development cycles. The main goal and final output of this thesis is the latest generation of plant tissue 3D models, evaluated by professionals, which can expand teaching possibilities without the need for significant financial investment.

KEYWORDS

3D printing, plant tissues, educational models, teaching aids, plant anatomy

Obsah

Úvod	7
1 Modely.....	9
1.1 Modely jakožto vědecké nástroje	9
1.2 Modely jakožto učební pomůcky	11
2 3D tisk.....	14
2.1 Metody 3D tisku.....	14
2.2 Materiály používané při 3D tisku	15
2.3 3D tisk ve výuce	18
3 Rostlinná pletiva.....	21
3.1 Klasifikace rostlinných pletiv.....	21
4 Tvorba a ověření modelů rostlinných pletiv pomocí 3D tisku	26
4.1 Přípravná fáze.....	27
4.1.1 Výběr vhodných struktur rostlinných pletiv	27
4.1.2 Výběr technologie 3D tisku pro přípravu modelů a tiskové parametry s použitými materiály	28
4.1.3 Výběr softwaru pro přípravu modelů	29
4.2 První generace 3D modelů rostlinných pletiv	29
4.2.1 První generace modelu rohového kolenchymu	30
4.2.2 První generace modelu obecné struktury kolenchymatického pletiva	32
4.2.3 První generace modelu aktinenchymu.....	33
4.2.4 Hodnocení modelů první generace.....	35
4.3 Druhá generace 3D modelů rostlinných pletiv	36
4.3.1 První generace modelu sklerenchymatických vláken.....	36
4.3.2 První generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva	38

4.3.3	Druhá generace modelu aktinenchymu	40
4.3.4	Hodnocení modelů druhé generace	42
4.4	Třetí generace 3D modelů rostlinných pletiv	42
4.4.1	Druhá generace modelu sklerenchymatických vláken	42
4.4.2	Druhá generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva	43
4.4.3	Třetí generace modelu aktinenchymu.....	44
4.4.4	Hodnocení modelů třetí generace.....	45
4.5	Čtvrtá generace 3D modelů rostlinných pletiv	45
4.5.1	Třetí generace modelu sklerenchymatických vláken.....	45
4.5.2	Třetí generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva	47
4.5.3	Čtvrtá generace modelu aktinenchymu	48
4.5.4	Hodnocení čtvrté generace modelů	49
	Diskuse a závěr.....	50
	Seznam použitých informačních zdrojů	53
	Seznam obrázků.....	58

Úvod

Didaktické modely jsou nedílnou součástí výuky na středních školách, ať už jde o model lidské kostry na kolečkách v rohu učebny biologie nebo o glóbus na stole učebny zeměpisu. Díky modelům se stává výuka názornější, zábavnější a efektivnější. Některé koncepty jako například atomy, či buňky si lze bez použití nějaké formy modelování jen velmi obtížně představit natož je pochopit. Proto jsou modely oblíbeným nástrojem jak pedagogů tak i žáků. I didaktické modely mají však svá úskalí. Jedním z problémů didaktických modelů je jejich dostupnost. Kvalitní modely se mohou pohybovat v jednotkách tisíců, až desetitisíců korun českých. Na takovou investici v rozpočtu škol občas není místo. Nemluvě o tom, že pro některé okruhy učiva, ve kterých by užívání didaktických modelů mělo smysl, ani kvalitní modely neexistují.

Na druhé straně vah je potom kreativita, snaha a zručnost pedagogů, kteří tyto problémy řeší navrhováním a vyráběním vlastních didaktických modelů, na kterých mohou názorně žákům předvádět výše zmíněné nesnadno představitelné učivo. v tomto směru dokáže velmi často pomoci stále více narůstající popularita „hobby“ 3D tiskáren, které dokáží přinést průmyslovou preciznost výroby modelů za zlomky její ceny. Není tak divu, že tato technologie v posledních letech proniká více a více do školství, kde má bezmála revoluční potenciál zlepšit výuku a mimo jiné rozvíjet i nespočet klíčových kompetencí žáků i pedagogů.

Příkladem struktur, které by modelovat šlo, ale nejsou mohou být rostlinná pletiva. Existující modely rostlinných pletiv jsou velmi abstraktní a když jsou rostlinná pletiva někde zobrazována, tak pouze v ploše a ne v prostoru. Snímky rostlinných pletiv jsou názorné, ale opět je zobrazují pouze v ploše.

Cílem této práce je popsat co to modely jsou, jak jsou využívány ve vědě, a jak jsou využívány ve školství. Dalším cílem této práce je uvést čtenáře do problematiky technologie 3D tisku a možnosti jeho využití. Třetím cílem je popsat rostlinná pletiva, která lze digitálně modelovat a představit je tak interaktivně v hodinách biologie. a nakonec hlavním cílem této práce je přispět k řešení výše zmíněného problému nedostatku didaktických modelů, konkrétně modelů struktur rostlinných pletiv. Jinými slovy vytvořit digitální cenově dostupné 3D modely rostlinných pletiv vytisknutelné na 3D tiskárně, které budou ukazovat

vztah jejich vnitřního obsahu mezibuněčných prostor a buněčných stěn, a které budou využitelné ve výuce anatomie rostlin na gymnáziích.

1 Modely

Pohled na to co jsou to modely je v akademické sféře zdrojem jisté nejednotnosti. Frigg a Hartmann (2024) uvádějí jako příklad řadu autorů, kteří vyjadřují pochybnosti o smyslu této otázky. Podle těchto autorů modely netvoří vlastní ontologickou kategorii a modelem může být vlastně cokoli. Dále však také uvádějí protiargument, který tento názor napadá. i když z ontologického hlediska může být modelem jakýkoli objekt a modely tvoří nesourodou skupinu různých entit, neznámá to, že by nebylo možné nebo smysluplné rozvíjet jejich klasifikaci (Frigg & Hartmann, 2024). Tato kapitola se bude zabývat tím, jakou roli sehrávají modely jak ve vědě samotné, tak i ve výuce vědy.

1.1 Modely jakožto vědecké nástroje

Vědecké modely můžeme klasifikovat hned několika způsoby. Například výše zmiňovaný Frigg a Hartmann (2024) je klasifikují následovně:

- **Fyzické objekty** – dá se zaměnit s pojmem „materiální modely.“
- **Fiktivní a abstraktní objekty** – například Bohrov model atomu, modely populací nebo ideální plyn.
- **Množinové struktury** – matematické struktury, které lze popsat pomocí teorie množin.
- **Popisy a rovnice** – slovní, či matematický popis určitého systému.

Schwarz a Gwekwerere (2007) popisují vědecký model jako reprezentaci určité části vědecké teorie, která zahrnuje soubor pravidel, schémat nebo myšlenkových struktur, které umožňují vysvětlovat a předpovídat různé jevy. Podobně model popisuje i Maňák (2007), který říká, že model je jakýmsi spojovacím článkem mezi realitou, hypotézou a teorií, který sjednocuje jejich specifické vazby k realitě v artefakt, který sledovaný jev postihuje v jednoznačných a jednodušších konturách, ale na druhé straně zřetelněji a výrazněji.

Vědecký model je jednoduše abstraktní soubor myšlenek, který popisuje nějaký jev. Užitečnost modelů tkví v tom, že je můžeme použít k vysvětlení a předvídání těchto jevů. Například jednoduchý model dominance může předpovědět jaký fenotyp bude mít

potomstvo dominantního homozygota. Modely rovněž slouží jako vodítko pro budoucí výzkum, neboť ovlivňují otázky, které si vědci kladou. Raní genetici například věřili, že genotypy určují pouze jasně oddělené fenotypy, což je vedlo k zaměření se na konkrétní dědičné znaky. Jakmile však narazili na složitější principy dědičnosti, byli nuceni upravit existující modely tak, aby lépe odpovídaly realitě. Tyto změny vedly nejen k novým teoriím o dědičnosti, ale i k novým výzkumným směrům (Cartier et al., 2001).

Z toho můžeme vyvodit, že jednou z nejdůležitějších funkcí vědeckých modelů je vysvětlovat, a to se neobejde bez určité míry idealizace, zabstraktnění nebo beletrizace námi modelovaného jevu. Model pak tedy v určitých ohledech neodpovídá realitě, což nás může až odrazovat od jeho používání (Bokulich, 2011).

Wimsatt (1987) však uvádí hned několik důvodů jak mohou chybné modely připívat vědeckému poznání:

- pomáhají identifikovat a odhadovat další relevantní proměnné
- pomáhají odpovídat na otázky o realističtějších modelech
- vedou ke vzniku nových modelů a k formulování nových otázek.
- mohou pomoci určit účinnost různých sil (např. evolučních procesů), i když aktuálně nepůsobí v daném systému.

Dále také Wimsatt (1987) uvádí způsoby, jakými mohou být modely chybné. Chyby jsou hrubě seřazeny podle stoupající míry závažnosti:

- Model platí jen v omezeném rozsahu nebo za určitých podmínek.
- Model je idealizací, která v přírodě nikdy přesně neexistuje, ale může přibližně odpovídat některým jevům.
- Model je neúplný, vynechává důležité proměnné.
- Neúplnost modelu zkresluje interakce mezi zahrnutými proměnnými, což vede k falešným korelacím nebo skrytí existujících vazeb.
- Model zcela chybně popisuje realitu – nejen že vztahy mezi jednotlivými prvky jsou chybné, ale některé prvky vůbec neexistují.

- Model je čistě fenomenologický – jeho účelem je pouze popsat a předvídat jevy, aniž by tvrdil, že zahrnuté proměnné skutečně existují.
- Model selhává v popisu či predikci dat, což může nastat v kombinaci s výše zmíněnými chybami nebo jako chyba sama o sobě (Wimsatt, 1987).

1.2 Modely jakožto učební pomůcky

Rambousek (2014) definuje učební pomůcky jako takové didaktické prostředky, které k účinnějšímu dosahování cílů výuky přispívají svými didaktickými funkcemi. Dále uvádí, že nejvýznamnější charakteristikou učebních pomůcek a zároveň nejvýznamnějším rozdílem oproti ostatním materiálním didaktickým prostředkům je jejich bezprostřední a přímý vztah k obsahu dané výuky. Dále však uvádí, že tento vztah nevzniká automaticky, ale až tehdy, když je vhodně zakomponován do výukového procesu. v tomto případě učitel, výukový systém nebo do určité míry i samotná pomůcka usměrňuje vnímání a činnost žáků požadovaným směrem (Rambousek, 2014).

Rambousek (2014) ještě uvádí, že z pohledu teorie informace je učební pomůcka souborem signálů, které předávají žákům zprávy obsahující učivo. Tvůrce pomůcky do nich cíleně vkládá informace, aby ovlivnil žákovo rozhodování o tom, co vnímat, tedy informace obsahové, které souvisí s věcnou náplní učiva, a jak s těmito informacemi pracovat, tedy informace interpretační, které usměrňují žáky v tom, které obsahové informace mají sledovat a v jakém pořadí a jak je zpracovat. Tyto informace mohou být žákům předávány společně nebo odděleně. Pomůcka může obsahovat jak obsahové, tak interpretační informace, nebo pouze obsahové, přičemž interpretační doplňuje učitel při demonstraci. Nejčastěji se však využívá kombinace obou přístupů (Rambousek, 2014).

Geschwinder (1987) člení učební pomůcky do následujících kategorií:

- **původní předměty a reálné skutečnosti** – výrobky a výtvořky (produkty, přístroje a nástroje, zařízení, umělecká díla), vzorky materiálů, přírodniny (živé rostliny a živočichové, horniny, herbáře, vycpaniny, preparáty), jevy a děje,
- **modely** – zobrazující předmět, zobrazující princip, statické modely, dynamické modely, symbolické modely,

- **vizuální pomůcky** – fotografie, nástěnný obraz, kresba na tabuli, mapa, fólie pro zpětný projektor, obraz promítaný prostřednictvím dataprojektoru, diapozitiv,
- **auditivní pomůcky** – hudební záznamy (ukázky zpěvu, záznamy hudebních nástrojů, koncerty aj.), zvukové záznamy přírodních jevů, mluvené nahrávky (poslechová cvičení, diktáty, vyprávění), záznamy zvukových projevů zvířat, rozhlasové vysílání,
- **audio-vizuální pomůcky** – televizní pořady, výukové filmy,
- **literární pomůcky** – učebnice, pracovní sešity a listy, odborná literatura, periodika,
- **počítačové programy a internet** – multimediální, simulační, testovací a výukové programy, služby Internetu (především WWW a e-mail),
- **speciální pomůcky** – soupravy pro experimenty, trenažéry (Geschwinder, 1987).

Wilson et al. (2020) uvádí, že modelování v předmětech jako je biologie představuje efektivní výukový nástroj, který podporuje porozumění složitým systémům. Umožňuje studentům nejen strukturovat a vizualizovat poznatky, ale také propojovat zdánlivě spolu nesouvisející koncepty, což vede k hlubšímu porozumění. Kromě obsahu biologie modelování rozvíjí dovednosti systémového myšlení, zejména schopnost analyzovat a popisovat systémy, jejich hranice, prvky a vzájemné vztahy. Dále uvádí, že modelování lze využít jako nástroj formativního i sumativního hodnocení. Studenti mohou analyzovat existující modely nebo vytvářet vlastní, čímž prokazují nejen pochopení učiva, ale i schopnost aplikovat modelovací dovednosti. Tento přístup podporuje inkluzivitu výuky, umožňuje studentům vyjadřovat myšlenky různými způsoby a usnadňuje učitelům identifikaci problematických oblastí ve studentově chápání. Modelování tak přispívá k efektivnějšímu učení a hlubšímu porozumění biologickým konceptům (Wilson et al., 2020).

Z výsledků výzkumu Marka (2013), který zkoumal přínos molekulárních modelů ve výuce chemie vyplývá, že molekulární modely významně přispívají k pochopení a osvojení si středoškolské organické chemie. Analýza však dále uvádí, že míra přínosu souvisí s charakterem úloh na které mají studenti po výuce s využitím modelů odpovídat. K využití

modelů ve výuce je tedy nutné přistupovat kriticky, protože ne vždy vede k očekávaným výsledkům. i přesto by měly být pevnou součástí výuky chemie na všech úrovních vzdělávání (Marek, 2013).

Další práce ověřující, zda 3D modely reliéfu mohou pomoci odstranit miskoncepce žáků při interpretaci výškopisu na topografických mapách, ukázala zlepšení úspěšnosti i jistoty odpovědí mezi pre-testem a post-testem. Autor ale dále uvádí, že analýza neumožnila jednoznačně potvrdit vliv 3D modelů na odstranění miskonceptů, protože výsledky ovlivňovalo mnoho dalších faktorů. Vyzdvihuje však, že práce s modely má pozitivní vliv na výuku a jejich další zkoumání je důležité (Mokruša, 2023).

Výsledky práce Liskové a Cheunga (2024), kteří zkoumali jaký vliv na kognitivní integraci studentů masérství má použití 3D vytištěných modelů lidské lopatky během trénování palpce ramene ukazují, že použití těchto modelů umožnilo studentům lépe si vizualizovat jednotlivé útvary na modelované kosti. Výuka s modely, která studenty nutila kosti orientovat a otáčet, má na kognitivní integraci pozitivnější vliv než pouhé sledování ortogonálních nákresů v učebnicích. Ze studie dále vyplývá, že použití modelů zvyšuje interakce jak mezi studenty a instruktorem, tak mezi samotnými studenty, kteří si na modelech kostí ukazovali jednotlivé útvary navzájem (Lisk & Cheung, 2024).

2 3D tisk

3D tisk je automatizovaný proces, při kterém se z digitální předlohy (3D modelu) vytváří fyzický model. Materiál je v tenkých vrstvách opakovaně nanášen na tiskovou plochu, dokud fyzický model nevznikne. 3D tisk je tedy procesem aditivním (Stříteský et al., 2020).

2.1 Metody 3D tisku

To, jakým způsobem je materiál postupně na tiskovou plochu nanášen je jedním z klíčových faktorů pro vlastnosti vytištěného 3D modelu. Podle Horvatha (2014) můžeme definovat tři hlavní metody 3D tisku, a to metodu **selektivního vázání**, metodu **selektivního tuhnutí** a metodu **selektivní depozice**.

První metodou je metoda **selektivního vázání** (selective binding), během níž dochází k vytvoření fyzického modelu z jemného prášku působením tepla nebo pojiva, kterým se prachové částice sloučí dohromady. Příkladem této metody je SLS tisk (selective laser sintering – selektivní spékání laserem), kde kontrolovaný laserový paprsek postupně spéká jednu vrstvu prášku na předchozí, přičemž první vrstva je nanášena přímo na tiskovou plochu. Přebytečný prášek slouží jako podpora modelu, tudíž je tímto způsobem možné tisknout modely s komplexní geometrií. Nevýhodou tiskáren využívajících tuto metodu je složitá manipulace s tisknutými prášky. Nepoužitý materiál se však dá použít během budoucího tisku. Další nevýhodou těchto tiskáren je jejich vysoká cena (Horvath, 2014).

Druhou metodou je metoda **selektivního tuhnutí** (selective solidification), během níž dochází k tuhnutí specifických částí kapalného materiálu v nádobě. Příkladem této metody je SLA tisk (stereolithography – stereolitografie), kde dochází k ozařování kapalného fotosenzitivního polymeru UV světlem. Pod UV zářením dochází v polymeru k chemické reakci během které ztvrdne a vytvoří se tak pevná vrstva materiálu, na které je následně ozářena další vrstva (Horvath, 2014). Na rozdíl od ostatních tiskáren je při této metodě častější, že se model tiskne na spodní straně podložky, která se z nádoby s kapalným fotosenzitivním polymerem postupně vytahuje směrem vzhůru. Výhodou SLA tiskáren je tloušťka jednotlivých vrstev materiálu, které jsou schopny dosáhnout. Ta se jak u SLS, tak u SLA metod pohybuje v rozmezí 1–100 μm (Coasey, 2021). To ve značné míře ovlivňuje

hladkost povrchu vzniklého modelu a jeho mechanické vlastnosti. Na druhou stranu nevýhodou těchto tiskáren je takzvaný postprocessing. Tím, že se model vytiskne naše práce nekončí. Na jeho povrchu zůstává vrstva nezatuhnutého fotosenzitivního polymeru, který je nutné nechat zatuhnout pod zdrojem UV světla. Další nevýhodou je, že výpary z tekutých polymerů používaných při SLA tisku jsou toxické (Stříteský et al., 2020).

Třetí metodou je metoda **selektivní depozice** (selective deposition), během níž dochází k pokládání roztaveného materiálu ve vrstvách do předem určeného místa. Vrstvy se opět i jako u předchozích metod skládají postupně na sebe, dokud nevznikne požadovaný model (Horvath, 2014). Příkladem této metody je FDM tisk (fused deposition modeling – tento termín se nepřekládá), nebo jeho synonymum FFF tisk (fused filament fabrication – také se nepřekládá). Při této metodě je materiál v podobě tiskové struny vytlačován pohyblivou tiskovou hlavou 3D tiskárny na tiskovou plochu skrz rozehrátou trysku. Rozehrátá tryska materiál roztaví a „vytiskne“ na předem určené místo, kde opět ztuhne. Tiskárny využívající tuto metodu tisku jsou cenově nejdostupnější a tím pádem i nejrozšířenější. Levné modely těchto 3D tiskáren lze pořídit již od 2500 Kč (Stříteský et al., 2020). Nevýhodou od výše zmíněných SLS a SLA metod je nehladký povrch, na kterém jsou pouhým okem rozeznatelné jednotlivé tištěné vrstvy. Jejich tloušťka se pohybuje v rozmezí od 0,05 – 0,3 mm nejběžněji potom 0,2 mm na vrstvu. Výhodou FDM tiskáren je materiál v podobě tiskové struny kterému se budeme podrobněji věnovat v kapitole 3.2. Oproti tekutým či práškovým materiálům se mnohonásobně snadněji skladuje a lze s ním mnohem snáze manipulovat. K rozsáhlé popularitě FDM tiskáren také napomáhá relativně nízká náročnost jejich obsluhy (Stříteský et al., 2020).

2.2 Materiály používané při 3D tisku

Jak uvádí Stříteský et al. (2020) pro výběr vhodného materiálu je zásadní vzít v potaz co od vytištěného modelu očekáváme, a jaké možnosti nám nabízí naše tiskárna. v zájmu přehlednosti jsou zmiňované kategorie materiálů seřazeny podle pořadí metod, které byly popsány v předešlé podkapitole podle Horvatha (2014).

První kategorií je materiál **ve formě jemného prášku**, který používají SLS tiskárny. Pomocí těchto tiskáren můžeme tisknout tyto materiály:

polymery, jež mohou být semi-krystalinní nebo amorfnní a liší se od sebe v tepelných vlastnostech (Ajoku et al., 2006). Na trhu nepoužívanějším práškovým polymerem pro SLS tiskárny je polyamid 12 (PA12), neboli nylon 12, který má dobré mechanické vlastnosti. Další práškové polymery používané při SLS tisku jsou například polystyren (PS), polypropylen (PP), termoplastický elastomer (TPE) nebo polyether ether keton (PEEK) (Schmidt et al., 2019). Pomocí SLS tisku se však dají tisknout i přírodní – celulóza, či biologicky rozložitelné – polykaprolakton (PCL) polymery (Shirazi et al., 2015).

keramické materiály, které jsou problémovější než polymery. Přímým spékáním se totiž v keramických 3D modelech mohou vytvářet praskliny díky tepelnému namáhání materiálu. Řešením tohoto problému může být aplikování energie pomocí laseru na již přehřátý keramický prášek na tiskové ploše, což zapříčiní roztavení materiálu a předejde tak vzniku prasklin (Shirazi et al., 2015). v tomto případě se ale spíše jedná o tavení a ne spékání. Druhým řešením tohoto problému je použít namísto suchého prášku keramickou kaši (slurry) a navýšit tak hustotu materiálu v jedné vrstvě (Günster & Zocca, 2018). Keramické materiály se používají například v tkáňovém inženýrství, konkrétně kalciumsilikáty (CS), hydroxyapatit (HA), (Shirazi et al., 2015).

kovy, jež jsou velmi oblíbeným materiálem pro výrobu pevných součástí se složitou geometrií, prototypů, či různých forem v lékařském, leteckém, zbrojním a strojírenském průmyslu. Kovy používané v SLS tiskárnách jsou např. nerezová ocel, bronz, nebo zinek (Gadagi & Lekurwale, 2020). Dalšími materiály pro specifitější použití např. jako náhrady kostí a zubní protézy mohou být titan, tantal, kobalt-chrom nebo nitinol (Shirazi et al., 2015).

kompozitní materiály, které jsou kombinací polymerů a keramických materiálu a nabízejí to nejlepší z obou světů. Polymery jsou elastické, ale mají nízkou tuhost, zatímco keramické materiály jsou tuhé, ale křehké. Jejich kombinací můžeme značně vylepšit jejich mechanické vlastnosti a tyto problémy překonat (Shirazi et al., 2015). S kompozitními materiály se můžeme setkat v tkáňovém inženýrství, ve kterém lze, například pomocí směsi hydroxyapatitu (HA) a polykaprolaktonu (PCL), tisknout tkáňové nosiče, které slouží jako umělá náhražka extracelulární matrix, která je nezbytná pro uchycení buněk (Wiria et al., 2007).

Druhou kategorií je materiál v **kapalném skupenství**, který používají SLA tiskárny. Pomocí těchto tiskáren můžeme tisknout tyto materiály:

fotosenzitivní polymery, což jsou tekuté směsi organických monomerů, reakčních iniciátorů a aditiv, které upravují jejich vlastnosti. Přesná složení komerčně dostupných fotosenzitivních polymerů a jejich aditiv jsou zpravidla vlastnictvím jejich výrobců a jsou chráněna patenty. Častými monomery jsou však např. methakryláty, pryskyřice na bázi urethanových akrylátů a bisfenol A-diglycidiletheru (DGEBA), či pryskyřice alifatických alkoholů. Jako aditiva se do komerčních fotosenzitivních polymerů přidávají stabilizátory, ředidla, radikálové inhibitory a světelné absorbenty (Bagheri & Jin, 2019).

kompozitní materiály, kterými jsou např. keramické materiály dispergované ve vhodném fotosenzitivním polymeru. Proces tvrdnutí těchto materiálů je složitý a má několik kroků. v prvním kroku se odpaří voda a další nízkomolekulární složky, v druhém kroku, prováděném při teplotě typicky mezi 400 a 500 °C, se spálí organická část suspenze. v posledním kroku se vzniklá keramická součástka spéká při teplotách vyšších než 1000 °C v závislosti na použitém keramickém materiálu. Teplota a rychlost ohřevu mohou být použity k řízení míry poréznosti výsledného výrobku (Ligon et al., 2017).

Třetí kategorií jsou materiály v **podobě tiskové struny**, který používají FDM tiskárny. Vzhledem k oblibě a relevanci FDM tiskáren pro tuto práci se materiálům jimi používanými budeme věnovat nejpodrobněji. Tisková struna, neboli filament, je tvořena tavitelným polymerem, má standardizovanou šířku 1,75 mm a je namotána na kotouči, ze kterého si ji tiskárna při tisku postupně odmotává. Výběr konkrétního polymeru závisí na těchto požadavcích:

- **Náročnost tisku** – určuje jak složité je materiál tisknout.
- **Vzhled povrchu** – určuje jak vypadá povrch vytisknutého výrobku.
- **Přilnavost vrstev** – určuje jak moc jednotlivé vrstvy drží u sebe
- **Recyklovatelnost** – určuje recyklovatelnost a obnovitelnost materiálu
- **Mechanické vlastnosti** – určuje pevnost v tahu, tlaku, odolnost vůči nárazům, apod.
- **Odolnost proti chemickým a fyzikálním vlivům** – určuje odolnost vůči teplotě, UV záření, otěru a vnějším vlivům

Aby bylo možné zvolit materiál pro daný výrobek vhodně, je důležité zohlednit všechny jeho vlastnosti (Antel, 2020).

Nejčastěji používané materiály pro FDM 3D tisk:

ABS (akrylonitrilbutadienstyren)

ABS je amorfní termoplastický polymer vyráběný z ropy. Není biologicky odbouratelný a je nutné ho tisknout při vysoké teplotě. ABS je v průmyslu hojně užíván díky své odolnosti proti nárazům, pevnosti a chemické stabilitě. Jeho nevýhodou je jeho lehká toxicita (Fico et al., 2022).

PLA (polylaktid)

PLA je další termoplastický polymer, běžně používaný v FDM 3D tisku. Vyrábí se z fermentovaných rostlinných škrobů. Je tím pádem biologicky odbouratelný a biokompatibilní. Tiskne se snadněji a při nižší teplotě než ABS. Jeho největší nevýhodou je citlivost na vysoké teploty. PLA je také hygroskopický, takže je nutné jej uchovávat v suchu (Fico et al., 2022).

PETG (polyethylentereftalátglykol)

PETG je termoplastický polymer odvozený od polyethylentereftalátu (PET). Oproti ABS a PLA je pevnější, pružnější a měkčí. Tento materiál je hojně užíván v implantátech a potravinových obalech (Fico et al., 2022). PETG může být dále obohacen o karbonová vlákna, která ještě dále zvyšují jeho tuhost a odolnost vůči nárazům. Takto vzniklý materiál je ovšem náročnější na tisk a označuje se jako PETG/CF (Valvez et al., 2022).

2.3 3D tisk ve výuce

Důkazem o snahu integrovat 3D tisk do výuky v České republice je např. metodika od Dosedly et al. (2022). Ten uvádí, že využití 3D technologií ve vzdělávání skýtá značný didaktický potenciál, který dosud není plně využíván. Jejich začlenění do výuky na základních a středních školách může přispět k tvorbě nových typů výukových pomůcek a zároveň zlepšit dostupnost modelů pro studenty. Ti s nimi mohou nejen pracovat během vyučování, ale díky metodickým materiálům se mohou také aktivně zapojit do jejich tvorby. Přístup k výukovým modelům může být pro školy finančně či technicky náročný, avšak

jejich použití přináší řadu výhod. Mezi ty patří například možnost prostorové vizualizace složitých struktur, které jsou běžným pozorováním obtížně zachytitelné, nebo zobrazení přírodnin, které jsou jiným způsobem obtížné nebo dokonce nemožné sehnat (Dosedla et al., 2022).

Využití 3D tisku ve výuce je tedy zdánlivě velmi atraktivní. Knobloch (2020) uvádí, že jeho výhodami jsou zejména jeho názornost a adaptovatelnost modelů pro specifické potřeby učitelů a žáků. Dále zmiňuje, podobně jako výše Dosedla et al. (2022), že kromě samotných 3D modelů je možné žákům předat i kompetence pro obsluhu 3D tiskáren a vytváření vlastních 3D modelů, které jsou využitelné v mnoha dalších oborech. Jako nevýhody zmiňuje časovou náročnost přípravy jak modelů 3D tiskárnou, tak modelů v modelovacích softwarech, tento problém však lze částečně vyřešit stahováním již existujících modelů z myriády knihoven nacházejících se na internetu. Další nevýhodou je téměř neexistující zakotvení 3D tisku do RVP, kde se můžeme odkázat na 3D modely, modelování, či názornost apod. Zmíněno je také skladování samotné 3D tiskárny a materiálů potřebných k tisku, které může pro školu a pro výuku představovat další překážku (Knobloch, 2020).

Ze studie od Othmana et al. (2023) provedené ve Spojených arabských emirátech vyplývá, že použití 3D tisku ve výuce má pozitivní vliv na motivaci žáků a na jejich postoj k STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics – Přírodní vědy, Technologie, Technika a Matematika¹) kariérám, protože jim pomáhá porozumět aplikacím technologií v reálném světě. Také však vyzdvihuje časovou náročnost a navíc nedostatek dovedností a zkušeností učitelů s 3D tiskárnami a 3D modelovacími programy pro efektivní integraci do kurikula (Othman et al., 2023).

Tento nedostatek zkušeností potvrzuje i studie Assanteho et al. (2020), která říká, že 3D tisk představuje zásadní inovaci v různých odvětvích, včetně vzdělávání. Pro jeho úspěšné začlenění do výuky je však nezbytné, aby učitelé a lektori získali specifické dovednosti umožňující samostatnou práci s 3D tiskárnami a s nimi souvisejícími nástroji. Tyto kompetence zahrnují nejen technické znalosti, ale také kreativitu a schopnost flexibilně

¹ Překlad pojmu STEM byl použit z webu jeduedu.cz dostupné z <https://www.jeduedu.cz/co-je-stem/>.

přístupovat k novým výukovým metodám. Studie také uvádí, že dalším limitujícím faktorem je i přes stálý klesající trend cena 3D tiskáren (Assante et al., 2020).

K velmi podobným výsledkům dospívá i analýza 280 článků z roku 2018, ve které se dočteme, že technologie 3D tisku je nejrozšířenější v univerzitním prostředí a to zejména v rámci inženýrských a designérských kurzů. 3D tisk se však stále více integruje i do ostatních, již výše zmiňovaných, STEM oborů. Do non-STEM oborů se však 3D tisk integruje pomaleji a navzdory svému potenciálu se na základních a středních školách vyskytuje spíše v podobě univerzitních terénních programů a do značné míry závisí na zkušenostech a nadšení jednotlivých pedagogů. Analýza opět vyzdvihuje, že jednou z hlavních překážek širší implementace 3D tisku do kurikula je nedostatek strukturovaného školení a podpory pro pedagogy. Vyzdvihuje také potřebu rozšíření knihoven digitálních 3D modelů, které jsou použitelné pro výuku a jsou v souladu s danými osnovami. Analýza dále zdůrazňuje potřebu vývoje standardizovaných metod pro hodnocení dopadu 3D tisku na učení. Zatímco počáteční výzkum naznačuje, že 3D tisk může zvýšit zapojení studentů a zlepšit porozumění v různých předmětech, většina existujících důkazů je založena na malých studiích nebo individuálních hodnoceních kurzů. Pro kvantifikaci přínosů 3D tisku pro vzdělávání a stanovení osvědčených postupů pro jeho integraci do výuky je zapotřebí širší a systematictější výzkum (Ford & Minshall, 2019).

3 Rostlinná pletiva

Všechny rostlinné buňky lze zařadit do jedné ze tří základních kategorií: parenchym, kolenchym nebo sklerenchym, bez ohledu na to, z jakého orgánu nebo pletiva pocházejí. Rostlinné tělo se potom skládá ze čtyř hlavních orgánů: kořene, stonku, listů a květů a plodů, které se dále skládají z pletiv. Pletiva jsou soubory buněk podobného původu a stavby, které plní specifické funkce. Dělíme je na jednoduchá (obsahující pouze jeden typ buněk), jako je aerenchym nebo chlorenchym, a složená (obsahující dva nebo více typů buněk), například xylém nebo floém. Orgán, například list, se skládá z několika druhů pletiv – epidermis, mezofylu (chlorenchymu) a cévního svazku – přičemž každé z nich může obsahovat až tři základní typy buněk: parenchymatické, sklerenchymatické nebo kolenchymatické. Tyto buněčné typy můžeme dále rozdělit podle jejich konkrétní funkce (Crang et al., 2018).

3.1 Klasifikace rostlinných pletiv

Podle Votrubové (2010) klasifikujeme rostlinná pletiva podle různých kritérií. Důležitým kritériem je však stav vývoje daného pletiva. Podle něho můžeme rozlišovat pletiva dělivá (meristémá) a pletiva trvalá (definitivní). Dělivá pletiva jsou charakteristická schopností neustále produkovat nové buňky, pletiva i orgány, což umožňuje rostlinám pokračovat v růstu a vývoji i v dospělosti. Trvalá pletiva vznikají z buněk meristémů a lze je klasifikovat podle jejich funkce na krycí, vodivá a základní pletiva. Tyto tři typy jsou zastoupeny ve všech rostlinných orgánech a tvoří propojené pletivové systémy. Krycí pletiva pokrývají povrch rostliny, poskytují ochranu a umožňují interakci s prostředím. Vodivá pletiva zajišťují transport látek mezi jednotlivými částmi rostliny a propojují všechny její orgány. Mezi těmito dvěma typy se nachází základní pletiva, která mají rozmanité funkce, včetně fotosyntézy, mechanické podpory a zásobování živinami. Toto základní členění pletiv, navržené Juliem von Sachsem v roce 1875, se navzdory složitějším moderním klasifikacím stále používá pro svou přehlednost. Pro popis stavby rostlinných těl je dále užitečné členění na pletiva jednoduchá, která jsou tvořena jen jedním typem buněk a pletiva složená, která jsou tvořena nejméně dvěma typy buněk. (Votrubová, 2010).

Jednoduchá pletiva jsou tedy tvořena jedním typem buněk, můžeme je však dále rozlišovat podle tvaru těchto buněk a charakterem jejich buněčné stěny. Konkrétně potom na parenchym, kolenchym a sklerenchym (Lhotský, 1962).

Parenchym

Parenchym představuje nejrozšířenější složku základních pletiv. Typická bylina je z něj tvořena přibližně z 90 %. Buňky tohoto pletiva mají tenké buněčné stěny a po celou dobu své existence si uchovávají živý protoplast, což jim umožňuje značnou přizpůsobivost. Jedná se o nejméně specializované buňky v rámci trvalých pletiv, a proto zastávají rozmanité funkce. Jejich tvar se může lišit – často jsou izodiametrické, tedy přibližně stejně velké ve všech směrech, nebo protáhlé, přičemž mohou mít i složitější tvary (Crang et al., 2018).

Typickým znakem parenchymu je přítomnost mezibuněčných prostor (intercelulár), které u rostlin žijících v prostředí s nízkým obsahem kyslíku, například mokřadních nebo vodních rostlin, vytváří speciální typ parenchymu – aerenchym. Tento typ pletiva obsahuje rozsáhlé interceluláry, které usnadňují transport plynů a zároveň snižují hmotnost rostlinných orgánů, což jim umožňuje nadnášení ve vodě. Parenchym často vytváří souvislé a silné vrstvy v různých částech rostliny. Nachází se například v listech (jako součást listového mesofylu), v primární kůře a dřeni stonků i kořenů, v řapících listů a také v květech, semenech a plodech. Některé buňky parenchymu mohou být součástí vodivých pletiv (xylému a floému) nebo sekundárního krycího pletiva (Votrubová, 2010).

Hlavní funkce parenchymu podle Votrubové (2010):

- **Fotosyntéza** – Speciální druh parenchymu, označovaný jako chlrenchym, obsahuje chloroplasty a podílí se na fotosyntéze. v těchto buňkách se chloroplasty nacházejí v nástěnné cytoplazmě přitisknuté k buněčné stěně. Chlrenchym je hojně zastoupen především v listech, ale může se vyskytovat i v povrchových vrstvách stonku, květech nebo některých plodech. u kořenů je jeho výskyt vzácný, s výjimkou vzdušných kořenů epifytů.
- **Zásobní funkce** – Parenchym slouží jako rezervoár energie a živin. Zásobní látky se ukládají buď ve vakuolách (například cukry a aminokyseliny), v plastidech (škrob) nebo v oleosomech (tuky). v některých případech se zásobní sacharidy hromadí v buněčných stěnách, například u semen kávovníku nebo datlovníku. Zvláštním příkladem je endosperm obilnin, který se skládá ze škrobových zásobních buněk obklopených aleuronovou vrstvou obsahující bílkoviny.

- **Mechanická podpora** – Plně naplněné (turgescenční) parenchymatické buňky přispívají k pevnosti rostlinných orgánů, například listů. Při nedostatku vody, kdy ztrácejí turgor, dochází k vadnutí.
- **Regenerace a růst** – Parenchym má schopnost obnovit dělivou aktivitu, což umožňuje vznik sekundárních meristémů (např. felogénu a kambia), hojení ran a regeneraci tkání. Tato vlastnost se uplatňuje také při vegetativním rozmnožování rostlin a při tvorbě adventivních orgánů.
- **Transport látek** – Parenchymatické buňky jsou propojeny plazmodezmaty, což umožňuje symplastický transport. Buněčné stěny umožňují transport apoplastický a mezibuněčné prostory (interceluláry) slouží pro pohyb plynů.
- **Sekrece** – Některé parenchymatické buňky se specializují na produkci a vylučování různých látek, například éterických olejů v listech třezalky (*Hypericum perforatum*), pryskyřice u jehličnanů nebo silic u kopru (*Anethum graveolens*). Sekreční buňky mohou fungovat jako idioblasty, uchovávající třísloviny, krystaly šťavelanu vápenatého či jiné sekundární metabolity (Votrubová, 2010).

Kolenchym

Kolenchym je podpurné pletivo charakteristické pro vyvíjející se orgány mnoha bylin i dřevin a nachází se i ve stoncích a listech zralých rostlin. Kolenchymatické pletivo tvoří buňky, které si stejně jako parenchymatické buňky uchovávají živý protoplast, na rozdíl od nich jsou však protáhlejší a jejich buněčná stěna je nerovnoměrně elasticky zesílená. Mezibuněčné prostory (interceluláry) se v kolenchymu vyskytují jen vzácně (Leroux, 2012). Trojrozměrný tvar buněk parenchymu je popisován jako geometricky dokonalý 14stranný mnohostěn s 8 šestiúhelníkovými a 6 čtyřúhelníkovými plochami – neboli ortický tetrakaidekahedron (Crang et al., 2018).

Způsob ukládání ztloustlých částí buněčných stěn kolenchymu se liší, což umožňuje rozlišit několik jeho typů. Mezi nejběžnější patří kolenchym rohový a deskový. u rohového typu dochází ke ztloustnutí buněčných stěn v místech styku tří nebo více buněk, zatímco oblasti, kde se stýkají pouze dvě buňky, zůstávají tenké. Naproti tomu u deskového kolenchymu tloustnou stěny orientované rovnoběžně s povrchem rostlinného orgánu, zatímco stěny

kolmé na povrch si zachovávají původní tloušťku, čímž vzniká struktura podobná deskám (Votrubová, 2010).

Hlavní funkcí kolenchymu je poskytování mechanické opory. Zabraňuje přetržení orgánů rostlin, ale zároveň nebrání jejich ohybu. Jeho buňky mohou obsahovat chloroplasty, takže bývá současně chlorenchymem, podobně jako parenchymatické buňky obsahující chloroplasty (Lhotský, 1962).

Sklerenchym

Sklerenchym je mechanické pletivo a je tvořeno buňkami, které mají sekundární, často lignifikující, buněčnou stěnu ukládající se na povrch buněčné stěny primární. Se sklerenchymem a kolenchymem tvoří třetí skupinu jednoduchých pletiv, v rostlinách však představuje méně než 10 % všech živých (nezdřevnatělých) buněk. Na rozdíl od buněk parenchymatických a kolenchymatických si sklerenchymatické buňky v dospělosti nezachovávají živý protoplast a často odumírají. Funkce sklerenchymu tedy z velké části závisí pouze na ztlustlé buněčné stěně sklerenchymatických buněk, která zůstává rigidní nezávisle na turgoru (Crang et al., 2018).

Buňky sklerenchymu se výrazně liší svým původem, tvarem i strukturou. Můžeme je však rozdělit do dvou hlavních kategorií: vlákna a sklereidy. Vlákna jsou dlouhé, úzké buňky s tlustými buněčnými stěnami. u některých rostlin, například u ramie sněhobílé (*Boehmeria nivea*), mohou dosahovat délky až 0,5 metru, což z nich činí pravděpodobně nejdelší buňky suchozemských rostlin. **Vláknité** buňky se obvykle vyskytují ve svazcích, které mohou být spojeny s floémem, xylémem nebo se vyskytovat samostatně. Vlákna používaná v průmyslu jsou ve skutečnosti svazky těchto buněk. **Sklereidy** mají stejně jako vlákna silně ztloustlé sekundární stěny, avšak nejsou tak protáhlé. Jejich velikost se výrazně liší a některé typy mají natolik charakteristický tvar, že se využívají v rostlinné taxonomii. Na rozdíl od vláknitých buněk se sklereidy často nacházejí osamoceně mezi jinými typy pletiv (Jarvis, 2012).

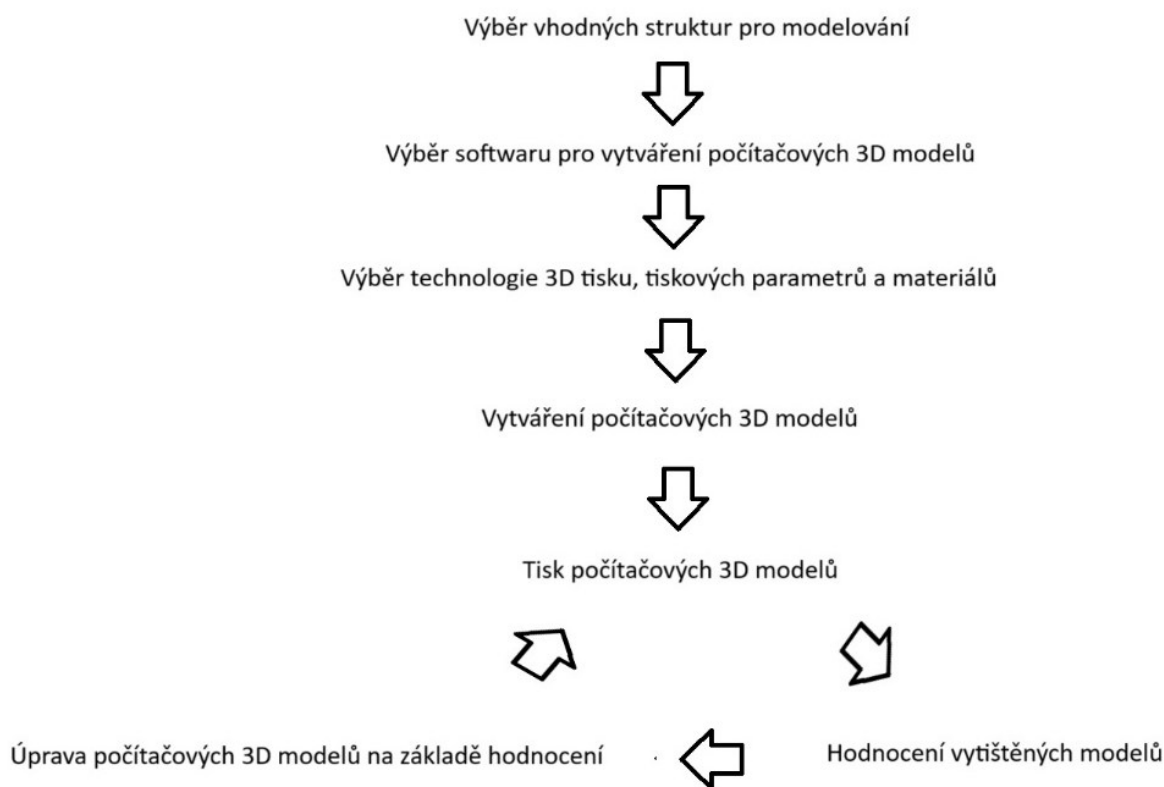
Charakteristické typy sklereidů podle Jarvise (2012)

- **Brachysklereidy**, známé také jako kamenné buňky, mají silné stěny a jsou přibližně izodiametrické (přibližně stejně velké ve všech směrech). Tyto buňky dodávají zrnitou strukturu plodům, například hruškám (*Pyrus communis*). Jejich tvrdost pravděpodobně hraje důležitou roli v ochraně semen před konzumací některými živočichy, což ovlivňuje jejich rozšiřování.
- **Makrosklereidy** (tyčinkové buňky) a **osteosklereidy** (kostní buňky) mají sloupcovitý tvar. Osteosklereidy mají na svých koncích rozšíření. Na rozdíl od většiny ostatních sklereid tyto buňky často tvoří kompaktní, pevné a relativně nepropustné struktury, například osemení bobovitých rostlin.
- **Filiformní sklereidy** jsou tenké, vláknité a někdy větvené. Objevují se například v zesilující síti rozptýlené v mezofylu listů olivovníku (*Olea europaea*).
- **Astrosklereidy** mají hvězdicovitý tvar a často se nacházejí na koncích listových žilek, kde pravděpodobně pomáhají předcházet mechanickému namáhání při ohybu listu ve větru.
- **Trichosklereidy** mají podobný tvar, ale vyčnívají do velkých mezibuněčných prostor vodních rostlin, například leknínů (*Nymphaea spp.*) (Jarvis, 2012).

4 Tvorba a ověření modelů rostlinných pletiv pomocí 3D tisku

Metodika tvorby byla vytvořena podle Hevnera et al. (2004), který se zabývá vědou o designu v informatice. Zmíněné koncepty jsou však relevantní a přenosné i do této práce. Aby byl podle Hevnera et al. (2004) design (návrh) relevantní, musí být jeho výsledkem artefakt, který inovativním způsobem řeší nějaký specifický problém. Pro přehlednost autoři uvedli sedm zásad, které mají napomáhat výzkumníkům, recenzentům, redaktorům a čtenářům pochopit požadavky efektivního výzkumu v oblasti designu. Dále také uvádí, že tyto zásady není nutno slepě následovat, slouží pouze jako nástroj. Výzkumníci, recenzenti a editoři by měli používat svou vlastní kreativitu a kritické myšlení k určení kdy a jak zmíněné zásady ve své práci použít. i přes to však doporučují všechny uvedené zásady do jisté míry zohlednit (Hevner et al. 2004).

Během designu modelů rostlinných pletiv bylo přihlédnuto k pěti pro tuto práci relevantním zásadám popsaných v práci Hevnera et al. (2004). První zásadu design splňuje svým výstupem, tzn. samotnou tvorbou fyzických modelů. Druhou zásadu design splňuje řešením relevantních problémů popsaných v kapitole *Úvod*. Třetí zásada byla splněna opřením designu o odborné zdroje a literaturu. Čtvrtá zásada byla splněna iterativním procesem vytváření a zdokonalování jednotlivých generací modelů. Pátá zásada byla splněna ověřením modelů dvěma z metod popsaných ve stejné práci Hevnera et al. (2004), a to konkrétně analýzou modelů, která spočívá v hodnocení statických vlastností modelů s ohledem na cíle práce a ověřením modelů na základě názoru odborníků na didaktiku biologie. Proces designování modelů byl znázorněn na fázovém diagramu (viz. Obrázek 1).



Obrázek 1 – Fázový diagram procesu designování modelů rostlinných pletiv

4.1 Přípravná fáze

Tato kapitola se věnuje procesům, které předcházejí vlastní tvorbě modelů rostlinných pletiv. Konkrétně výběru vhodných struktur pro modelování, výběru technologie pro 3D tisk a vhodných tiskových parametrů, a výběru softwarů používaných pro tvorbu digitálních 3D modelů.

4.1.1 Výběr vhodných struktur rostlinných pletiv

Pro výběr vhodných struktur rostlinných pletiv bylo přihlédnuto ke dvěma kritériím, která jsou relevantní z hlediska cílů této práce. Prvním z nich je možnost použití vzniknuvších 3D modelů rostlinných pletiv ve výuce biologie na gymnáziích. Jinými slovy pletiva, která jsou modelována by měla být součástí RVP G MŠMT tedy rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia ministerstva školství mládeže a tělovýchovy nebo by měla být součástí učebnic biologie rostlin pro gymnázia. Druhým kritériem je potom rozmanitost a názornost

modelů. Ty by měly ukazovat takové druhy pletiv, které se od sebe jasně liší jak tvarem, tak funkcí.

Pro splnění prvního kritéria můžeme nahlédnout přímo do rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia, kde je v očekávaných výstupech biologie rostlin uvedeno pouze to, že „žák popíše stavbu těl rostlin a stavbu a funkci rostlinných orgánů,“ a v sekci učivo je obecně uvedena „*morfologie a anatomie rostlin*“ (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2007, s. 32–33). Ačkoliv do rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia konkrétní rostlinná pletiva nepochybně patří, výběr konkrétních rostlinných pletiv tento text nijak neusnadní. Musíme se tedy obrátit na učebnice. Pro účel splnění prvního kritéria byly vybrány učebnice Biologie rostlin pro první ročník víceletých gymnázií (Kincl et al., 2008) od nakladatelství Fortuna a Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část) (Jelínek & Zicháček, 2014) od nakladatelství Olomouc. Tyto učebnice byly vybrány, protože mají obě doložku MŠMT a jsou ucelené. v obou učebnicích je zmíněno rozdělení rostlinných pletiv podle tvaru buněk a tloušťnutí buněčných stěn na parenchym, kolenchym i sklerenchym. Z podrobnějšího dělení těchto pletiv jsou v učebnicích dále zmíněny aerenchym², rohový kolenchym a například sklerenchymatická vlákna.

Z pohledu rozmanitosti a názornosti modelů, a tedy z pohledu splnění druhého kritéria výběru struktur rostlinných pletiv vhodných k modelování, je výčet rostlinných pletiv uvedený ve výše zmíněných učebnicích dostačující. Pro modelování bylo vybráno jedno zpevňující pletivo, jedno základní pletivo a jedno specializované pletivo.

4.1.2 Výběr technologie 3D tisku pro přípravu modelů a tiskové parametry s použitými materiály

Výběr technologie 3D tisku přímo souvisí s druhem tiskárny, který pro tisk modelů byl použit. Vzhledem k tomu, že 3D modely rostlinných pletiv by měly být používány ve výuce, největším limitujícím faktorem zůstává cena. Ta zužuje výběr na dvě možné technologie, které je možné použít, a to FDM tisk a SLA tisk. Obě tyto metody jsou cenově relativně dostupné a rozšířené i mimo průmyslovou výrobu (Stříteský et al., 2020). Když bude brán v potaz fakt, že by měly modely a i samotná 3D tiskárna být používány ve školním prostředí,

² Na obrázku v učebnici je však vyobrazený aktinenchym.

kde je kladen důraz na bezpečnost práce studentů i zaměstnanců, FDM tiskárny dávají jednoznačně větší smysl, vzhledem k tomu, že materiály používané při SLA tisku jsou toxické (Tian et al., 2025). Faktem však zůstává, že 3D modely rostlinných pletiv, které jsou výsledkem této práce lze vytisknout téměř jakoukoliv technologií 3D tisku zmíněnou v kapitole 2.1.

Pro všechny generace modelů zhotovených v této práci byla použita FDM 3D tiskárna A1 Mini od společnosti BambuLab společně s Bambu Studio slicer softwarem pro generování G-kódu. Tisk byl proveden na texturovanou PEI podložku a byla na něj použita standardní tryska z nerezové oceli o průměru 0,4 mm. Výška jednotlivých vrstev byla nastavena na 0,2 mm. u modelů s převisy byla použita funkce automatického generování stromových podpěr s hraničním úhlem 30 stupňů. Hustota vnitřní výplně modelů byla nastavena na 7 % a jako vzor vnitřní výplně byla použita mřížka. Použitým materiálem se jednotlivé generace modelů lišily, všechny generace však byly vytisknuty z materiálu PLA o průměru tiskové struny 1,75 mm.

4.1.3 Výběr softwaru pro přípravu modelů

Z hlediska samotného modelování lze využít mnoha programů. Výběr je možné opět ulehčit kritérii, které musí program splňovat pro potřebu tvorby rostlinných pletiv. Program musí umožňovat tvorbu 3D objektů s organickými tvary, manipulaci s nimi a jejich modifikaci. Dalším kritériem je možnost exportu souborů do formátu zpracovatelným 3D tiskárnami. Z těchto důvodů je dobrou volbou program Blender, což je program pro 3D počítačovou grafiku, který je dostupný zdarma a má veškeré nástroje, které jsou potřeba pro vytvoření modelů rostlinných pletiv. K vytvoření některých pravidelných geometrických tvarů, které se dají v programu Blender dále upravovat byla také použita internetová CAD (computer-aided design – počítačem podporované projektování) aplikace OnShape.

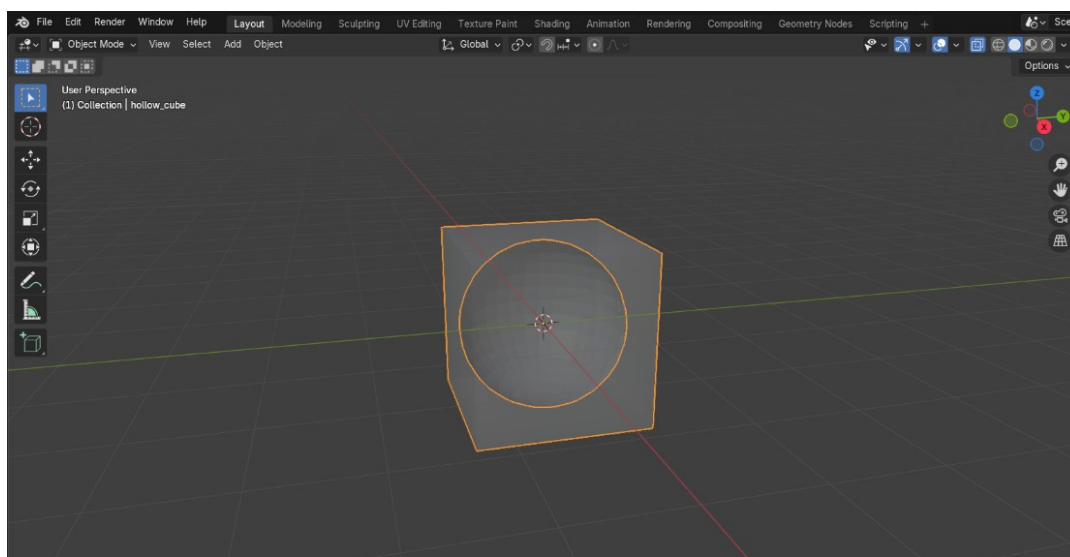
4.2 První generace 3D modelů rostlinných pletiv

Pro zhotovení první generace 3D modelů rostlinných pletiv byl použit popis jednotlivých struktur rostlinných pletiv a obrázky pro vizuální referenci v literatuře. v programu Blender byly vymodelovány postupně modely rohového kolenchymu, jakožto příkladu zpevňujícího pletiva, ideální struktury obecného kolenchymatického pletiva, jakožto příkladu základního

pletiva a aktinenchymu, jakožto příkladu specializovaného pletiva. První generace rostlinných pletiv byla vytisknuta strunou PLA Basic od společnosti BambuLab v barvě Yellow (žlutá) a tiskovou strunou F3D PLA v barvě Grey (šedá) obě o průměru 1,75 mm.

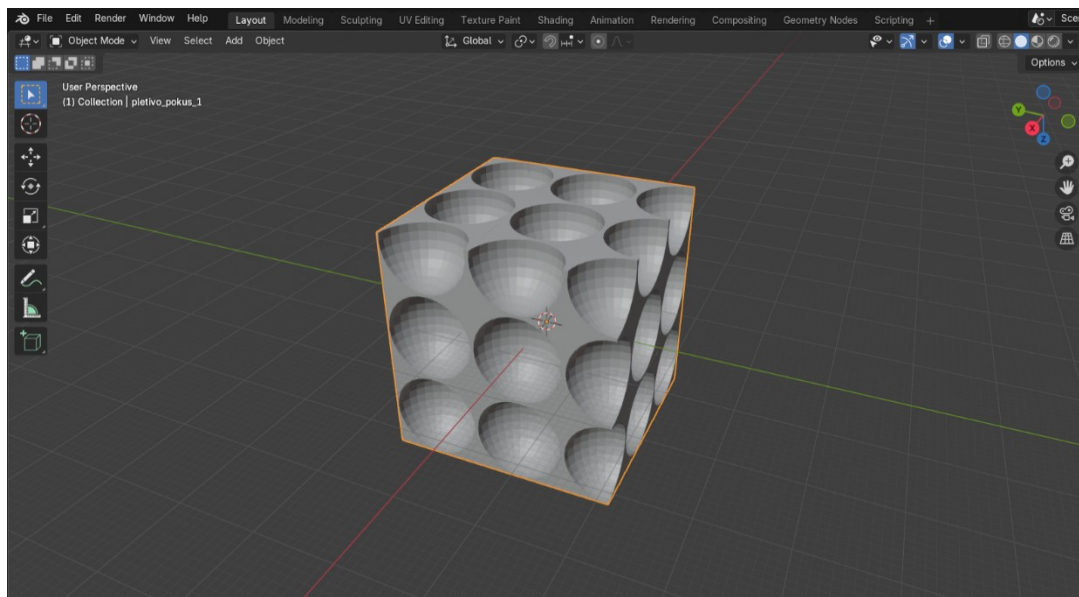
4.2.1 První generace modelu rohového kolenchymu

Model pletiva tvořeného buňkami rohového kolenchymu, vycházel z popisu v literatuře, tedy že jsou to buňky s nerovnoměrně ztloustlými stěnami na styku tří a více buněk (Votrubová, 2010). v programu Blender byla vytvořena krychle a koule s poloměrem nepatrně menším než hrana této krychle. Koule byla následně vnořena do geometrického středu krychle a modifikátorem *Boolean* byl objem koule od krychle odečten. Touto operací vznikla krychle viditelná na *obrázku 2*, která má uvnitř kulový výřez.



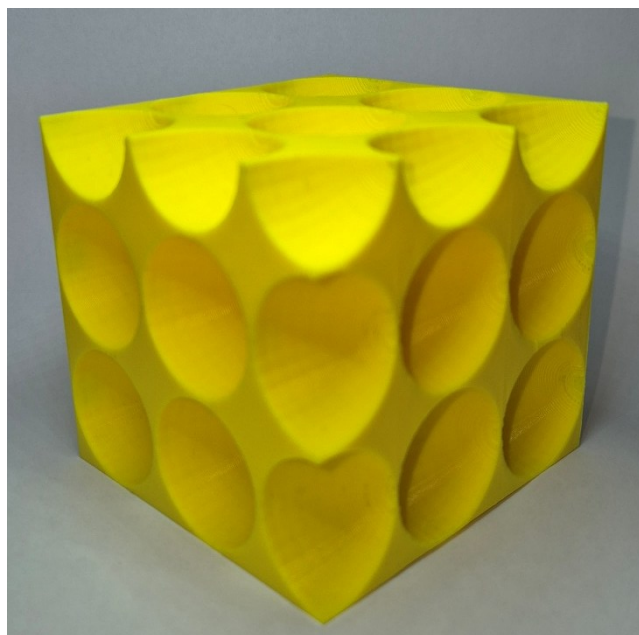
Obrázek 2 – Proces modelování krychle s kulovitým výřezem v programu Blender

Tyto duté krychle byly pomocí modifikátoru Array nakopírovány a uspořádány do větší složené krychle. Takto vzniklá složená krychle viditelná na *obrázku 3* byla ze tří stran oříznuta, aby byla vidět její vnitřní struktura.



Obrázek 3 – Proces modelování řezu složenou krychlí v programu Blender

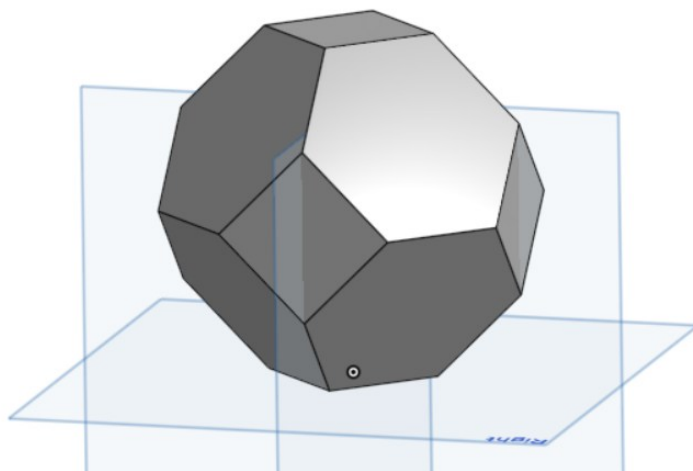
Takto vzniklý model představující rohový kolenchym byl následně převeden do programu Bambu Studio, kde byl připraven pro tisk a vytisknut. Výsledek je možné vidět na *obrázku 4*.



Obrázek 4 – Vytisknutý model první generace rohového kolenchymu

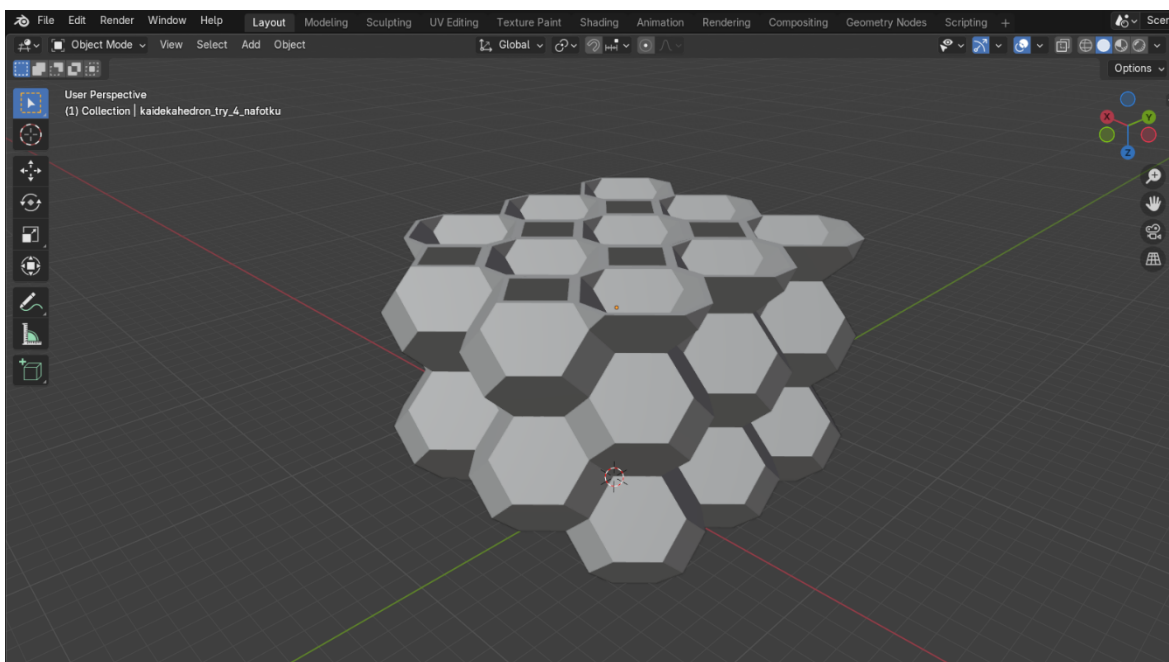
4.2.2 První generace modelu obecné struktury kolenchymatického pletiva

První generace modelu obecného kolenchymu byla vymodelována podle popisu dokonalého tvaru kolenchymatické buňky neboli ortického tetrakaidekahedronu (Crang et al., 2018). Tento tvar, viditelný na *obrázku 5*, byl vymodelován v aplikaci OnShape a převeden do programu Blender.



Obrázek 5 – Proces modelování ortického tetrakaidekahedronu v aplikaci OnShape

V programu Blender byl ortický tetrakaidekahedron udělán dutým pomocí modifikátoru *Solidify* a pomocí modifikátoru *Array* nakopírován a uspořádan do většího uskupení. Toto uskupení viditelné na *obrázku 6* bylo poté oříznuto, aby vynikla jeho vnitřní struktura.



Obrázek 6 – Proces modelování řezu uskupím ortických tetrakaidekahedronů v programu Blender

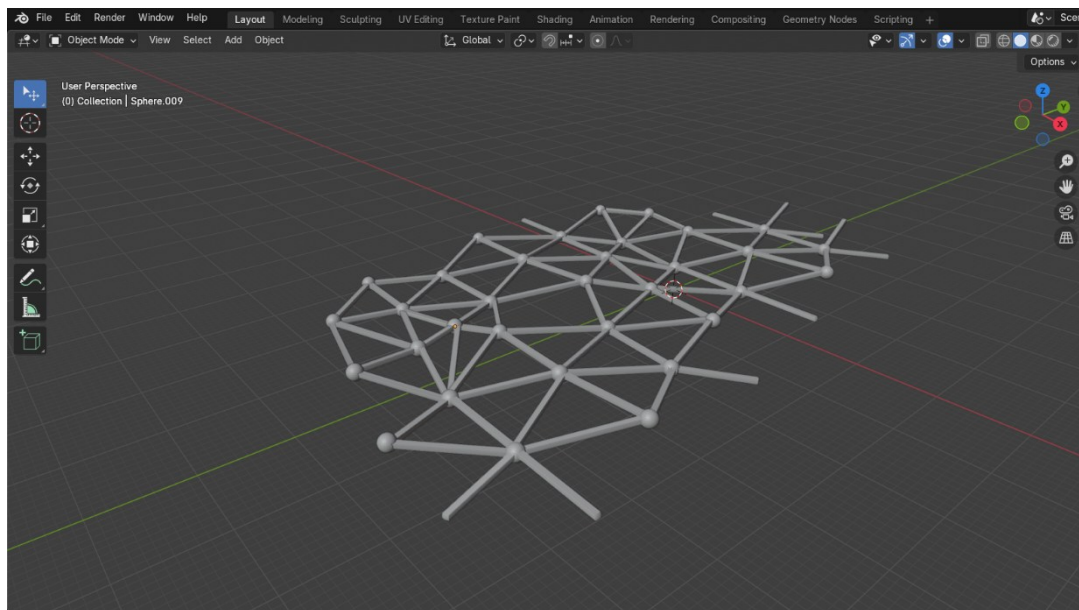
Takto vzniklý model představující obecnou strukturu kolenchymatického pletiva byl následně převeden do programu Bambu Studio, kde byl připraven pro tisk a vytisknut. Výsledek je možné vidět na *obrázku 7*.



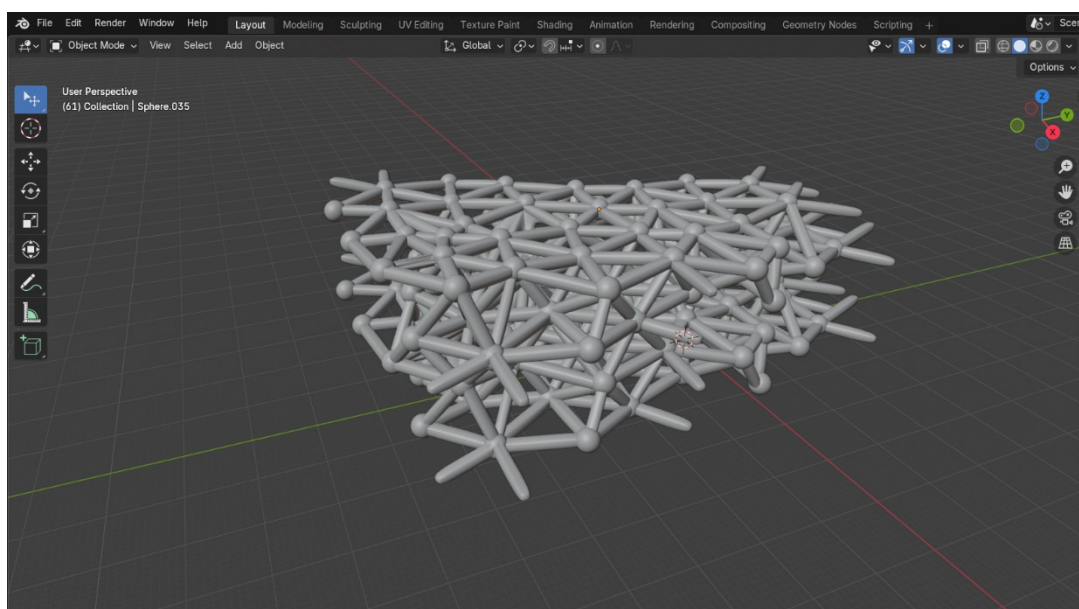
Obrázek 7 – Vytisknutý model první generace obecné struktury kolenchymatického pletiva

4.2.3 První generace modelu aktinenchymu

První generace modelu aktinenchymu byla vymodelována podle mikroskopických snímků na internetu a jeho popisu v literatuře, tedy že aktinenchym je tvořen hvězdčovitými buňkami s velkými intercelulárami (Lhotský, 1962). v programu Blender byly do nepravidelné šestiúhelníkové mřížky uspořádány koule, ze kterých byly postupně funkcí Extrude extrudovány výběžky napojující se na přilehlé koule představující jednotlivé buňky. Takto vzniklá síť viditelná na *obrázku 8* byla modifikátorem *Array* nakopírována do dalších tří pater, která byla následně funkcí Extrude postupně propojena obdobně jako výše zmíněné jednotlivé koule. Konečný model je viditelný na *obrázku 9*.

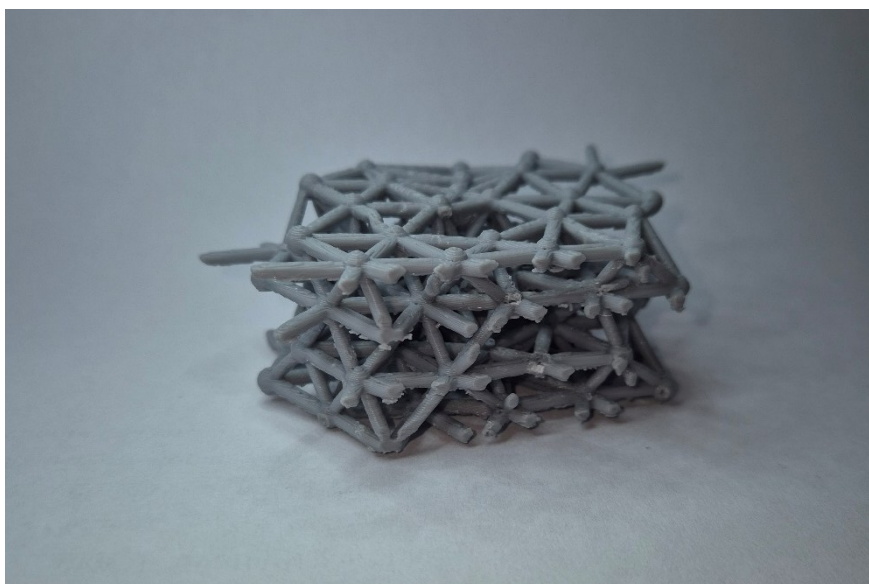


Obrázek 8 – Proces modelování sítě z koulí spojených výběžky v programu Blender



Obrázek 9 – Proces modelování konečného modelu aktinenchymu v programu Blender

Takto vzniklý model představující strukturu aktinenchymu byl následně převeden do programu Bambu Studio, kde byl připraven pro tisk a vytisknut. Výsledek je možné vidět na obrázku 10.



Obrázek 10 – Vytisknutý model první generace aktinenchymu

4.2.4 Hodnocení modelů první generace

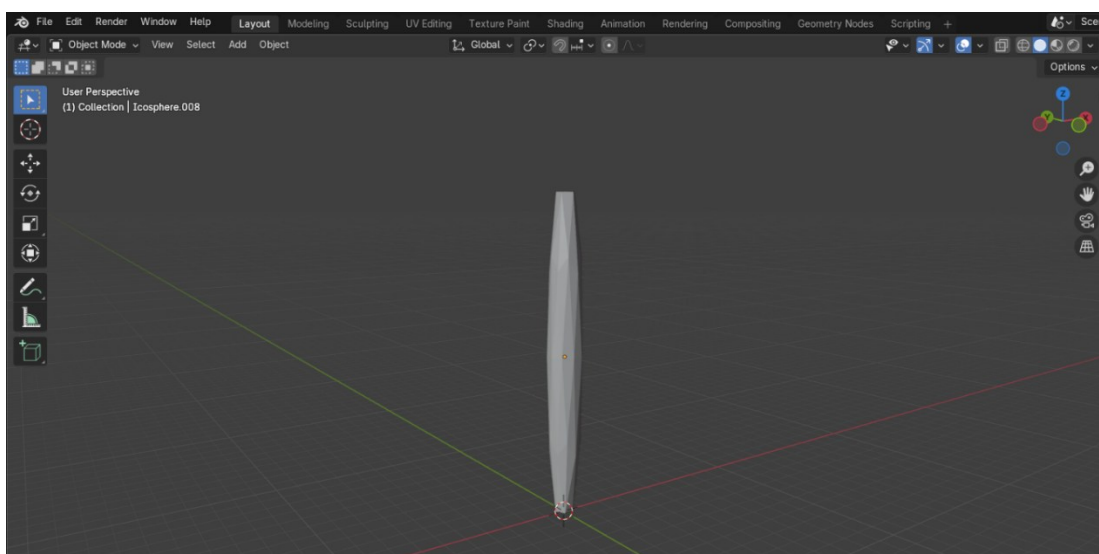
Modely první generace byly hodnoceny celkem čtyřmi odborníky na didaktiku biologie. Každému z odborníků byly postupně předány jednotlivé modely a položena jednoduchá otázka: „Co představuje objekt, který držíte v ruce?“ Z analýzy nasbíraných odpovědí vyplynulo na povrch mnoho nedostatků první generace modelů rostlinných pletiv. Prvním nedostatkem bylo, že bez nápovědy si nebyl žádný odborník stoprocentně jistý co modely mají představovat. Tři ze čtyř dotazovaných dospěli k názoru, že modely, nejspíše zobrazují nějaké buňky, konkrétní typ pletiva byli ale schopni určit pouze u modelu aktinenchymu. Dalším zásadním nedostatkem, na kterém se shodli všichni dotazovaní byla pravidelnost prvních dvou modelů. v dokonalých podmínkách rostlinné buňky spějí k tvarům zobrazovaným první generací modelů, v přírodě jich však nikdy nedosáhnou. Model aktinenchymu byl ze série modelů hodnocen nejpozitivněji avšak byl také vyhodnocen jako příliš pravidelný ve vertikálním směru. Dva z dotazovaných odborníků zmínili, že dokonce samotná barva modelů ovlivnila jak na model nahlíželi. Toto slovní hodnocení první generace modelů rostlinných pletiv posloužilo jako dobrý základ pro identifikování nutných změn pro druhou generaci 3D modelů.

4.3 Druhá generace 3D modelů rostlinných pletiv

Na základě zpětné vazby byly ze série modelů vyřazeny původní modely rohového kolenchymu (příklad zpevňujícího pletiva) a obecné struktury kolenchymatických buněk (příklad základního pletiva). Tyto modely byly nahrazeny modelem sklerenchymatických vláken jako reprezentací zpevňujícího pletiva a modelem obecné struktury parenchymatického pletiva jako příkladem pletiva základního. Důvodem této změny je názornější 3D struktura a obecně hojnější zastoupení těchto pletiv v rostlinách (Crang et al., 2018). Model sklerenchymatických vláken a model obecné struktury parenchymatických buněk byly vymodelovány na základě popisu v literatuře. Model aktinenchymu byl také vymodelován znovu s menší mírou pravidelnosti. Stejně tak jako první generace modelů i tato druhá generace modelů byla vymodelována v programu Blender. K tisku modelů byla použita struna PLA Basic od společnosti BambuLab v barvě Bambu Green (zelená) o průměru 1,75 mm.

4.3.1 První generace modelu sklerenchymatických vláken

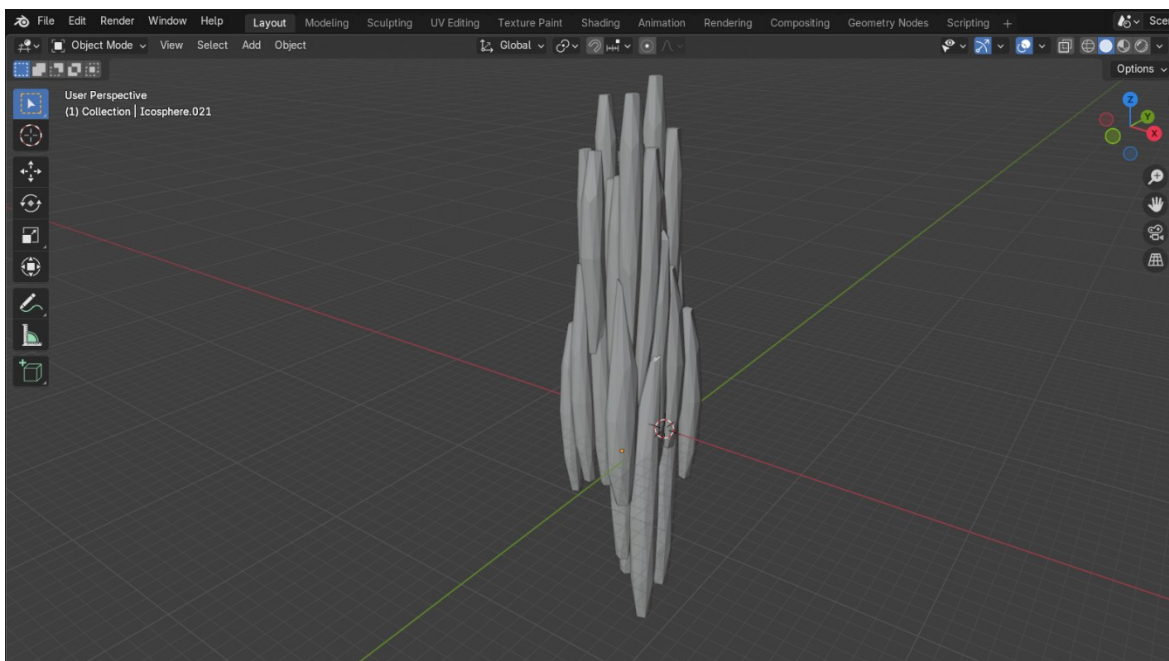
První generace modelu sklerenchymatických vláken byla vymodelována podle mikroskopických snímků a popisu v literatuře, tedy že jsou to extrémně protáhlé buňky (Schüler et al., 2014). v programu Blender bylo z kulovitého polygonu³ vytvořeno dlouhé vlákno vyobrazené na *obrázku 11*.



Obrázek 11 – Proces modelování vlákna vytvořeného z kulovitého polygonu v programu Blender

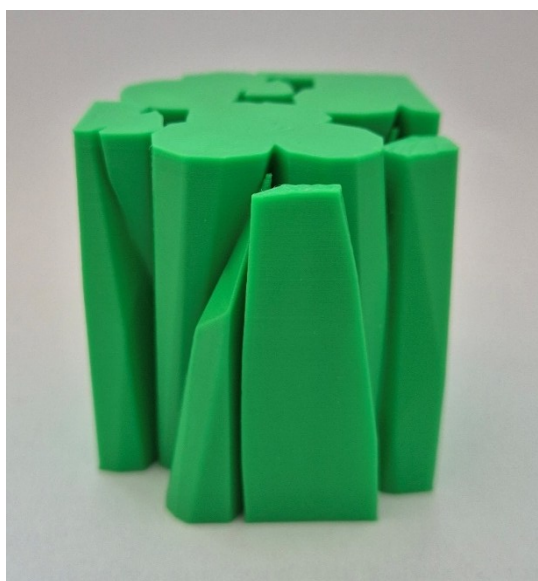
³ V programu Blender pod názvem icosphere.

Podobných vláken bylo vytvořeno přibližně třicet. Jejich tvar byl modifikován pomocí modifikátoru *Simple Deform*. Jednotlivá vlákna byla následně poskládána k sobě do struktury viditelné na *obrázku 12*.



Obrázek 12 – Proces skládání vymodelovaných vláken v programu Blender

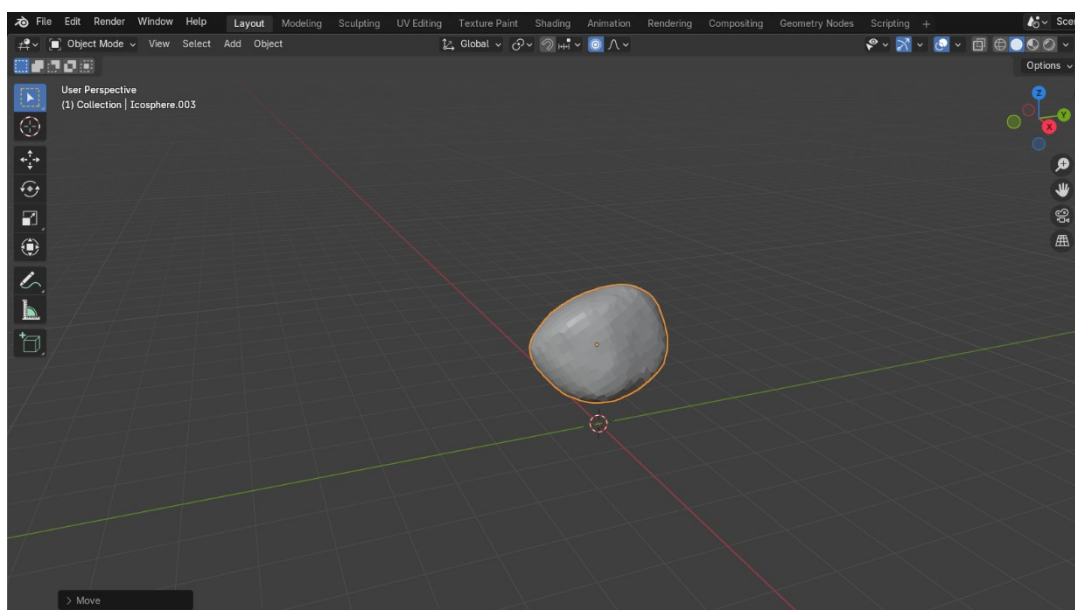
Takto vzniklý model představující strukturu sklerenchymatických vláken byl následně převeden do programu Bambu Studio, kde byl oříznut, připraven pro tisk a vytisknut. Výsledek je možné vidět na *obrázku 13*.



Obrázek 13 – Vytisknutý model první generace sklerenchymatických vláken

4.3.2 První generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva

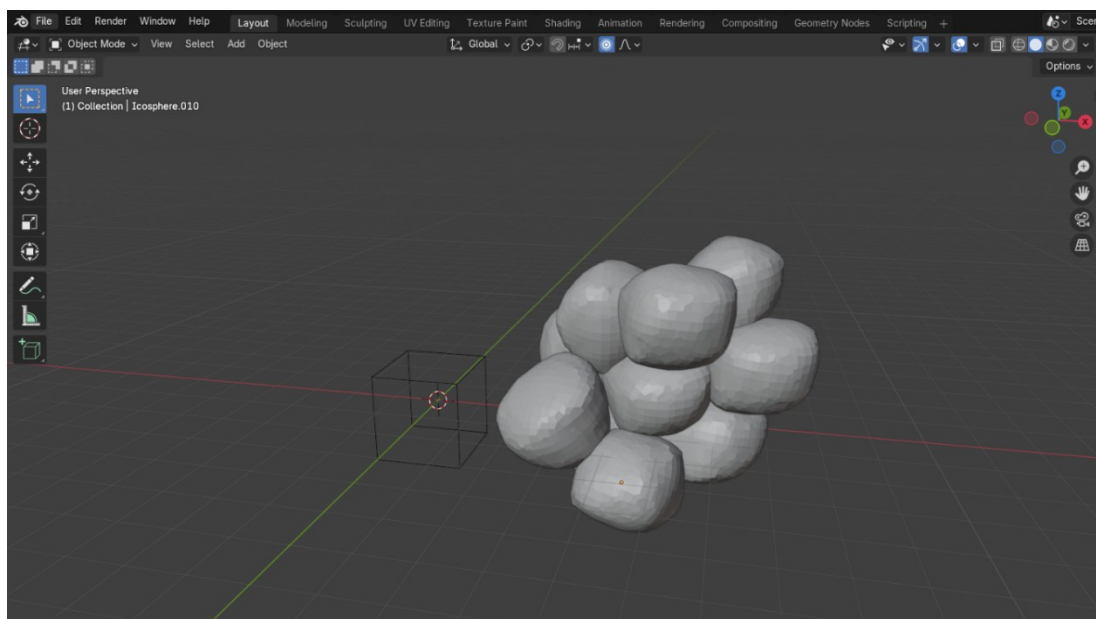
Pro modelování první generace obecné struktury parenchymatického pletiva byl jakožto výchozí bod použit popis v literatuře, tedy že parenchymatické pletivo je tvořeno izodiametrickými buňkami s různě velkými intercelulárami (Votrubová, 2010). v programu Blender byl z kulovitého polygonu⁴ pomocí parametru *Subdivision* a modifikátorů *Subdivision Surface*, *Displace* a *Remesh* vytvořen nepravidelný elipsoid viditelný na obrázku 14.



Obrázek 14 – Proces modelování nepravidelného elipsoidu v programu Blender

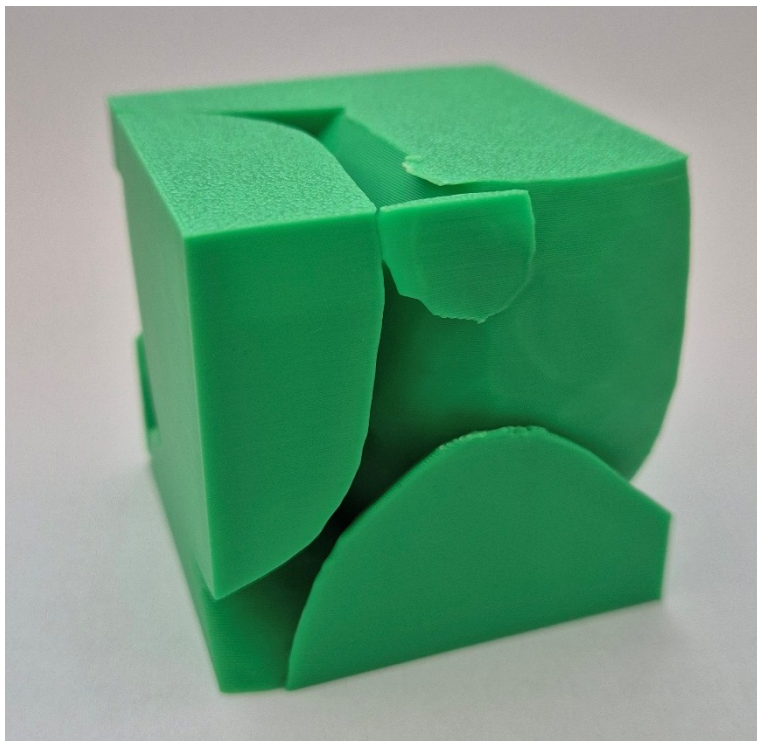
⁴ V programu Blender pod názvem icosphere.

Takto vytvořený elipsoid byl nakopírován a tvar všech kopií pozměněn. Všechny výsledné elipsoidy byly následně složeny k sobě do většího celku viditelného na *obrázku 15*.



Obrázek 15 – Proces skládání nepravidelných elipsoidů v programu Blender

Takto vzniklá druhá generace modelu představující obecnou strukturu parenchymatického pletiva byla následně převedena do programu Bambu Studio, kde byla oříznuta, připravena pro tisk a vytisknuta. Výsledek je možné vidět na *obrázku 16*.

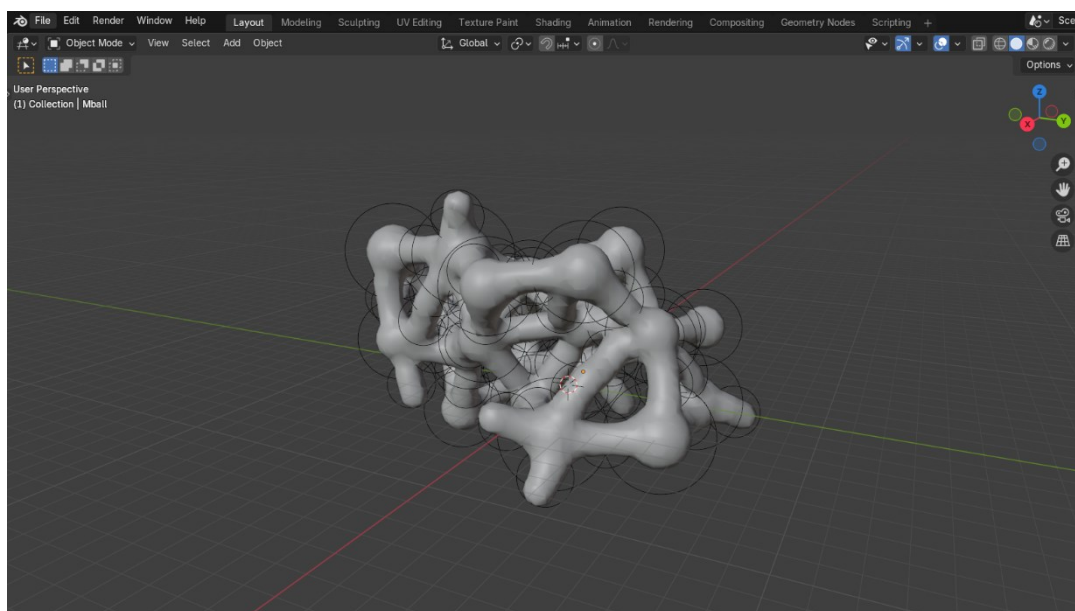


Obrázek 16 – Vytisknutý model první generace obecné struktury parenchymatického pletiva

4.3.3 Druhá generace modelu aktinenchymu

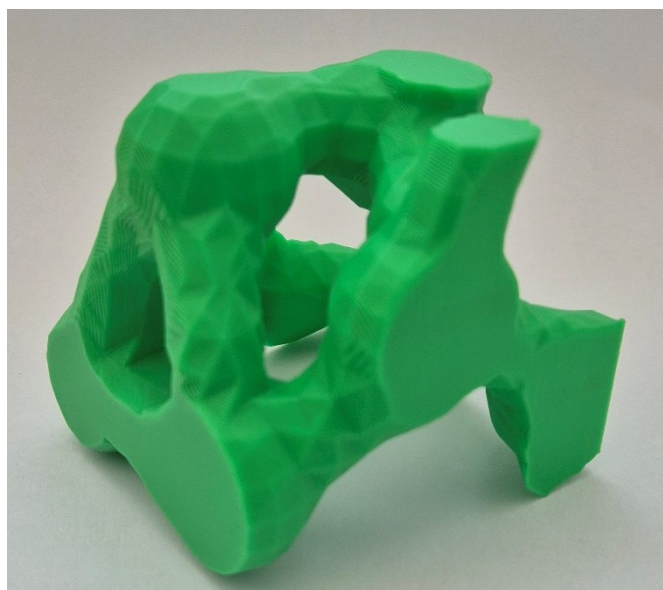
Pro modelování druhé generace aktinenchymu již nebylo použito koulí rozmístěných do šestiúhelníkové mřížky s výběžky. Namísto nich byly opět v programu Blender použity takzvané metaballs⁵. Pro jádro buňky bylo použito metaballs ve tvaru koule a pro hvězdicovité výběžky ve tvaru kapsle. Tyto tvary byly postupně přidávány k sobě dokud nevznikla struktura viditelná na *obrázku 17*.

⁵ Speciální 3D objekty, které se automaticky spojují, pokud se k sobě přiblíží.



Obrázek 17 – Proces modelování aktinenchymu pomocí metaballs v programu Blender

Tato struktura byla následně konvertována na síť a převedena do programu Bambu Studio, kde byla oříznuta, připravena k tisku a vytisknuta. Výsledek tisku je možné vidět na *obrázku 18*.



Obrázek 18 – Vytisknutý model druhé generace aktinenchymu

4.3.4 Hodnocení modelů druhé generace

Hodnocení druhé generace modelů rostlinných pletiv probíhalo velmi podobně jako hodnocení generace první. Modely byly předány stejným odborníkům na didaktiku biologie, kteří měli za úkol rozeznat co představují. Z analýzy nasbíraných odpovědí vyplynulo, že modely jsou oproti první generaci věrohodnější reálné morfologii rostlinných pletiv, mají však stále mnoho nedostatků. Mezi nejvíce zmiňované nedostatky patřila nerozlišenost jednotlivých buněk na řezu a nerozlišenost buněčné stěny od intercelulárního prostoru buňky. Jakožto další nedostatek byl identifikován fakt, že na žádném z modelů nebyla kvůli způsobu ořezu vidět ani jedna celá buňka. Ve výsledku lze usoudit, že se design druhé generace modelů od první posunul dobrým směrem a zmíněné nedostatky je potřeba řešit ve třetí generaci modelů.

4.4 Třetí generace 3D modelů rostlinných pletiv

Na rozdíl od předchozích generací nebyly při vytváření třetí generace měněny digitální modely. Na základě identifikovaných nedostatků druhé generace modelů byl pouze změněn způsob ořezu již vytvořených digitálních modelů tak, aby po vytisknutí byla na 3D modelu vidět vždy alespoň jedna celá buňka. Buněčné stěny mezi buňkami byly ve třetí generaci naznačeny, stejně tak jako i intracelulární prostory buněk, až během postprocessingu. Třetí generace byla vytisknuta strunou PLA v barvě Body color (tělová) od společnosti Aurapol o průměru 1,75 mm.

4.4.1 Druhá generace modelu sklerenchymatických vláken

Pro druhou generaci modelu sklerenchymatických vláken byl z digitálního modelu viditelného na *obrázku 12* vytvořen řez ve tvaru kvádrů. Tímto způsobem se ve vytištěném modelu objevila alespoň jedna celá buňka a bylo názorněji než na modelu první generace ukázáno výrazné prodloužení sklerenchymatických vláken v jednom směru. Naznačení buněčných stěn na řezu byla do modelu vypálena pájkou a intracelulární prostory byly od buněčných stěn odlišeny akrylovou barvou. Vzniklý model je možné vidět na *obrázku 19*.



Obrázek 19 – Vytisknutý model druhé generace sklerenchymatických vláken

4.4.2 Druhá generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva

Pro třetí generaci modelu obecné struktury parenchymatického pletiva byl z digitálního modelu viditelného na *obrázku 13* vytvořen řez ve tvaru krychle, který znázorňoval uspořádání kolenchymatických buněk lépe než model druhé generace. Naznačení buněčných stěn na řezu byla do modelu vypálena pájkou a intracelulární prostory byly od buněčných stěn odlišeny akrylovou barvou. Vzniklý model je možné vidět na *obrázku 20*.



Obrázek 20 – Vytištěný model druhé generace obecné struktury parenchymatického pletiva

4.4.3 Třetí generace modelu aktinenchymu

Pro třetí generaci modelu aktinenchymu byl z digitálního modelu viditelného na *obrázku 16* vytvořen řez ve tvaru kvádrů, který znázorňoval uspořádání buněk aktinenchymu lépe než model druhé generace. Naznačení buněčných stěn na řezu byla do modelu opět vypálena pájkou a intracelulární prostory byly od buněčných stěn odlišeny akrylovou barvou. Vzniklý model je možné vidět na *obrázku 21*.



Obrázek 21 – Vytištěný model třetí generace aktinenchymu

4.4.4 Hodnocení modelů třetí generace

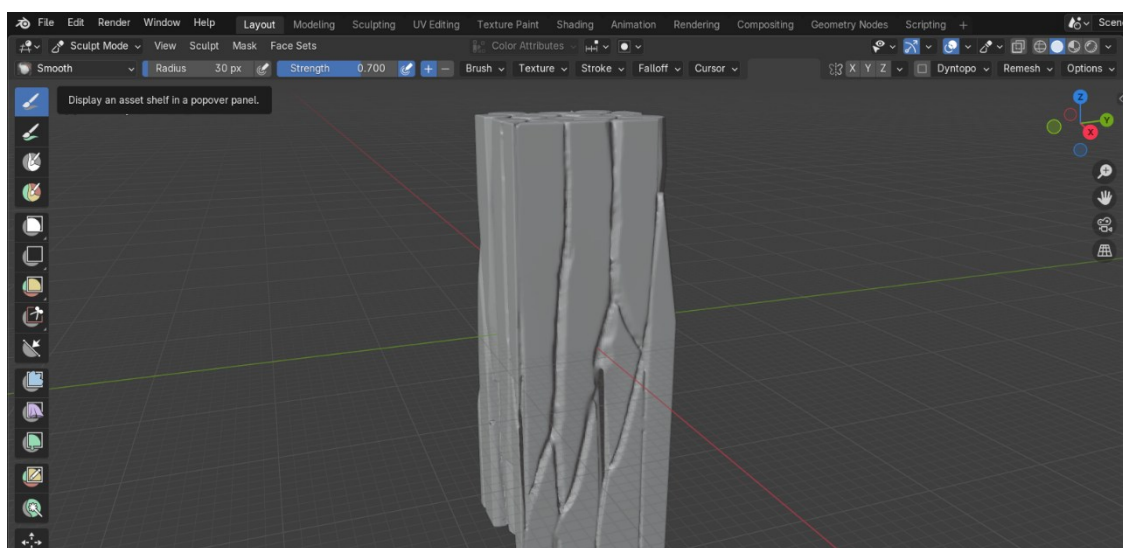
Hodnocení třetí generace modelů rostlinných pletiv probíhalo stejně jako hodnocení druhé generace. Z analýzy nasbíraných odpovědí vyplynulo, že modely třetí generace řeší nedostatky druhé generace, ne vždy je ale řeší ideálním způsobem. Drážky představující buněčné stěny na řezech modelů by se měly stát součástí digitálních 3D modelů a nebyť pouze vypálené během postprocessingu. Jako další nedostatek byla identifikována barva oddělující buněčné stěny od intracelulárních prostorů. Červená barva použitá u modelů třetí generace podle odpovědí není ideální z důvodu možnosti záměny modelů za kostní, či pojivovou tkáň. Tyto nedostatky byly řešeny ve čtvrté generaci modelů rostlinných pletiv.

4.5 Čtvrtá generace 3D modelů rostlinných pletiv

Pro vytvoření čtvrté generace rostlinných pletiv byly upraveny všechny modely tak, aby drážky představující buněčné stěny na řezech modelů byly součástí samotného digitálního 3D modelu. Červená barva znázorňující intracelulární prostor buněk byla nahrazena bílou barvou, která navíc zohledňuje fakt, že je intracelulární prostor buněk světlejší než buněčná stěna. Čtvrtá generace byla vytisknuta strunou PLA v barvě Body color (tělová) od společnosti Aurapol o průměru 1,75 mm.

4.5.1 Třetí generace modelu sklerenchymatických vláken

Třetí generace modelu sklerenchymatických vláken zůstala stejná jako druhá generace s rozdíly uvedenými v kapitole 4.5. Proces modelování drážek je viditelný na obrázku 22.



Obrázek 22 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na řezu modelu sklerenchymatických vláken v programu Blender

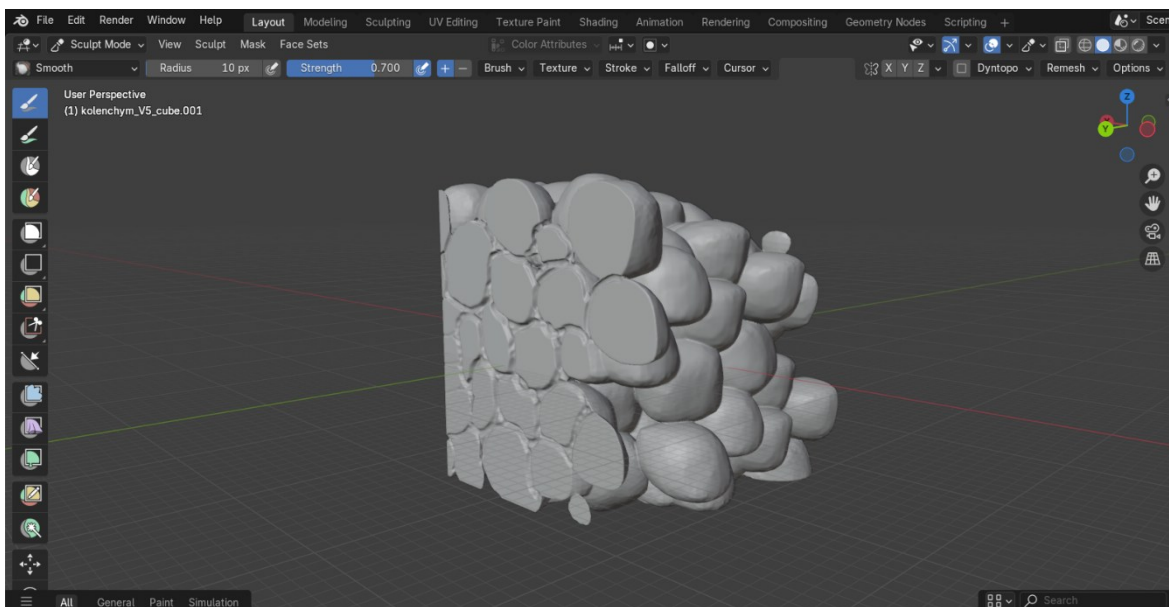
Takto vzniklý digitální model byl převeden do programu Bambu Studio a po vytisknutí upraveného modelu byly intracelulární prostory od buněčných stěn odlišeny bílou barvou. Výsledný model je možné vidět na *obrázku 23*.



Obrázek 23 – Vytisknutý model třetí generace sklerenchymatických vláken

4.5.2 Třetí generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva

Třetí generace modelu obecné struktury parenchymatického pletiva zůstala stejná jako druhá generace s rozdíly uvedenými v kapitole 4.5. Objem řezu byl zvětšen, aby ukazoval více parenchymatických buněk. Proces modelování drážek na zvětšeném řezu je viditelný na obrázku 24.



Obrázek 24 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na zvětšeném řezu modelu obecné struktury parenchymatických buněk v programu Blender

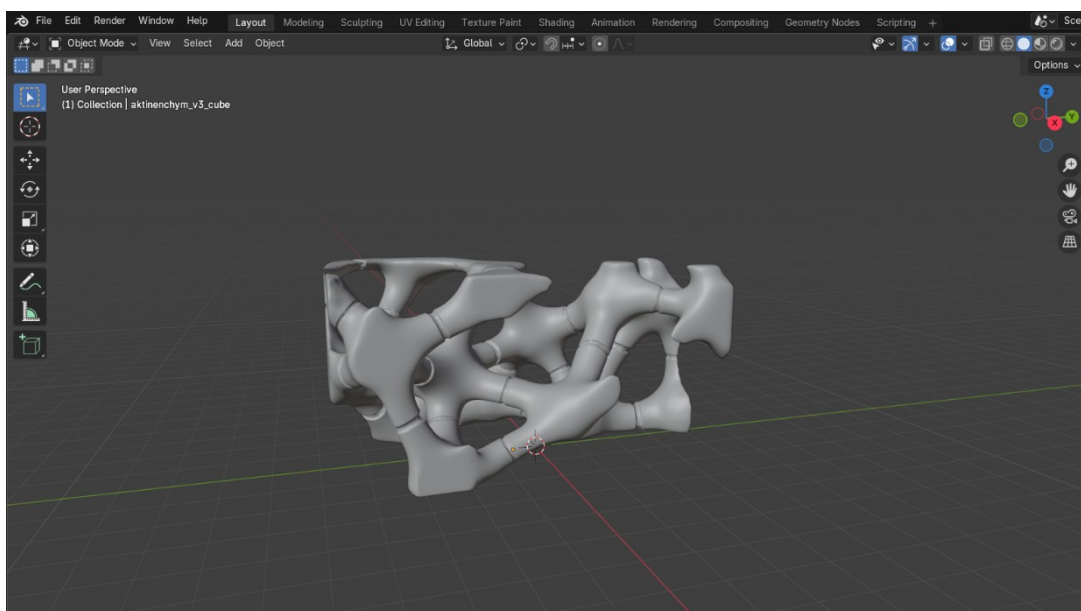
Takto vzniklý digitální model byl převeden do programu Bambu Studio a po vytisknutí upraveného modelu byly intracelulární prostory od buněčných stěn opět odlišeny bílou barvou. Vzniklý model je možné vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 – Vytištěný model třetí generace obecné struktury parenchamtického pletiva

4.5.3 Čtvrtá generace modelu aktinenchymu

Pro vytvoření čtvrté generace modelu aktinenchymu byl opět použit model předešlé generace. Ten byl na základě zpětné vazby v programu Blender vyhlazen, aby na vytištěných modelech nebyly vidět jednotlivé polygony. v digitálním modelu byly opět vymodelovány drážky znázorňující buněčné stěny. Proces modelování je možné vidět na *obrázku 26*.



Obrázek 26 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na vyhlazeném modelu aktinenchymu v programu Blender

Takto vzniklý digitální model byl převeden do programu Bambu Studio a po vytisknutí upraveného modelu byly intracelulární prostory od buněčných stěn opět odlišeny bílou barvou. Vzniklý model je možné vidět na *obrázku 27*.



Obrázek 27 – Vytisknutý model čtvrté generace aktinenchymu

4.5.4 Hodnocení čtvrté generace modelů

Hodnocení čtvrté generace modelů rostlinných pletiv probíhalo stejně jako hodnocení předchozích generací. Z analýzy nasbíraných odpovědí vyplynulo, že čtvrtá generace modelů řeší nedostatky třetí generace. Panelisté vyzdvihují, že z modelů je zřejmé, že se jedná o buněčné struktury, i díky jasnému vizuálnímu oddělení jednotlivých buněk. Na modelech je ukázána variabilita jednotlivých buněk a použité barvy už primárně neevokují jinou obecně známou strukturu. Dále panelisté uvádí, že modely jsou lehké a snadno se s nimi manipuluje.

Diskuse a závěr

Bakalářská práce byla věnována designování a následnému tisku modelů rostlinných pletiv na 3D tiskárně. K tomuto procesu byly následovány zásady produktového designu popsané v kapitole 4. Všechna modelovaná pletiva byla modelována od úplného základu pouze z popisů v literatuře a mikroskopických snímků pro referenci. v digitálních knihovnách 3D modelů typu thingiverse, makerworld a printables se rostlinné buňky objevují pouze jednotlivě a žádný model, který by ukazoval jejich strukturu v prostoru zde dohledatelný není. Postupně byly na základě kritérií popsaných v kapitole 4.1.1 vybrány tři druhy rostlinných pletiv, které byly modelovány a vzniklé modely následně tisknuty. Tyto modely byly hodnoceny odborníky a analyzovány z hlediska cílů práce.

První generace modelů rostlinných pletiv selhala ve většině ohledů, posloužila však jako dobrý odrazový můstek pro následující generace a pomohla vybrat vhodná pletiva pro modelování. Druhá generace modelů rostlinných pletiv znamenala krok správným směrem, a byla ve všech ohledech lepší než první generace. Stále však selhávala v mnoha aspektech. Řezy modelů neukazovaly názorně strukturu pletiv a z modelů nebylo jasné co je buněčná stěna a co intracelulární prostor. Tyto problémy řešila třetí generace, která introdukovala barevné rozlišení intracelulárních prostor a fyzické rozlišení styků buněčných stěn více buněk. Tyto funkce však byly do modelu přidávány až po vytisknutí a byly časově náročné a nepraktické. To se snažila řešit čtvrtá, finální, generace modelů rostlinných pletiv, ve které jsou drážky znázorňující styky buněčných stěn více buněk vymodelovány přímo v digitálním modelu. Odlišení intracelulárního prostoru od buněčných stěn jinou barvou však stále zůstává záležitostí postprocessingu. Zakomponování této funkce do modelu není náročné, ale většina 3D tiskáren nepodporuje multimateriálový tisk a zároveň i s ním tedy ani tisk více barvami najednou. Nabarvení vytisknutého modelu proto zůstává jednodušší a levnější volbou.

Modely rostlinných pletiv také odstraňují některé časté problémy výukových modelů zmíněné v práci Jančaříkové (2017) jako je například chybějící variabilita (v modelech se nenachází dvě stejné buňky, všechny jsou variabilní) nebo nedostatek podnětů pro smyslové vnímání (modely jsou hapticky stimulující a vizuálně zajímavé).

Z hlediska ceny, která byla jedním z hodnocených kritérií vychází všechny tři modely čtvrté generace i s použitím podpěr celkově na 31 Kč při použití filamentu PLA v barvě Body color (tělová) od společnosti Aurapol o průměru 1,75 mm a váze 1 kg. Což je výrazně levnější než průměrné ceny učebních pomůcek používaných v biologii, jak naznačuje orientační průzkum trhu zaměřený na ceny běžně dostupných učebních pomůcek pro výuku biologie. Ceny byly zjištěny prostřednictvím katalogů českých internetových obchodů, které se specializují na didaktické pomůcky⁶ (CONATEX-DIDACTIC Lehrmittel GmbH, n.d.; Matějka, n.d.; MULTIP Moravia, s.r.o., n.d.; Švácha, n.d.; VISION marketing s.r.o., n.d.). Celková cena by šla nadále snížit na úkor mechanické odolnosti modelu změnou parametru *infill*. Cenový rozdíl by byl však zanedbatelný a snížení mechanické odolnosti z hlediska znovupoužitelnosti nežádoucí. Díky nízké ceně je navíc možné poskytnout ve výuce modely všem přítomným žákům, což je pro ně názornější a zábavnější (Lisk & Cheung, 2024).

Doba tisku všech tří modelů čtvrté generace závisí na použité tiskárně. Na tiskárně A1 mini od společnosti BambuLab se modely tisknou dohromady 6 h, tedy přibližně 2 h na každý z modelů. Doba tisku je nepřímě úměrná kvalitě modelů a změnou nastavení a průměru trysky by šlo dosáhnout větších detailů za cenu delší doby tisku. Pro srovnání pokud by u modelu obecné struktury parenchymatického pletiva byla v Programu Bambu Studio nastavena variabilní výška vrstvy pro získání větších detailů na kulových plochách buněk, doba tisku by se z 1 h 56min prodloužila na 3 h 51 min. Pokud by byla pro ještě více detailní tisk stejného modelu použita tryska o průměru 0,2 mm, doba tisku by z 3 h 51min stoupla na 6 h 43 min.

Hlavními limity použití vzniklých modelů jsou, jak naznačují zdroje v kapitole 2.3, kompetence vyučujících, kteří často nemají s 3D tiskem žádné nebo pouze omezené zkušenosti. Dalším limitem je potom nutnost přístupu k 3D tiskárně, na které je možné modely vytisknout, ale vzhledem k neustálému technologickému pokroku a rostoucímu důrazu na rozvoj digitálních kompetencí žáků lze očekávat, že 3D tiskárny budou v budoucnu stále častěji součástí školního vybavení. Tento trend podporuje i podkladová studie Národního pedagogického institutu České republiky, která upozorňuje na potřebu

⁶ Srovnání probíhalo v březnu 2025.

rozšiřování moderních technologií ve výuce a začlenění prvků digitální výroby do vzdělávacího procesu (NPI ČR, 2021).

Je nutné zmínit, že na digitálních modelech je i přes mnoho iterací stále co zlepšovat. Hlavním důvodem je fakt, že úprava modelů s vysokým stupněm detailů vyžaduje značnou výpočetní sílu, kterou počítač, na kterém byly modely vytvářeny nedisponuje. Jako součást rešerše byla testována i možnost vytváření digitálních modelů rostlinných pletiv pomocí umělé inteligence, konkrétně pomocí meshy.ai a hyper3d.ai. Výstupy těchto nástrojů však nebyly pro daný účel použitelné, jelikož generované modely vykazovaly výrazné chyby a neodpovídaly prostorové struktuře skutečných rostlinných pletiv. Důvodem těchto výstupů mohl být například nedostatek dostupných referencí na kterých byly tyto ai nástroje trénovány.

Finální modely rostlinných pletiv byly nahrány do digitální knihovny 3D modelů MakerWorld pod licencí CC BY-NC-ND 4.0. Odkaz na modely: <https://makerworld.com/en/collections/5941190-plant-tissue-models>

Ověření vzniklých modelů ve výuce je předmětem možného budoucího výzkumu.

Seznam použitých informačních zdrojů

- Abu Khurma, O., Ali, N., & Swe Khine, M. (2023). Exploring the impact of 3D printing integration on STEM attitudes in elementary schools. *Contemporary Educational Technology, 15*(4), ep458. <https://doi.org/10.30935/cedtech/13568>
- Ajoku, U., Hopkinson, N., & Caine, M. (2006). Experimental measurement and finite element modelling of the compressive properties of laser sintered Nylon-12. *Materials Science and Engineering: A, 428*(1–2), 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.05.019>
- Antel, M. (2020). *Vlastnosti polymerních materiálů vhodných pro technologii FDM*. [Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně]. Digitální knihovna UTB. <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/48780>
- Assante, D., Cennamo, G. M., & Placidi, L. (2020). 3D Printing in Education: an European perspective. In *2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, (s. 1133–1138). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDUCON45650.2020.9125311>
- Bagheri, A., & Jin, J. (2019). Photopolymerization in 3D Printing. *ACS Applied Polymer Materials, 1*(4), 593–611. <https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00165>
- Bokulich, A. (2011). How scientific models can explain. *Synthese, 180*(1), 33–45. <https://doi.org/10.1007/s11229-009-9565-1>
- Cartier, J., Rudolph, J., & Stewart, J. (2001). *The Nature and Structure of Scientific Models*. University of Wisconsin-Madison.
- Coasey, K. (2021). *Characterization of UV-curing resins for photo-curing 3D printing*. TA Instruments. <https://www.tainstruments.com/applications-notes/characterization-of-uv-curing-resins-for-photo-curing-3d-printing/>
- CONATEX-DIDACTIC Lehrmittel GmbH. (n.d.). *Anatomie rostlin – rostlinné buňky*. Conatex.cz. https://www.conatex.cz/catalog/biologie/botanika/anatomie_rostlin_rostlinne_bunk_y
- Crang, R., Lyons-Sobaski, S., & Wise, R. (2018). *Plant Anatomy: a Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77315-5>
- Dosedla, M., Hodis, Z., Jančová, M., Ledvinka, J., Lvovská, L., Malinka, K., Mísařová, D., Pitnerová, P., Schindler, V., Staněk, V., & Vodová, L. (2022). *Integrace technologie 3D tisku do výuky na základních a středních školách*. Masarykova univerzita.
- Fico, D., Rizzo, D., Casciaro, R., & Esposito Corcione, C. (2022). a Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials. *Polymers, 14*(3), 465. <https://doi.org/10.3390/polym14030465>
- Ford, S., & Minshall, T. (2019). Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing, 25*, 131–150. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>

- Frigg, R., & Hartmann, S. (2024). Models in science. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2024 Edition). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/>
- Geschwinder, J. (1987). *Metodika využití materiálních didaktických prostředků*. Státní pedagogické nakladatelství.
- Günster, J., & Zocca, A. (2018, 4. prosince). *Slurry based*. Euroceram. <https://euroceram.org/en/eu/slurry-based>
- Hevner, A., March, S., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *Management Information Systems Quarterly*, 28(1), 75–105.
- Horvath, J. C. (2014). *Mastering 3D printing*. Apress.
- Jančaříková, K. (2017). Modely v didaktice biologie. *Biologie. Chemie. Zeměpis*, 26(1), 2–22. <https://doi.org/10.14712/25337556.2017.1.1>
- Jarvis, M. C. (2012). Sclerenchyma. In *Encyclopedia of Life Sciences*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0002082.pub2>
- Jelínek, J., & Zicháček, V. (2014). *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. Nakladatelství Olomouc.
- Kincl, L., Kincl, M., & Jakrlová, J. (2008). *Biologie rostlin: pro 1. ročník gymnázií*. Fortuna.
- Knobloch, P. (2020). *Hodnocení použití 3D tisku*. In J. Šmída (Host), *3D tisk a zeměpis: Aneb vytiskni si krajinu kolem školy*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QROKWJ-As3I&t=141s>
- Leroux, O. (2012). Collenchyma: a versatile mechanical tissue with dynamic cell walls. *Annals of Botany*, 110(6), 1083–1098. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs186>
- Lhotský, S. (1962). *Cytologie a anatomie rostlin*. SPN.
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 117(15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- Lisk, K., & Cheung, J. J. (2024). a case study: exploring the impact of 3D printed models on cognitive integration during clinical skills training. *Canadian Medical Education Journal*, 15(6), 25–33. <https://doi.org/10.36834/cmej.78564>
- Maňák, J. (2007). Modelování kurikula. *Orbis Scholae*, 2(1), 40–53.
- Marek, M. (2013). *Molekulární modely ve výuce organické chemie na gymnáziu*. [Rigorózní práce, Univerzita Karlova]. Digitální repozitář UK. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/61264/>
- Matějka, J. (n.d.). *Botanika*. Skolato.cz. <https://skolato.cz/obchod/571-botanika>
- Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. (2007). *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. https://www.edu.cz/wp-content/uploads/2020/08/RVPG-2007-07_final.pdf

- Mokruša, O. (2023). *Vliv využití 3D modelů ve výuce na miskoncepce žáků o vrstevnicích*. [Diplomová práce, Univerzita Karlova]. Digitální repozitář UK. <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/185329/>
- MULTIP Moravia, s.r.o. (n.d.). *Učební pomůcky pro biologii*. Multip.cz. <https://www.multip.cz/ucebni-pomucky-pro-biologii>
- NPI ČR. (2021). *Člověk a technika: podkladová studie pro revize RVP ZV*. Národní pedagogický institut České republiky. https://www.npi.cz/images/podkladov%C3%A1_studie/clovek_a_technika.pdf
- Rambousek, V. (2014). *Materiální didaktické prostředky*. Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta.
- Schmidt, J., Dechet, M., Gomez Bonilla, J., Hesse, N., Bück, A., & Peukert, W. (2019). Characterization of Polymer Powders for Selective Laser Sintering. In *30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, (s. 779–789). University of Texas.
- Schwarz, C. v, & Gwekwerere, Y. N. (2007). Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. *Science Education*, 91(1), 158–186. <https://doi.org/10.1002/sce.20177>
- Schüler, P., Speck, T., Bührig-Polaczek, A., & Fleck, C. (2014). Structure-Function Relationships in *Macadamia integrifolia* Seed Coats – Fundamentals of the Hierarchical Microstructure. *PLoS ONE*, 9(8), e102913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102913>
- Shirazi, S. F. S., Gharehkhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Adib Kadri, N., & Osman, N. A. A. (2015). a review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/033502>
- Strítěský, O., Průša, J., & Bach, M. (2020). *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Prusa Research a.s.
- Švácha, P. (n.d.). *Botanické modely*. Školní-pomůcky.eu. <https://www.skolni-pomucky.eu/botanicke-modely/>
- Tian, H., Guo, H., Zhang, H., Zhang, T., Tang, Y., Ye, Z., Zhang, J., Yuan, G., Zhou, Q., Li, Y., Tao, C., Wang, D., Liu, J., He, B., Yin, Y., Liu, L., Shi, J., Hu, L., & Jiang, G. (2025). Toxicity of stereolithography 3D printed objects at the chemical level and strategies to improve biocompatibility. *Additive Manufacturing*, 101, 104715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104715>
- Valvez, S., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2022). Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts. *Polymers*, 14(13), 2564. <https://doi.org/10.3390/polym14132564>
- VISION marketing s.r.o. (n.d.). *Botanické modely*. SkolaMarket.cz. https://www.skolamarket.cz/Botanicke-modely-c4_72_2.htm

- Votrubová, O. (2010). *Anatomie rostlin*. Karolinum.
- Wilson, K. J., Long, T. M., Momsen, J. L., & Bray Speth, E. (2020). Modeling in the Classroom: Making Relationships and Systems Visible. *CBE—Life Sciences Education*, 19(1), fe1. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0255>
- Wimsatt, W. C. (1987). False Models as Means to Truer Theories. In M. H. Nitecki & A. Hoffman (Eds.), *Neutral Models in Biology*. Oxford University Press.
- Wiria, F. E., Leong, K. F., Chua, C. K., & Liu, Y. (2007). Poly- ϵ -caprolactone/hydroxyapatite for tissue engineering scaffold fabrication via selective laser sintering. *Acta Biomaterialia*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2006.07.008>

Vyjádření k využití nástrojů umělé inteligence

K tvorbě bakalářské práce byly použity nástroje umělé inteligence za účelem vyhledávání zdrojů (Chat GPT-4o, Perplexity AI), překladu zahraničních zdrojů (Chat GPT-4o, Google Translate), na pomoc s parafrázováním a formulací textů v *kapitolách 1.1, 1.2, 2.3 a 3* (Chat GPT-4o) a na kontrolu dodržení citační normy v seznamu použité literatury (Chat GPT-4o).

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Fázový diagram procesu designování modelů rostlinných pletiv	27
Obrázek 2 – Proces modelování krychle s kulovitým výřezem v programu Blender	30
Obrázek 3 – Proces modelování řezu složenou krychlí v programu Blender.....	31
Obrázek 4 – Vytisknutý model první generace rohového kolenchymu.....	31
Obrázek 5 – Proces modelování ortického tetraikadekahedronu v aplikaci OnShape	32
Obrázek 6 – Proces modelování řezu uskupením ortických tetraikadekahedronů v programu Blender.....	32
Obrázek 7 – Vytisknutý model první generace obecné struktury kolenchymatického pletiva	33
Obrázek 8 – Proces modelování sítě z koulí spojených výběžky v programu Blender.....	34
Obrázek 9 – Proces modelování konečného modelu aktinenchymu v programu Blender..	34
Obrázek 10 – Vytisknutý model první generace aktinenchymu.....	35
Obrázek 11 – Proces modelování vlákna vytvořeného z kulovitého polygonu v programu Blender.....	36
Obrázek 12 – Proces skládání vymodelovaných vláken v programu Blender	37
Obrázek 13 – Vytisknutý model první generace sklerenchymatických vláken.....	37
Obrázek 14 – Proces modelování nepravidelného elipsoidu v programu Blender.....	38
Obrázek 15 – Proces skládání nepravidelných elipsoidů v programu Blender	39
Obrázek 16 – Vytisknutý model druhé generace obecné struktury kolenchymatického pletiva	40
Obrázek 17 – Proces modelování aktinenchymu pomocí metaballs v programu Blender..	41
Obrázek 18 – Vytisknutý model druhé generace aktinenchymu	41
Obrázek 19 – Vytisknutý model druhé generace sklerenchymatických vláken	43
Obrázek 20 – Vytisknutý model druhé generace obecné struktury parenchymatického pletiva	44
Obrázek 21 – Vytisknutý model třetí generace aktinenchymu.....	44
Obrázek 22 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na řezu modelu sklerenchymatických vláken v programu Blender	45
Obrázek 23 – Vytisknutý model třetí generace sklerenchymatických vláken.....	46

Obrázek 24 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na zvětšeném řezu modelu obecné struktury parenchymatických buněk v programu Blender	47
Obrázek 25 – Vytisknutý model třetí generace obecné struktury parenchymatického pletiva	48
Obrázek 26 – Proces modelování drážek představujících buněčné stěny na vyhlazeném modelu aktinenchymu v programu Blender	48
Obrázek 27 – Vytisknutý model čtvrté generace aktinenchymu	49