



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

VYBRANÉ TECHNICKÉ VÝZVY

POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ 4.0

SELECTED TECHNICAL CHALLENGES OF CIVIL ENGINEERING 4.0

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Bečkovský Ph.D.

BRNO 2023

Klíčová slova

Pozemní stavitelství 4.0, technologické inovace, digitální transformace, udržitelné stavební materiály, 3D tisk v stavebnictví, BIM, automatizace, energetická efektivita, zelený design, aditivní výrobní technologie, IoT, internet věcí, virtuální realita, rozšířená realita.

Key words

Civil Engineering 4.0, technological innovations, digital transformation, sustainable building materials, 3D printing in construction, BIM, automation, energy efficiency, green design, additive manufacturing technologies, IoT, internet of things, virtual reality, augmented reality.

OBSAH

1.	Klíčové technologie v Pozemním stavitelství 4.0.....	9
1.1.	Strojní učení a umělá inteligence	9
	Internet věcí (IoT) ve stavebnictví	13
1.2.	Drony a jejich využití v monitoringu a inspekci	14
1.3.	Virtuální realita a rozšířená realita v projektování a výstavbě	18
1.4.	Zelené střechy a fasády: Inovace a udržitelnost v moderním stavitelství ..	21
1.5.	3D tisk v pozemním stavitelství.....	26
2.	Digitální transformace ve stavebnictví.....	36
2.1.	BIM (Building Information Modeling) a jeho význam	36
2.2.	Cloudové technologie a jejich role ve stavitelství 4.0	37
2.3.	Big Data a analýza dat v optimalizaci stavebních procesů	38
2.4.	Parametrizace návrhu a procesů.....	39
3.	Výzvy a příležitosti v Pozemním stavitelství 4.0	41
3.1.	Ekonomické výhody a rizika spojená s technologickou transformací	41
3.2.	Nové požadavky na odborné dovednosti pracovníků ve stavebnictví	45
3.3.	Etické a právní aspekty digitalizace	47
4.	Příklady úspěšných implementací technologií	50
4.1.	IoT a senzorové sítě pro stavební aplikace.....	50
4.2.	Zelené střechy a fasády.....	53
4.3.	Aplikace virtuální a rozšířené reality	77
4.4.	Parametrický návrh a digitální dvojče	86
4.5.	Prefabrikace a aditivní výroba.....	94
5.	Budoucnost pozemního stavitelství 4.0	105
5.1.	Projekty pozemního stavitelství 4.0 na VUT v Brně	105
6.	Přehled zkratk a symbolů	112
7.	Seznam použitých zdrojů	113
8.	Významné původní výsledky	117

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci, nazvanou "Vybrané technické výzvy Pozemního stavitelství 4.0", zpracoval samostatně, přičemž jsem vycházel z vlastního výzkumu a znalostí získaných v průběhu let.

Konzultace s odborníky a revize literárních zdrojů, včetně odborných publikací a případových studií, byly provedeny s nejvyšším respektem k akademické integritě a etickým standardům vědecké práce. Veškeré zdroje a příspěvky třetích stran, ať už přímé nebo nepřímé, byly řádně citovány a uvedeny v seznamu literatury. Další literatura zde necitovaná je součástí dílčích autorských článků.

Tímto potvrzuji pravdivost a originalitu obsahu mé práce a zavazuji se, že jsem v souladu s etickými principy akademického prostředí nepoužil žádné nepovolené materiály nebo prostředky.

V Brně dne 4. 12. 2023

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Poděkování

Rád bych zde poděkoval hlavně mé rodině, manželce a dceři především. Terezko a Barunko, bez vás bych to nezvládl. Obě jste mi byly obrovskou oporou během psaní. I když jsem kvůli práci málokdy byl brzo doma a málo trávil čas s vámi, vaše pochopení a povzbuzování znamenalo moc. A ty, moje Barunko, i když jsi s tatínkem často nemohla hrát, vždycky jsi na mě byla hodná a říkala, až budu mít hotovo. Právě pro vás dvě jsem to chtěl dokončit. Děkuji, že jste mi věřily. Bez vás by to rozhodně nešlo. Jste moje největší motivace, děkuji.

Rád bych touto cestou taky poděkoval svým kolegům z Ústavu pozemního stavitelství za skvělou spolupráci a dodnes za inspirativní diskuze. Děkuji všem za jejich odborné rady a pomoc při řešení různých problémů. Ale také za to, že naše diskuze nebyly pouze o práci, ale často i o osobních tématech. Jsem vděčný za možnost spolupráce s tak kvalitním týmem odborníků. Díky za vaši podporu během mého působení na ústavu.

I přesto, že jsem již všem děkoval v předchozím odstavci, chtěl bych poděkovat zvlášť vedení Ústavu za to, že umožnilo realizovat zajímavé experimentální projekty přímo v prostorách ústavu. Ocenil jsem, že vedení bylo vždy ochotné naslouchat nápadům a otevřeně diskutovat o různých tématech spojených nejen s digitalizací a budoucím rozvojem ústavu. Díky této podpoře jsem mohl ověřovat nové technologie a postupy ihned a přímo v praxi. Vedení mi věřilo a nechávalo volnost v práci. To je přínosné nejen pro výzkum, ale i pro osobní rozvoj všech zúčastněných. Děkuji za prostor k realizaci vizí a možnost podílet se takto na budoucnosti ústavu, není to všude samozřejmostí.

V Brně dne 4. 12. 2023

Ing. David Bečkovský, Ph.D

Bibliografická citace práce:

BEČKOVSKÝ, David. Vybrané technické výzvy pozemního stavitelství 4.0. Brno, 2023. 118 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

1. Úvod

Pozemní stavitelství 4.0 je termín, který odkazuje na současnou éru stavebnictví, charakterizovanou integrací digitálních technologií do všech aspektů stavebního procesu. Tento koncept vychází z širšího rámce Průmyslu 4.0, který zahrnuje automatizaci, využití dat, konektivitu a využití pokročilých technologických řešení, jako jsou umělá inteligence, internet věcí, 3D tisk, virtuální a rozšířená realita.

V posledních dvou desetiletích došlo k zásadnímu posunu od tradičních stavebních metod k moderním technologickým postupům. Tento vývoj zahrnuje přechod od ručních nástrojů a analogových procesů k sofistikovaným digitálním nástrojům a automatizaci. Významnými milníky v tomto vývoji jsou zavedení CAD systémů, vývoj BIM technologií a nedávný vzestup technologií, jako je 3D tisk, robotická automatizace a rozšířená realita. S využitím pokročilých datových analýz, strojového učení a IoT technologií, se stavební průmysl transformuje, což umožňuje lepší plánování, sledování a správu stavebních projektů, což vede k vyšší kvalitě, udržitelnosti a bezpečnosti staveb.

Kromě teoretického zkoumání klíčových technologických výzev v Pozemním stavitelství 4.0, tato práce přináší konkrétní autorské případové studie z let 2015 až 2023, demonstrující reálné aplikace inovativních technologií. Mezi tyto příklady patří senzory pro stavební aplikace, které transformují sledování konstrukcí, zelené střechy a fasády přinášející výhody pro udržitelnost a energetickou efektivitu, aplikace rozšířené reality pro lepší vizualizaci a plánování projektů, parametrický návrh a využití digitálních dvojčat pro optimalizaci návrhů, a v neposlední řadě digitální fabrikaci. Tyto příklady společně poskytují komplexní pohled na vývoj stavebnictví v současné éře a zdůrazňují potenciál těchto technologií k dosažení udržitelnějšího a efektivnějšího stavebního průmyslu.

Stavebnictví jako takové má dlouhou a rozmanitou historii, sahající od jednoduchých stavebních technik používaných v pradávných civilizacích po komplexní inženýrské projekty dnešní doby. Historie stavebnictví je příběhem neustálého pokroku a inovace, kde každé období přineslo nové materiály, techniky a technologie, které formovaly způsob, jakým dnes stavíme.

Klíčové technologie v Pozemním stavitelství 4.0

- Strojní učení a umělá inteligence
- Internet věcí (IoT) ve stavebnictví
- Drony a jejich využití v monitoringu a inspekci
- Virtuální realita a rozšířená realita v projektování a výstavbě
- Zelené střechy a fasády: Udržitelnost v moderním stavitelství
 - 3D tisk v pozemním stavitelství

"Robots can do our work, but they can't do our passion."

Simon Sinek

1. Klíčové technologie v Pozemním stavitelství 4.0

V současném období prochází pozemní stavitelství významnou transformací, zásadně ovlivněnou rychlým rozvojem technologií. Tato kapitola se zaměřuje na klíčové technologie, které stojí v čele revoluce v oblasti Pozemního stavitelství 4.0, a objasňuje jejich roli a potenciál v moderním stavebnictví. Strojní učení a umělá inteligence přinášejí pokročilé analytické schopnosti a optimalizaci procesů, zatímco Internet věcí (IoT) transformuje způsob, jakým jsou stavební projekty monitorovány a řízeny. Drony se stávají nepostradatelnými pro monitoring a inspekci staveb, poskytují přesné a dostupné způsoby pro sběr dat a vizualizaci stavu projektů. Virtuální a rozšířená realita otevírají nové dimenze v projektování a výstavbě, umožňujíce návrhářům a inženýrům lépe vizualizovat a simulovat stavební projekty. Zelené střechy a fasády představují inovativní a udržitelný přístup k designu budov, který reaguje na ekologické výzvy a zvyšuje biodiverzitu v městských prostředích. A konečně, 3D tisk v pozemním stavitelství přináší revoluci v metodách výstavby, nabízí rychlost, efektivitu a flexibilitu v tvorbě komplexních struktur. Tato kapitola nabízí základní pohled na tyto technologie, jejich aplikace a budoucí potenciál pro inovace a zlepšení ve stavebním průmyslu [1][3][4][5]

1.1. Strojní učení a umělá inteligence

Pro úspěšnou digitalizaci pozemního stavitelství se strojní učení (ML) a umělá inteligence (AI) stávají klíčovými technologiemi, které radikálně transformují toto odvětví. Tato kapitola se zaměřuje na vysvětlení a prozkoumání rolí a vlivu strojního učení a AI ve stavebnictví, přičemž zdůrazňuje jejich potenciál v přinášení inovací, zlepšení efektivity a podpoře udržitelných stavebních procesů. Strojní učení, jakožto metoda, která umožňuje systémům učit se a vylepšovat se z dat bez explicitního programování, nabízí stavebním inženýrům a projektantům nástroje pro efektivnější a přesnější rozhodování. AI, která zahrnuje širší spektrum technologií simulujících lidskou inteligenci, se stává základem pro automatizaci, prediktivní analýzy a komplexní modelování stavebních procesů [2][4]

Strojní učení (Machine Learning, ML)

Strojní učení, podoblast umělé inteligence, zahrnuje algoritmy, které se učí z dat a vylepšují se s časem bez explicitního programování. Ve stavebnictví může strojní učení pomoci v předpovídání chování materiálů, optimalizaci projektových plánů, detekci chyb v konstrukčních plánech, a dokonce i při analýze rizik projektu. Algoritmy strojního učení mohou analyzovat obrovské množství dat z různých zdrojů, jako jsou senzory na staveništi, historické údaje o projektech nebo klimatické podmínky, a na základě toho poskytovat cenné přehledy pro zlepšení efektivity a snížení nákladů.

Umělá inteligence (Artificial Intelligence, AI)

Umělá inteligence je širší termín, který odkazuje na simulaci lidské inteligence v počítačích. Ve stavebnictví AI může zahrnovat aplikace jako automatizované rozhodování, vizuální rozpoznávání a pokročilé modelování chování systémů. AI může pomoci v časném rozpoznání potenciálních konstrukčních problémů, zlepšení bezpečnosti na staveništi prostřednictvím monitorování a analýzy chování pracovníků a strojů, a v automatizaci náročných nebo opakujících se úloh. AI také umožňuje integraci různých aspektů stavebního procesu, od návrhu až po provoz budovy, což vede k efektivnějšímu a udržitelnějšímu stavebnímu průmyslu.



Obr. 1) Tak jak vidí pojem umělá inteligence ve stavebnictví sama umělá inteligence DALL-E (zdroj: autor + <https://chat.openai.com>)

Oba tyto pojmy přinášejí do stavebnictví nové možnosti pro zvýšení efektivity, snížení nákladů, zlepšení bezpečnosti a podporu udržitelných stavebních praxí. Díky pokročilým analytickým schopnostem strojního učení a AI, je možné lépe porozumět a řídit složité stavební procesy, což vede k inovativním řešením v moderním stavitelství, včetně [5][6]:

- **Prediktivní údržba**

Algoritmy strojního učení lze použít k analýze dat ze senzorů strojů a zařízení na staveništi, což umožňuje předvídat potřebu údržby a předejít poruchám.

- **Automatizovaná kontrola kvality**

Systémy AI mohou analyzovat fotografie a videa ze staveništi, aby identifikovaly problémy v kvalitě a bezpečnosti.

- **Optimalizace plánování a logistiky**

AI algoritmy mohou analyzovat obrovské množství dat k optimalizaci časových harmonogramů projektů a logistiky materiálů.

- **Analýza rizik projektu**

AI může být využita k identifikaci potenciálních rizik a nákladů spojených s různými aspekty stavebního projektu.

- **Design a modelování**

Strojní učení umožňuje pokročilou analýzu návrhů a modelů pro zjištění nejefektivnějších řešení a optimalizaci využití prostoru.



Obr. 2) Detekce osob a předmětů na staveništi z bezpečnostních kamer pomocí AI a strojového učení [2]



Obr. 3) Společnost AGMIS vyvinula počítačové vidění pro zlepšení bezpečnosti pracovníků v nebezpečných pracovních podmínkách. Toto řešení, umožňuje monitorovat záznamy z bezpečnostních kamer a identifikovat bezpečnostní vybavení jako ochranné helmy, vesty, brýle a boty. (zdroj: <https://agmis.com>)

Transformace stavebnictví skrze AI je umožněna díky čtyřem zásadním technologiím, které se stávají klíčovými pilíři tohoto procesu. Tyto technologie nejenže představují základ pro integraci umělé inteligence do stavebního sektoru, ale také přinášejí nové možnosti a výzvy, které mění tradiční přístupy ve stavebnictví [2]:

- cloudový software,
- pracovní postupy využívající mobilní technologie,
- kamery na staveništi,
- inspekční drony.

Očekává se, že aplikace AI ve stavebnictví poroste vysokým tempem, na což ukazují každoroční odhady růstu trhu AI ve stavebnictví [1][2].

- V roce 2018 byl globální trh AI ve stavebnictví 429 milionů USD. Očekávání byla, že toto číslo dosáhne 4,5 miliardy USD pro rok 2026 [2].
- Dnes se očekává, že velikost trhu s AI ve stavebnictví dosáhne v letošním roce 2023 hodnoty 3,21 miliardy USD a poroste již s průměrnou roční mírou růstu (CAGR) 24,31 %, čímž dosáhne 9,53 miliardy USD do roku 2028 [1].

Internet věcí (IoT) ve stavebnictví

V oblasti stavebnictví přináší moderní technologie senzorů a Internet věcí (IoT) revoluční změny, které transformují civilní infrastrukturu. Využití chytrých zařízení a IoT otevírá cestu k chytré a udržitelné infrastruktuře, zvyšuje efektivitu stavebního sektoru v celém hodnotovém řetězci, od výroby stavebních materiálů po údržbu. Aplikace IoT v oblasti stavebního inženýrství zahrnují různé systémy, jako jsou budovy, silnice a kanalizace, a mají za cíl zlepšit komfort obyvatel, snížit náklady a zvýšit bezpečnost.

Chytré budovy využívají IoT k automatizaci svého provozu. Pomocí senzorů, aktuátorů a mikročipů, které shromažďují data pro zpracování podle funkčních požadavků budovy, lze optimalizovat energetickou efektivitu a minimalizovat environmentální dopad. Tyto budovy nabízejí lepší správu majetku, včetně energetické efektivity a teplotní regulace. Příklady zahrnují chytré kancelářské budovy, nemocnice a vzdělávací zařízení [7].

Základem chytrých budov byly v počátečním výzkumu modernizované senzory a integrované systémy, které umožňovaly vzdálenou a efektivní komunikaci mezi vnějšími a vnitřními systémy. Tento pokrok ve vývoji IoT a senzorových technologií neustále posouvá hranice možností v oblasti stavebnictví a infrastruktury.



Obr. 4) Wiiste WM1-WAN IoT senzor vlhkosti dřeva, vyvinutý společnostmi Wiiste a Stora Enso, je IoT vlhkoměr určený k zajištění suchého řetězce dřeva (zdroj: <https://www.wiiste.com>)

Analýza historických dat z IoT zařízení může vést k lepším rozhodnutím pro budoucí projekty. Sběr dat v průběhu stavebních procesů poskytuje základ pro komplexní analýzy, které umožňují vyhodnocovat kvalitu materiálů, efektivitu týmů a strojů, a podporují optimalizaci stavebních postupů a procesů.

Neinvazivní IoT senzory jsou efektivním nástrojem pro dohled nad stavem výstavby. Pomáhají udržet optimální vnitřní prostředí a tím předcházet vzniku plísní, jak během výstavby, tak i po jejím dokončení. Sledování klíčových parametrů jako teploty a vlhkosti může zabránit poškození a zbytečným zdržením. Senzory také monitorují pnutí, praskliny a vibrace konstrukcí, což pomáhá zachovat celkovou kvalitu stavby. Tato data, shromažďovaná online, mohou být využita nejen pro současnou kontrolu, ale i pro budoucí dokazování podmínek výstavby, například při reklamacích [4][5].

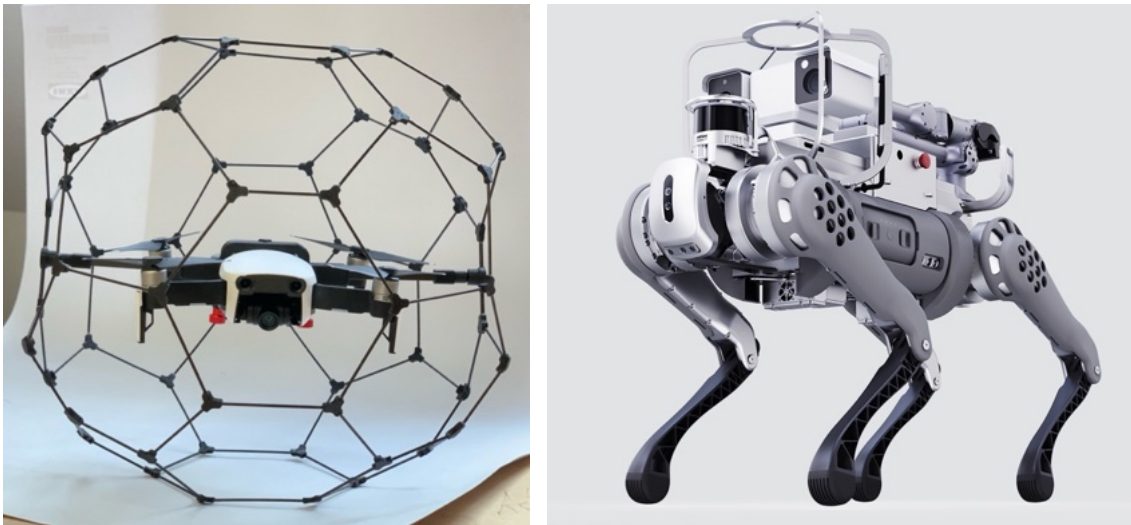
1.2. Drony a jejich využití v monitoringu a inspekci

V posledních letech se drony staly nepostradatelným nástrojem v oblasti stavebního inženýrství, zejména v monitoringu a inspekci stavenišť. Díky své schopnosti bezpečně a efektivně získávat data z výšky nabízejí drony jedinečnou perspektivu, která byla dříve nedosažitelná nebo vyžadovala nákladné a časově náročné metody. Tato kapitola se zaměřuje na rozmanité aplikace dronů v stavebnictví, od fotogrammetrie a 3D mapování po monitorování bezpečnosti a pokroku stavenišť.



Obr. 5) Výhodou dronů, je možnost kontroly těžko dostupných míst ve výškách. Na obrázku dron Elios 2 Flyability [3]

Drony přinášejí revoluční změny v způsobu, jakým inženýři a projektanti shromažďují a analyzují data. Nejenže umožňují rychlejší a bezpečnější sběr dat, ale také poskytují nástroje pro pokročilou vizualizaci a modelování stavenišť. Inspekce pomocí dronů umožňuje identifikovat potenciální strukturální problémy, monitorovat stav konstrukcí a poskytovat důležité informace pro udržování a opravy. Využití dronů také zvyšuje efektivitu prací a snižuje potenciální rizika spojená s prací ve výškách nebo na obtížně přístupných místech [3].



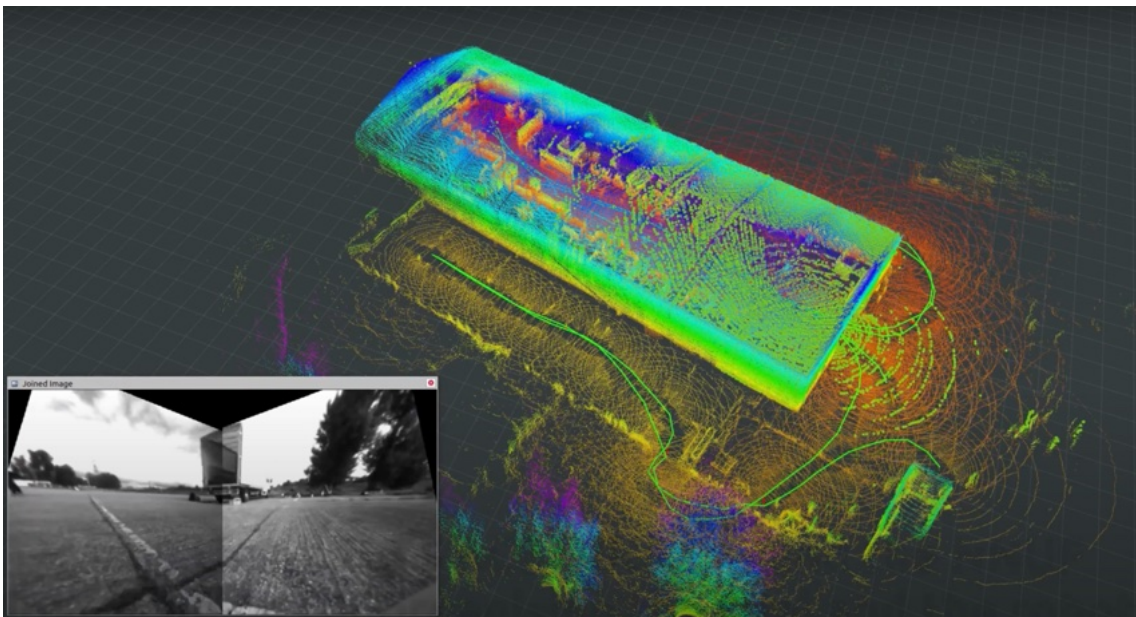
Obr. 6 a 7) Vlevo bezpilotní dron (UAV) DJI Mavic Air v ochranné kleci pro inspekci v místech s rizikem kolize (zdroj: autor). Vpravo čtyřnohý autonomní robot pro stavební inspekci s instalovaným LiDAR skenerem a multispektrální kamerou na rameni (zdroj: www.unitree.com)

Čtyřnozí roboti, jako je Spot od Boston Dynamics, Unitree GO2 nebo ANYmal, nabízejí nové možnosti pro inspekci a sledování staveb v rámci stavebnictví 4.0. Tito roboti mohou automaticky sbírat data, jako jsou vizuální záznamy a měření, což umožňuje pracovníkům se zaměřit na komplexnější úkoly, které vyžadují lidskou expertízu. Roboti mohou navigovat po staveništi, identifikovat potenciální problémy, a tím přispívat k efektivnějšímu a bezpečnějšímu stavebnímu procesu. Navíc umožňují dálkovou inspekci, což může být užitečné v případě, že inspektor nemůže být přítomen na místě. Tato partnerství mezi roboty a lidmi slibují zlepšení v rychlosti, přesnosti a celkové efektivitě procesů inspekce a sledování ve stavebnictví [5][6][7].

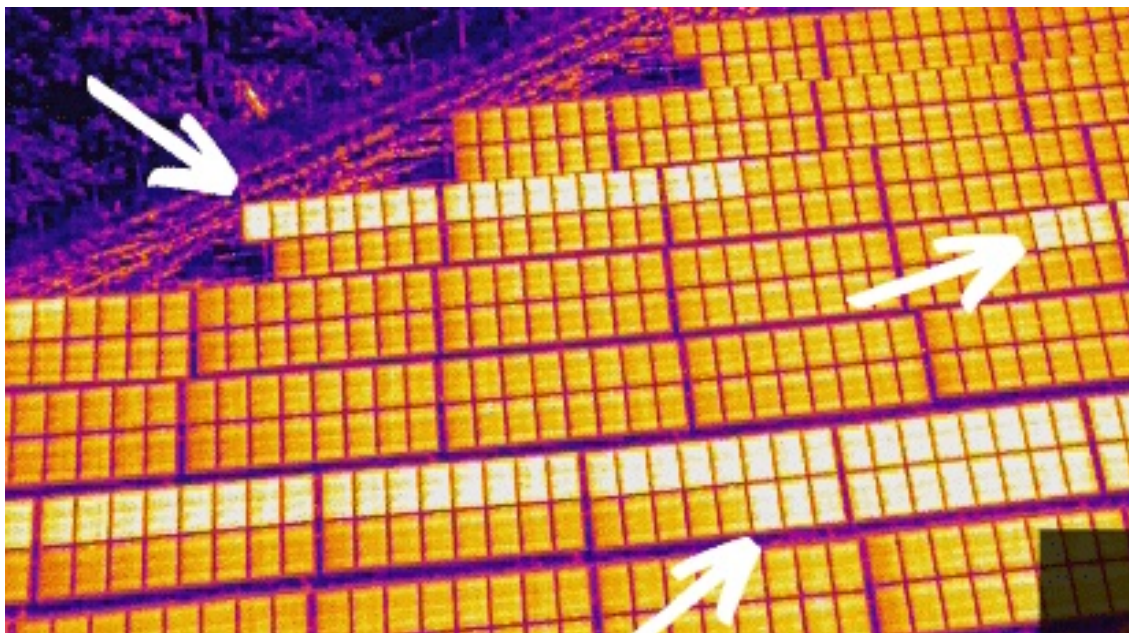


Obr. 8) Mezi klíčové schopnosti robota ANYmal patří zpětnovazební učení, umožňující robustní manévrování a to i ve vícepodlažních průmyslových zařízeních. (zdroj: <https://www.anybotics.com>)

Na základě integrace AI lze očekávat významný rozvoj čtyřnohých robotů ve stavebnictví. Umělá inteligence umožní robotům lépe rozpoznávat materiály, navazovat komunikaci s lidmi a plnit jejich pokyny. To vše usnadní částečnou substituci lidské práce a zmírnění nedostatku pracovní síly ve stavebnictví.

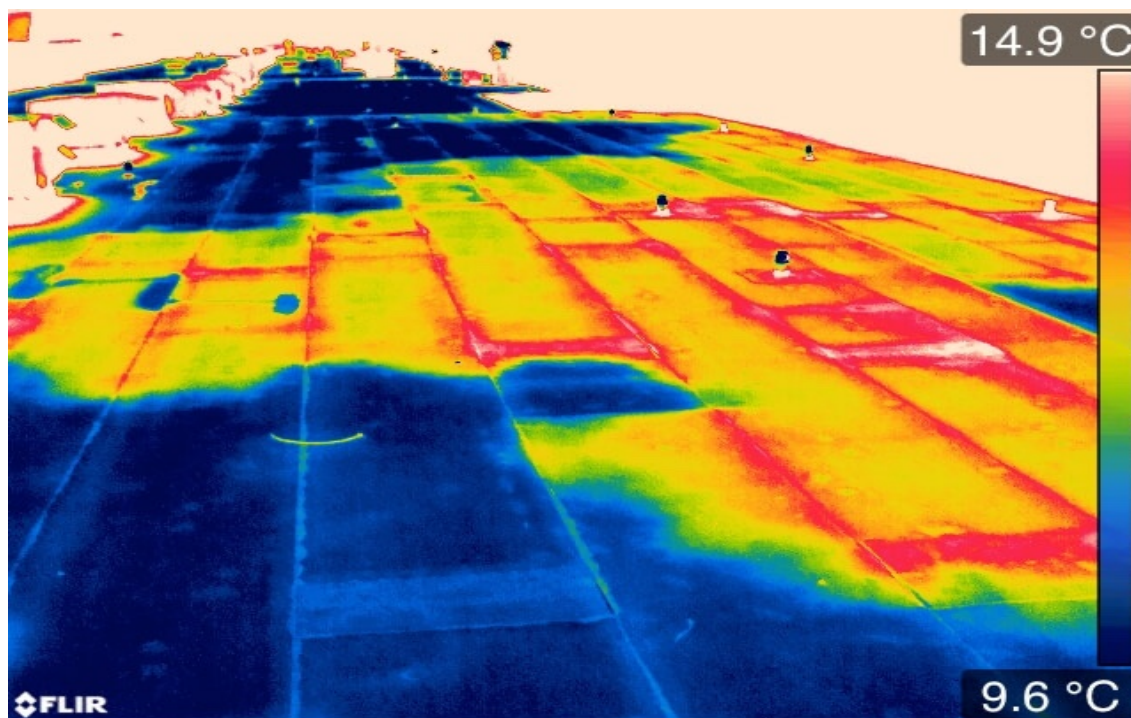


Obr. 9) Mapování průmyslového objektu pomocí čtyřnohého robota Boston Dynamics s integrovaným LiDAR skenerem (zdroj: <https://ori.ox.ac.uk/labs/drs>)



Obr.10) Detekce chybných stringů u FV elektrárny, takto komplexní pohled je možný z důvodu využití UAV dronů vybavených termovizní kamerou [9].

Infračervená termografická kontrola střech pomocí dronů je ověřenou metodou pro odhalení problémů s vlhkostí uvnitř plochých střech. Odhalení problémů ve fázi jejich vzniku umožňuje provést nezbytné kroky včas a efektivně.



Obr. 11) Infračervená termografická inspekce střechy je ověřenou metodou pro detekci problémů s vlhkostí uvězněnou v plochých střechách [10]

1.3. Virtuální realita a rozšířená realita v projektování a výstavbě

Virtuální a rozšířená realita představují jednu z nejdynamičtější se rozvíjejících oblastí informačních technologií, která se stále více uplatňuje také ve stavebnictví. VR/AR řešení umožňují virtualizovat jednotlivé fáze projektování, výstavby i údržby staveb a procesy optimalizovat. Jak ukazují dosavadní aplikace využívající VR/AR, přinášejí tyto technologie celou řadu výhod souvisejících zejména s lepší vizualizací, koordinací prací, monitoringem staveb či vzděláváním. Následující kapitoly se blíže zaměřují na konkrétní oblasti, ve kterých již VR/AR nalézají uplatnění v projektování, realizaci i údržbě staveb. Cílem je představit potenciál těchto moderních technologií pro efektivnější a kvalitnější procesy ve stavebnictví.

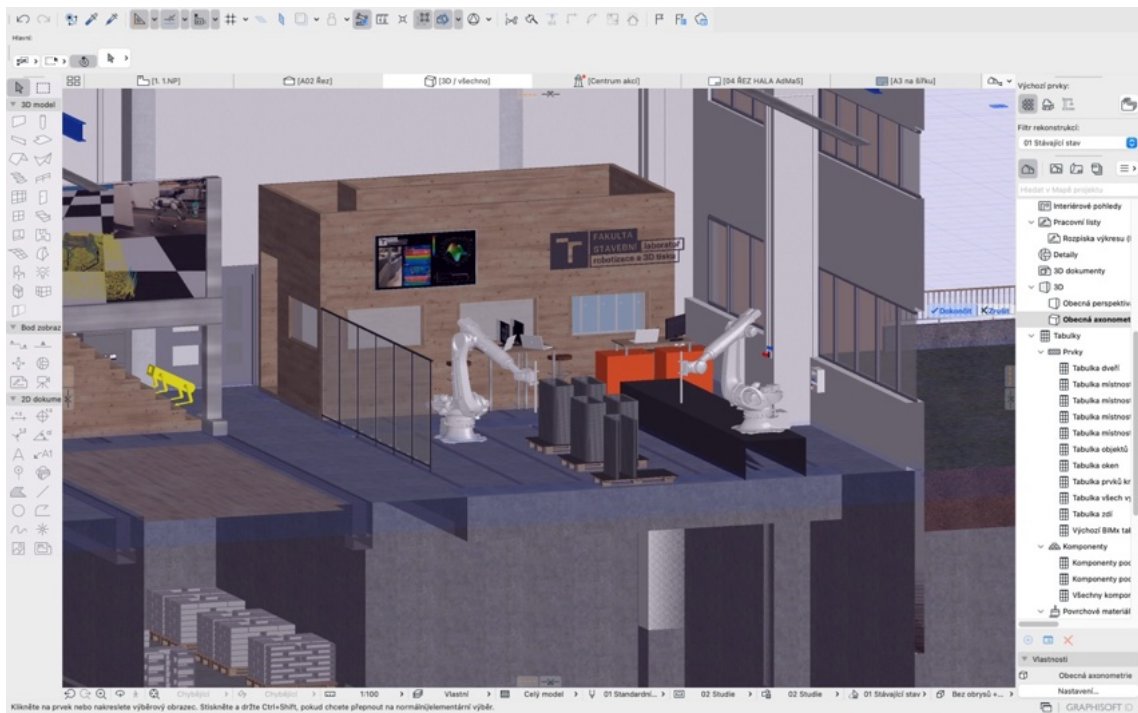
Aplikace virtuální reality (VR) a rozšířené reality (AR) v projektování a výstavbě se stává stále více významnou, a platforma Arkio je jedním z příkladů, jak tyto technologie mohou být využity. Arkio umožňuje návrh interiérů, budov a prostředí přímo rukama uživatelů, kombinuje realitu a nabízí zážitky z designových možností přímo na místě. Umožňuje spolupráci kdekoli pomocí VR, desktopu a mobilních zařízení. Uživatelé mohou pracovat s lidmi z celého světa pomocí VR, desktopů, telefonů a tabletů, zkoušet nové nápady, zažívat designy v rozšířené realitě, označovat existující modely Revit a Rhinoceros 3D, prezentovat designové možnosti, diskutovat a rozhodovat.



Obr. 11) Arkio nabízí rozšíření pro Revit, BIM 360 / Autodesk Construction Cloud, Rhino, SketchUp a Unity, takže můžete revidovat stávající modely napřímo (zdroj: <https://www.arkio.is>).

Platforma Arkio je příkladem jak může být technologie VR a AR použita v architektuře a stavitelství pro zjednodušení a zefektivnění návrhových a výstavbových procesů.

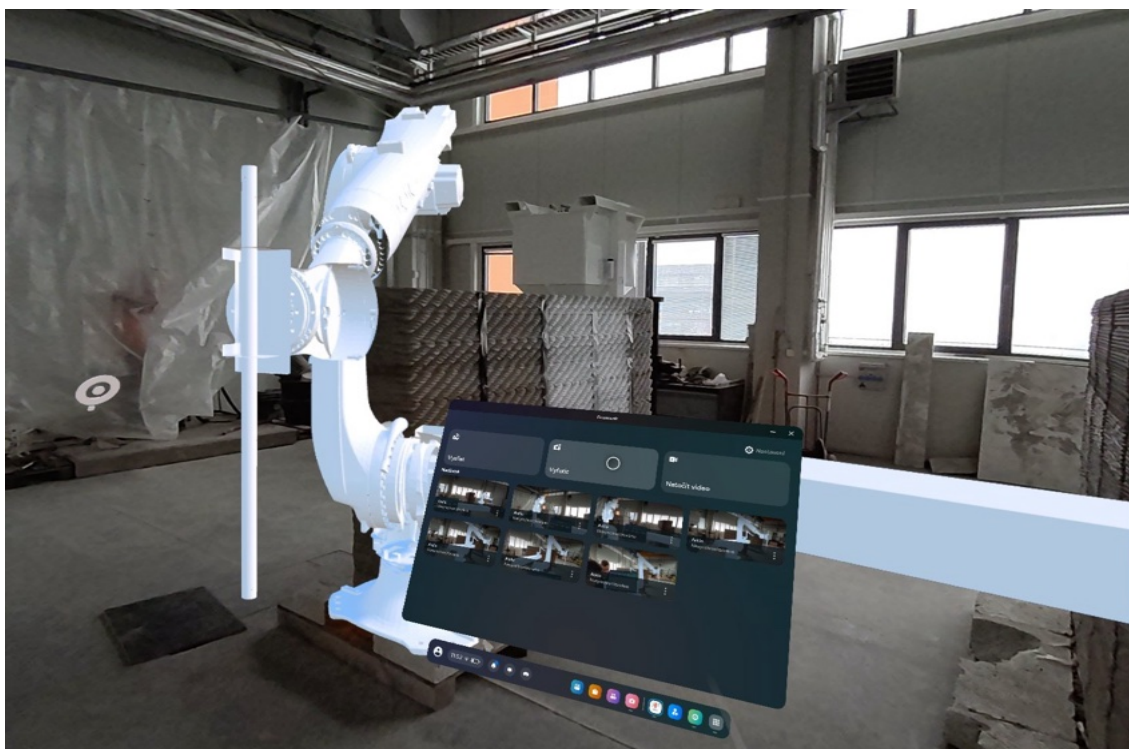
Jako konkrétní příklad aplikace technologií BIM, AR a MR lze uvést projekt dovybavení Laboratoře robotizace a 3D tisku v Centru AdMaS.



Obr. 12) Laboratoř robotizace a 3D tisku v BIM, prostředí Archicad (zdroj: autor)

Nejprve byl v programu Archicad vytvořen kompletní 3D model haly P1 včetně veškeré technické infrastruktury. Ten obsahoval modely navrhovaných robotů a jejich pracovních prostorů.

Následně byl model exportován do prostředí Arkio a prohlížen pomocí brýlí rozšířené reality Meta Quest 3. Pomocí gest bylo také testováno přesunování virtuálních objektů a zkoušela se různá varianta rozmístění. Technologie AR/MR tak umožnily optimalizovat návrh dovybavení laboratoře ještě před výběrem dodavatele a dodávkou zvolených komponent. Klíčovou výhodou ověřování návrhu pomocí rozšířené reality byla možnost projít si celou scénu laboratoře v měřítku 1:1. Díky tomu bylo nejen ověřeno prostorové uspořádání, ale také například to, zda zvolené průchody mezi jednotlivými stroji budou dostatečně široké pro pohyb personálu či přenos materiálů.



Obr. 13) Laboratoř robotizace a 3D tisku v BIM, prostředí Archicad (zdroj: autor)

Navíc bylo možné simulovat pohyb ve virtuální laboratoři a ověřit tak ergonomii řešení. Klíčovou přidanou hodnotou tohoto přístupu byla právě možnost pohybovat se v laboratoři v reálných měřítkách ještě před její realizací.



Obr. 14) Laboratoř robotizace a 3D tisku v BIM, prostředí Archicad (zdroj: autor)

1.4. Zelené střechy a fasády: Inovace a udržitelnost v moderním stavitelství

V současném trendu udržitelného stavitelství hrají zelené střechy a fasády stále důležitější roli jako klíčové prvky inovativního a ekologicky šetrného designu budov. Tato kapitola se zaměřuje na prozkoumání různých aspektů zelených střech a fasád, od jejich environmentálních přínosů, jako je snížení městského tepelného ostrova, zlepšení kvality vzduchu a podpora biodiverzity, až po jejich přínosy pro energetickou efektivitu a estetiku budov. V moderním stavebnictví nejsou zelené střechy a fasády pouze vizuálně přitažlivé, ale představují i funkční a udržitelné řešení pro městské prostředí, které se potýká s výzvami spojenými s klimatickými změnami a rostoucí urbanizací [11][12][13].

Zelené střechy a fasády představují koncept zakládání vegetace na střešních plochách a exteriérových stěnách budov. Jejich základní principy a definice zahrnují:

- **Extenzivní systémy**

Tyto systémy jsou navrženy tak, aby vyžadovaly minimální údržbu. Extenzivní zelené střechy jsou obvykle osázeny odolnými rostlinami, jako jsou rozchodníky, sukulenty, traviny a byliny, které vydrží extrémní povětrnostní podmínky. Extenzivní zelené fasády často využívají popínavé rostliny. Výška substrátu na těchto střeších je obvykle nižší, což omezuje hmotnost a zjednodušuje konstrukci.

- **Intenzivní systémy**

Tyto systémy připomínají tradiční zahrady s širokou škálou rostlin, keřů a dokonce malých stromů. Vyžadují pravidelnou údržbu, zavlažování a úpravu půdy. Intenzivní zelené střechy poskytují větší prostor pro rekreaci a estetické využití a mohou podporovat větší biodiverzitu.

- **Polointenzivní systémy**

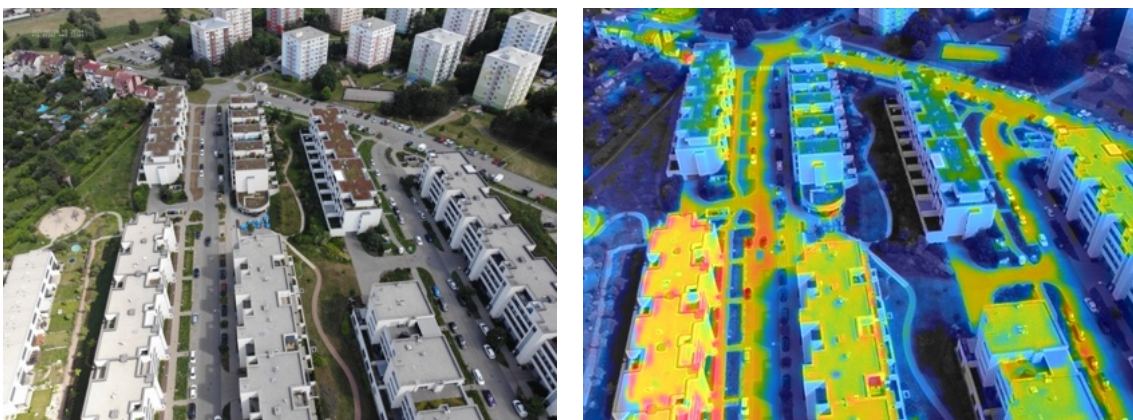
Tyto systémy kombinují prvky extenzivních a intenzivních zelených střech. Mohou zahrnovat různé typy vegetace, od nízkého krytu po vyšší keře, a nabízejí střední úroveň údržby a biodiverzity.



Obr. 15) Biodiverzní střecha objektu budovy Klinikum II v Basileji, Švýcarsko (zdroj: Selník, P., 2015)

Environmentální přínosy a udržitelnost

V období narůstajících environmentálních výzev se stále více pozornosti soustředí na udržitelné řešení pro městská prostředí. Jedním z klíčových prvků v tomto úsilí jsou zelené střechy a fasády, které nabízí řadu výhod pro ekosystém města. Tyto systémy nejen zlepšují estetiku urbanistického prostoru, ale také přinášejí řadu přínosů, jako je snížení teploty v důsledku efektu městského tepelného ostrova, zlepšení kvality vzduchu, podpora biodiverzity a efektivní zadržování dešťové vody. Tyto benefity nejenže přispívají k lepšímu životnímu prostředí, ale také pomáhají městům čelit některým z nejnaléhavějších výzev dnešní doby, jako jsou klimatické změny a urbanizace [11][25][26].



Obr. 16 a 17) Pohled na lokalitu Rakovecká, Brno. Z termografického snímku je patrná nižší teplota povrchu zelených střech (zelené odstíny) oproti střechám s povlakovou krytinou (červené odstíny). (zdroj: autor)

Zelené střechy a fasády představují účinný způsob, jak bojovat proti efektu městského tepelného ostrova, který se projevuje výrazně vyššími teplotami v urbanizovaných oblastech ve srovnání s okolním venkovským prostředím. Tento jev je způsoben koncentrací budov, asfaltu a dalších povrchů, které absorbují a udržují teplo. Naopak, zelené střechy a fasády přispívají k ochlazení měst tím, že rostliny a substrát, na kterém rostou, absorbují sluneční záření a zároveň poskytují stínění pro budovy.

Kromě absorpce slunečního záření zelené střechy a fasády využívají proces evapotranspirace, kdy rostliny vypouštějí vodu do vzduchu, což vede k dalšímu ochlazení okolního prostředí. Tento proces pomáhá snižovat potřebu umělého chlazení v budovách a tím i spotřebu energie. Tímto způsobem zelené střechy a fasády přispívají k vytváření příjemnějšího a zdravějšího městského prostředí.

Zelené střechy a fasády hrají důležitou roli v zlepšování kvality vzduchu ve městech. Rostliny pěstované na těchto strukturách mají schopnost pohlcovat škodlivé látky, jako jsou oxidy dusíku, ozon, prachové částice a další znečišťující látky. Tímto způsobem pomáhají snižovat množství těchto znečišťujících látek ve vzduchu a přispívají k celkovému zlepšení kvality ovzduší.

Kromě pohlcování škodlivých látek rostliny na zelených střechách a fasádách také produkují kyslík během fotosyntézy. Tento proces nejenže pomáhá zlepšovat kvalitu vzduchu, ale také přispívá ke snížení koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, což je klíčové pro boj proti globálnímu oteplování. Zelené střechy a fasády tak představují významný prvek udržitelných městských ekosystémů.

Zelené střechy a fasády představují cenný prostor pro podporu biodiverzity ve městech. Poskytují životní prostředí pro různé druhy rostlin, hmyzu, ptáků a dalších malých živočichů. V urbanizovaném prostředí, kde převládá beton a asfalt, tvoří tyto zelené plochy ostrůvky přírody, které napomáhají udržovat a rozvíjet městskou biodiverzitu.

Tyto konstrukce mají schopnost absorbovat a zadržovat významné množství dešťové vody, což má klíčový význam pro snížení rizika záplav ve městech. Voda, která spadne na tyto zelené plochy, je postupně absorbována rostlinami a substrátem a pomalu vypařuje, což znamená, že množství vody, které dosáhne městské kanalizace, je výrazně sníženo [11][12][15][17][25].

Kromě snížení rizika záplav zelené střechy a fasády také pomáhají snižovat zatížení městské kanalizace. V době intenzivních dešťů mohou tyto systémy zachytit a zadržet velké množství vody, což snižuje riziko přetížení kanalizace a následných záplav. Díky tomu přispívají k lepšímu hospodaření s dešťovou vodou ve městech a snižují potřebu rozsáhlých a nákladných infrastrukturních řešení pro odvodnění.



Obr. 18) Realizace zelené fasády v kampusu Fakulty životního prostředí ČZU v Praze (zdroj: <https://floraurbanica.com>)

Design a konstrukční aspekty

Vegetační konstrukce přináší do stavitelství nutnou mezioborovou spolupráci a je tedy vhodné definovat jednotlivé typy konstrukcí jak z pohledu stavebnictví tak botaniky:

- Zelené střechy jsou systémy, které zahrnují vegetaci pěstovanou na střeše budovy. Mohou být extenzivní (s nízkou údržbou a tenkou vrstvou substrátu) nebo intenzivní (s hlubším substrátem a větší rozmanitostí rostlin). Zelené střechy přispívají k izolaci budovy, zlepšení kvality vzduchu a zadržování dešťové vody.
- Zelené fasády jsou systémy, kde vegetace roste přímo na vnějších stěnách budovy nebo na speciálně instalovaných konstrukcích před fasádou. Mohou být přímé, kde rostliny rostou přímo na stěně, nebo nepřímé, kde se rostliny opírají o samostatnou konstrukci. Zelené

fasády poskytují stínění, zlepšují estetiku a mohou pomoci regulovat teplotu budovy.

- Střešní zahrady jsou intenzivní typy zelených střech, kde jsou na střeše vytvořeny plnohodnotné zahrady s širokou škálou rostlin, někdy včetně stromů, keřů a květinových záhonů. Jsou navrženy tak, aby byly přístupné a poskytovaly rekreační nebo odpočinkový prostor. Vyžadují silnější nosnou konstrukci střechy kvůli větší hmotnosti a mohou vyžadovat složitější systémy odvodnění a zavlažování.
- Vertikální zahrady, známé také jako živé stěny, jsou typem zelené fasády, kde je vegetace pěstována na vertikálních panelech připojených k fasádě nebo jako samostatné struktury. Můžou obsahovat širokou škálu rostlin a jsou často používány jako estetický prvek v městských prostředích. Vyžadují komplexní systémy pro zavlažování a údržbu, aby zajistily zdravý růst rostlin na vertikálním povrchu.

Zatímco zelené střechy a fasády jsou více zaměřeny na environmentální přínosy a mohou být navrženy tak, aby vyžadovaly minimální údržbu, střešní a vertikální zahrady nabízejí estetické a rekreační hodnoty s větší potřebou údržby a interakce.

Střešní zahrady a vertikální zahrady přinášejí městskému prostředí osobitý charakter a poutavý vizuální prvek, zatímco zelené střechy a fasády se zaměřují více na praktické a ekologické aspekty urbanismu.

Výběr mezi těmito systémy by měl být založen na specifických cílech projektu, dostupném prostoru, rozpočtu a požadavcích na údržbu.

1.5. 3D tisk v pozemním stavitelství

V posledním desetiletí představuje 3D tisk revoluční prvek v oblasti stavitelství, který zásadně mění přístup k designu, výrobě a konstrukci stavebních projektů. Tato kapitola se zaměřuje na prozkoumání různých aspektů 3D tisku ve stavebnictví, včetně jeho technologických základů, aplikací a významných přínosů pro sektor. Od inovativního využití v rychlé výrobě prototypů až po reálné stavební aplikace, jako jsou 3D tištěné domy, mosty a další struktury, 3D tisk otevírá nové možnosti pro stavební průmysl. Tato kapitola poskytuje přehled o současném stavu technologie 3D tisku v stavebnictví, diskutuje o výzvách a omezeních spojených s jeho implementací a ukazuje na budoucí směry a potenciál této inovativní technologie [29][31].



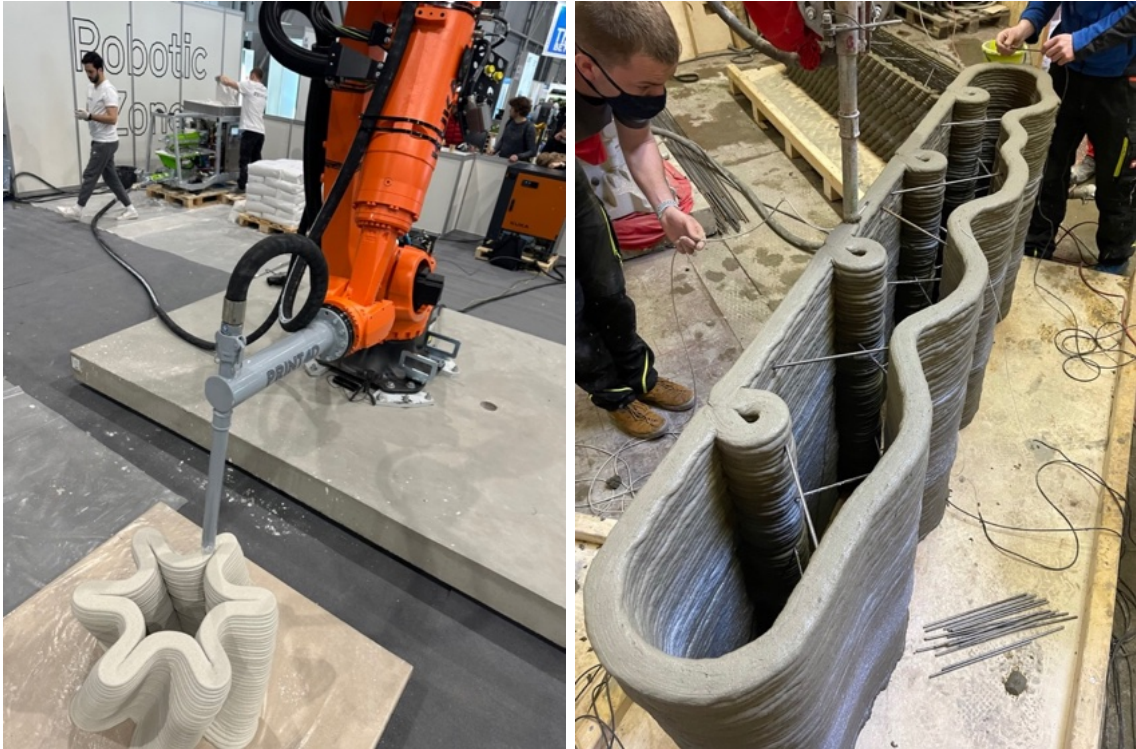
Obr. 19) Výroba vnitřní části panelu zelené fasády technologií 3D tisku recyklovacího PETs parametricky definovanou geometrií (zdroj: autor)

3D tisk, známý také jako aditivní výroba, je proces, kdy se materiál ukládá vrstva po vrstvě pro vytvoření trojrozměrného objektu z digitálního modelu. Ve stavebnictví se tento proces využívá k výrobě složitých struktur a prvků s vysokou přesností a v menším časovém rámci, než je běžné u tradičních stavebních metod.

V pozemním stavitelství se pro 3D tisk nejčastěji využívají různé typy betonu a kompozitních materiálů. Právě tyto materiály jsou vybírány pro svou pevnost, trvanlivost a schopnost být efektivně vytisknuty vrstva po vrstvě. Některé technologie 3D tisku umožňují také použití recyklovaných materiálů, což přispívá

k udržitelnosti projektů. Avšak nevýhodou je velmi složité nastavení samotného tisku z důvodu proměnlivých vlastností [29][30].

Klíčovými technologickými aspekty 3D tisku ve stavebnictví jsou přesnost, rychlost a flexibilita designu. Aditivní výroba umožňuje rychlé prototypování a výrobu složitých geometrických struktur, které by byly pomocí tradičních metod obtížně realizovatelné. Dalším důležitým aspektem je automatizace, která umožňuje efektivnější výstavbu bez potřeby extenzivní manuální práce.



Obr. 20) Ukázka velké tvarové variability u aditivní výroby. Na obrázcích tisk z jedno-komponentních tiskových směsí. Vlevo tisk na Stavebním veletrhu v Brně, Festivalu architektury 2023. Vpravo tisk experimentálních stěn pro projekt FAST-S-21-7422 v roce 2021 (zdroj: autor).

Tato technologie nachází využití při výrobě specifických stavebních komponent, jako jsou sloupy, stěny, nosníky a dokonce celé stavební segmenty. Tento způsob výroby je stále více populární pro vytváření unikátních architektonických prvků a pro experimentální stavební projekty, kde je třeba inovativního přístupu k designu a konstrukci.



Obr. 21) 3D tisk základové patky s tvarovou optimalizací z vysokohodnotného betonu. Projekt Hyperion Robotics a Peikko na staveništní 3D tisk ve finském Lahti (zdroj: <https://www.hyperionrobotics.com/projects>).

Příklady realizací

Jedním z příkladů využití 3D tisku ve stavebnictví jsou realizace kompletních domů vytisknutých pomocí technologie 3DCP. Například v Nizozemsku byl postaven první obyvatelný 3D tištěný dům. Projekt Milestone (dokončen v dubnu 2021), byl prvním komerčním projektem svého druhu na světě s plným záměrem legálně ubytovat rezidenty. První z těchto staveb byla o velikosti 94 m² na místě vytisknuta za 120 hodin z 24 samostatných částí. Tato stavba byla realizována ve městě Eindhoven v Nizozemsku.



Obr. 22) Pohled na realizovaný dům Milestone realizovaný 3D tiskem betonu (zdroj: <https://www.3dprintedhouse.nl/>).



Obr. 23) Interiér objektu Milestone s ponechaným pohledovým prvkom 3D tištěné struktury betonu (zdroj: <https://www.3dprintedhouse.nl/>).

Německý dům Mense-Korte, v Beckum, je prvním domem na světě, který získal plnou certifikaci podle stavebních předpisů dané země. Tento moderní dům je vybaven třemi ložnicemi a třemi koupelnami nabízí obytnou plochu 160 m².



Obr. 24) Interiér objektu s ponechaným pohledovým prvkom 3D tištěné struktury betonu (zdroj: <https://mense-korte.de>).

Jeho výstavba trvala téměř osm měsíců, z čehož přímé tisknutí zabralo přibližně 100 hodin. Byl dokončen v srpnu 2021.



Obr. 25) Pohled na realizaci filigránového stropu na 3D tištěné stěny s monolitickým jádrem (zdroj: <https://mense-korte.de>).

V různých zemích byly realizovány projekty tištěných mostů. V Číně byl vytištěn most z betonu, který kombinuje tradiční architektonické prvky s moderními technologiemi. Tyto mosty ukazují, jak může 3D tisk přinášet inovace v oblasti infrastruktury, a to zejména v rychlosti výstavby a možnosti vytvářet složité geometrické tvary.



Obr. 26) Most sestavený z elementů vytvořených technologií 3D tisku betonu (zdroj: <https://www.archdaily.com/> © Professor Xu Weiguo)



Obr. 27) Budova správy města Dubai se stane světově největší budovou vytvořenou technologií 3D tisku (zdroj: <https://www.archdaily.com> © Apis cor)

Ve městech jako je Dubaj, které si klade za cíl stát se jedním z předních uživatelů 3D tisku ve stavebnictví, byly realizovány různé urbanistické projekty využívající 3D tisk. Tyto projekty zahrnují veřejné prostory, parky a dokonce i části infrastruktury. Dubaj má ambici využívat 3D tisk pro snížení nákladů a zvýšení efektivity ve stavebním průmyslu.



Obr. 28) Reliáze největší budovy vytvořené technologií 3D tisku. Pohled na zdivo 1. podlaží (zdroj: <https://www.archdaily.com> © Apis cor)

3D tisk ve stavebnictví také umožňuje experimentování s novými materiály, jako jsou například lehké betonové směsi nebo recyklované materiály. Využití těchto materiálů může vést k vývoji udržitelnějších stavebních metod a snižování environmentálního dopadu stavebnictví.

Výzvy a omezení

Největší překážky aplikace 3D tisku v pozemním stavitelství ve střední Evropě zahrnují následující aspekty:

- **Omezené zkušenosti** v sektoru stavebnictví znamenají omezené množství odborných znalostí a zkušeností v oblasti 3D tisku. To zahrnuje vysokou potřebu školení pracovníků a vývoje odborných dovedností v této nové technologii.
- **Veřejné vnímání a přijetí** může v některých případech existovat nedostatek důvěry nebo znalostí o 3D tisku mezi veřejností, odbornou veřejností a potenciálními klienty, což může ovlivnit přijetí této technologie.
- **Vysoké počáteční náklady**, tedy počáteční investice do 3D tiskové technologie může být pro mnoho firem ve střední Evropě značná. To zahrnuje náklady na pořízení a údržbu tiskáren, stejně jako na vývoj a testování nových materiálů a zaškolení pracovníků, včetně projektantů.
- **Technologická omezení**, i když 3D tisk v stavebnictví nabízí určité výhody, stále existují technologická omezení, jako jsou omezení velikosti tisku, dostupnost vhodných materiálů a obavy týkající se strukturální integrity a trvanlivosti v závislosti na klimatických podmínkách. Mezi ty hlavní patří změna technologie zpracování materiálu. Při tradičním postupu, známém jako "cast-in-place" (lité na místě), se beton nalije do předem připraveného bednění, kde tuhne a získává požadovaný tvar. Na druhé straně, 3D tisk betonu, často označovaný jako "concrete printing" nebo "additive manufacturing", používá metodu postupného vrstvení, kde beton je aplikován vrstva po vrstvě ve částečně tuhém stavu. Tisková hlava postupně ukládá materiál dle digitálního návrhu, vytvářející tak požadovanou strukturu bez potřeby tradičního bednění.
- **Regulační omezení a normy**, mohou být často interpretovány jako značné výzvy v oblasti stavebních předpisů a norem, které ještě nebyly plně aktualizovány pro zahrnutí 3D tiskových technologií. Avšak zde je nutno podotknout, že ani materiál a ani technologie nejsou novinkou

posledního desetiletí a je tedy jen na specialitech v oboru vydefinování a vymezení se v jednotlivých částech norem či technologiích zpracování.

V Hausleitenu v Rakousku byla postavena první 3D tištěná kancelářská budova, která je výsledkem spolupráce mezi STRABAG a PERI, využívající technologii 3D betonového tisku. Pro výstavbu této budovy byla použita technika 3D tisku s použitím portálové tiskárny COBOD BOD2. Tiskem byly vytvořeny duté stěny, které byly poté vyplněny betonem a tepelnou izolací.

Maximální rychlost tisku tiskárny BOD2 je jeden metr za sekundu, což umožnilo dokončit obal budovy v Hausleitenu za pouhých 45 hodin tisku. Tato technologie poskytuje architektonicky atraktivní zaoblené tvary, které by tradičními betonovými metodami byly obtížně dosažitelné. Tiskárna BOD2 je navržena tak, aby umožňovala integraci potrubí pro vodu, elektřinu a další inženýrské sítě přímo během tisku, což představuje významný pokrok ve využití 3D tisku v stavebnictví.



Obr. 29) Tisk budovy pomocí rámové tiskárny COBOD BOD2. Byla zvolena realizace pomocí tří perimetrů tisku (zdroj: <https://www.strabag.com>).

Při této realizaci byla technologie 3D tisku použita jako technologie pro ztracené bednění. Toto umožnilo výstavbu objektu podobnou k tradičním přístupům. Bohužel tento přístup pak významnou měrou eliminuje maximalizaci potenciálu 3D tisku betonem.

Budoucí směry a potenciál

Tato technologie má potenciál zásadně transformovat celý stavební průmysl. Vývoj nových 3D tiskových technologií a materiálů je klíčový pro širší využití 3D tisku ve stavebnictví. Inovace v materiálech, jako jsou lehčí a odolnější směsi betonu nebo ekologické materiály, mohou výrazně zlepšit efektivitu a udržitelnost stavebních projektů.

Tisk nabízí vysokou úroveň automatizace procesů. To může vést k výraznému snížení nákladů na pracovní sílu a zvýšení přesnosti a rychlosti výstavby. Automatizace ve spojení se strojním učením (ML) může také snížit možnost lidské chyby a zlepšit bezpečnost pracovníků na staveništi.

Technologie 3DCP umožňuje složitější a personalizované designy, které by byly s tradičními metodami obtížně realizovatelné. Tato flexibilita v designu může vést k inovativním stavebním projektům s jedinečnými estetickými a funkčními vlastnostmi.

Efektivní výroba a realizace může vést k rychlejšímu a levnějšímu dokončení projektů. Kromě toho, možnost tisknout materiály přímo na staveništi může snížit náklady na dopravu a logistiku.

Implementace 3D tisku ve stavebnictví může mít významný dopad na celý průmysl. Může to vést k větší udržitelnosti, efektivitě a snížení nákladů. Vzhledem k schopnosti tisknout s využitím recyklovaných materiálů může 3D tisk také přispět k redukci odpadu.

Přes všechny tyto možnosti je třeba řešit výzvy, jako jsou regulace a standardizace, vzdělávání a školení pracovníků, a překonání technických omezení současných 3D tiskových technologií.

Celkově 3D tisk nabízí vzrušující vyhlídky pro budoucí stavebnictví, s potenciálem transformovat způsob, jakým navrhujeme, vyrábíme a realizujeme stavební projekty. Jako každá nová technologie, i 3D tisk vyžaduje čas na zralost a integraci do existujících pracovních postupů a průmyslových standardů.

Digitální transformace ve stavebnictví

- BIM (Building Information Modeling) a jeho význam
- Cloudové technologie a jejich role ve stavitelství 4.0
- Big Data a analýza dat v optimalizaci stavebních procesů
 - Parametrizace návrhu a procesů

*"Automation is taking away the routine and procedural work
and allowing us to focus on the real problems."*

Gray Scott

2. Digitální transformace ve stavebnictví

Digitální technologie prostupují stavebnictvím několika způsoby. BIM (Building Information Modeling) usnadňuje správu projektů sdílením informací mezi všemi zapojenými subjekty. Cloudová úložiště umožňují práci na dálku a sdílení dat. Analýza velkých souborů dat (Big Data) a jejich využití např. pro modelování dopadu rozhodnutí přináší optimalizaci procesů. Parametrické modelování návrhů poskytuje inovativní a flexibilní řešení. Společně tyto digitální nástroje tvoří základ moderního stavebnictví 4.0, které přináší nové příležitosti pro efektivitu, inovace a udržitelnost ve srovnání s tradičními postupy. Umožňují propojení všech subjektů zapojených do výstavby.

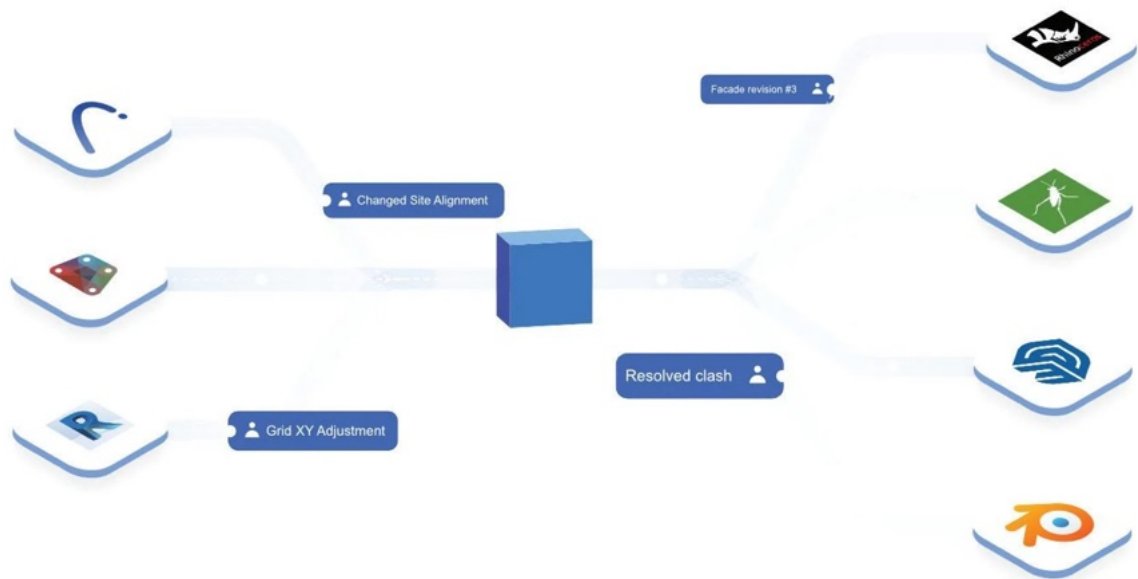
2.1. BIM (Building Information Modeling) a jeho význam

BIM hraje klíčovou roli v Pozemním stavitelství 4.0 jako nástroj, který zásadně změní způsob, jakým budou stavební projekty navrhovány, realizovány a spravovány. BIM je digitální reprezentace fyzických a funkčních charakteristik budovy, což umožňuje efektivnější plánování, design, výstavbu a správu stavebních projektů. Jeho význam spočívá v možnosti integrovat velké spektrum informací v jednotném modelu, což usnadňuje komunikaci mezi všemi účastníky projektu, optimalizuje rozhodovací procesy a umožňuje lepší správu projektů během celého jejich životního cyklu. BIM tak přispívá k vyšší efektivitě, snižuje náklady, zvyšuje kvalitu výstavby a podporuje udržitelné stavební praktiky.

BIM je mnohem více než pouhá dokumentace tvořená 3D modelem budovy. Zatímco 3D modelování je důležitou součástí BIM, BIM zahrnuje i další dimenze informací, které přesahují pouhou vizuální reprezentaci. BIM integruje rozmanité informace o projektu, včetně časových plánů (4D), nákladů (5D), udržitelnosti (6D) a životního cyklu správy (7D). Tímto způsobem BIM poskytuje komplexní pohled na projekt, umožňuje tak efektivnější správu a spolupráci mezi všemi zainteresovanými stranami a optimalizuje celý stavební proces od návrhu až po demolici.

Tato koncepce je založena na spolupráci napříč všemi obory, což v podmínkách České republiky znamená zapojení velkého množství subjektů s odlišným softwarovým vybavením. A tak jedním z klíčových bodů zavedení BIM

je používání platform pro sdílení dat. Mezi lídry patří platforma Speckle Systems, která je zároveň open-source řešením.



Obr.30) Ukázka mezi softwarové konektivity open-source platformy Speckle (zdroj: <https://speckle.systems/>)

V současné době platforma disponuje více jak 30 konektory. Jako open-source řešení byla Speckle vybavena řadou API a SDK, které umožňují vytvářet aplikace a pracovní postupy pro poskytování hodnoty ve velkém měřítku. Mezi příklady patří kontroly kvality dat, odhady nákladů a kalkulatory uhlíku (LCAs), jež jsou využívány v reálném čase během návrhu. Hostování Speckle může být provedeno na libovolném cloudovém poskytovateli (například Microsoft Azure, GCP, AWS) a dokonce i lokálně, což zajišťuje maximální dopad při zajištění plné kontroly a vlastnictví dat uživatelem.

2.2. Cloudové technologie a jejich role ve stavitelství 4.0

Tyto technologie umožňují efektivní sdílení informací a dat, což je zásadní pro koordinaci rozsáhlých projektů, kde spolupracuje mnoho různých profesí a organizací. Cloudové řešení zajišťuje, že všichni zúčastnění mají přístup k aktuálním informacím a mohou efektivně spolupracovat, což je klíčové pro úspěšné dokončení projektů ve stále se vyvíjejícím a komplexním stavebním průmyslu.

Několik příkladů možného využití cloudových technologií ve výstavbě může zahrnovat:

- **Online sdílení projektové dokumentace**

Architektonické ateliéry a projektoví manažeři využívají cloudové platformy pro sdílení návrhů, plánů a specifikací projektů s různými stavebními týmy a poddodavateli.

- **Centralizovaná správa dat TZB**

Specializovaní technici v oblasti TZB (technických zařízení budov) využívají cloudové služby pro správu a analýzu dat z různých systémů v budovách, což umožňuje efektivnější řízení energetiky a jiných systémů.

- **Koordinace projektů v reálném čase**

Nadnárodní stavební firmy využívají cloudové platformy pro koordinaci projektů v reálném čase, což umožňuje rychlou výměnu informací mezi centrálními kanceláři a staveništi.

- **Mobilní aplikace pro živnostníky a malé firmy**

Živnostníci a malé stavební firmy využívají cloudové aplikace pro správu zakázek, komunikaci se zákazníky a efektivní řízení pracovních postupů a materiálů.

2.3. Big Data a analýza dat v optimalizaci stavebních procesů

Big Data a analýza dat hrají stále větší roli v optimalizaci stavebních procesů, což představuje klíčový prvek v Pozemním stavitelství 4.0. S rostoucím množstvím dat shromážděných z různých zdrojů – od IoT senzorů až po projektový software – mají stavební firmy přístup k cenným informacím, které mohou využít pro zlepšení efektivity, snížení nákladů a zvýšení kvality výstavby.

Analýza velkých dat umožňuje identifikaci trendů a vzorců v chování materiálů, pracovních postupů a využití zdrojů, což vede k lepšímu rozhodování a předvídání potenciálních problémů. S pomocí pokročilých analytických nástrojů mohou projektoví manažeři optimalizovat plánování a logistiku, zlepšovat bezpečnost na pracovišti a snižovat dopady na životní prostředí. Výsledkem je nejen efektivnější a ekonomičtější provoz, ale také výstavba, která lépe reaguje na potřeby zákazníků a společnosti jako celku.

2.4. Parametrizace návrhu a procesů

Parametrizace návrhu a procesů je klíčovou složkou digitální transformace ve stavebnictví, která představuje novou éru v oblasti projektování a realizace stavebních projektů. Opírá se o využití pokročilých softwarových nástrojů a algoritmů, které umožňují architektům a inženýrům rychle generovat a upravovat návrhy na základě řady vstupních parametrů. Využití parametrizace v automatizaci návrhu a výrobních procesů má zásadní význam pro zvýšení efektivity a optimalizaci workflow. Automatizace spojená s parametrickým designem umožňuje výrobu materiálů a součástí na míru, což vede k snížení odpadu a zvyšuje celkovou účinnost dodavatelských řetězců. Tato integrace technologie a návrhu také znamená, že procesy od konceptu až po realizaci jsou plynulejší a efektivnější.

Jedním z nejvýznamnějších aspektů parametrizace je její integrace s BIM. BIM nabízí komplexní digitální reprezentaci stavebních prvků, což umožňuje podrobnější analýzu a lepší pochopení celkového projektu. Parametrické nástroje v rámci BIM umožňují rychle adaptovat návrhy na základě změn v projektech nebo požadavků klientů. Tato flexibilita je neocenitelná, zejména v kontextu složitých stavebních projektů, kde mohou být požadavky dynamické a často se mění.

Dalším klíčovým prvkem je schopnost adaptace a změn v reálném čase. Díky parametrickému designu mohou návrháři generovat řadu návrhových možností, které lze snadno porovnávat a upravovat. Toto umožňuje nejen rychlé reakce na měnící se požadavky, ale také poskytuje prostor pro experimentování a inovace.

Integrace parametrizace s pokročilými technologiemi jako jsou počítačové simulace, AI a ML, přináší další rozměr přesnosti a efektivity. Tyto technologie umožňují detailní analýzu a optimalizaci návrhů, což vede k lepšímu výkonu, odolnosti a udržitelnosti stavebních konstrukcí.

Parametrizace návrhu a procesů tedy představuje silný nástroj pro moderní stavebnictví, který zvyšuje efektivitu, flexibilitu a udržitelnost, zatímco otevírá dveře pro inovace a pokrok v celém odvětví.

Výzvy a příležitosti v Pozemním stavitelství 4.0

- Ekonomické výhody a rizika spojená s technologickou transformací
- Nové požadavky na odborné dovednosti pracovníků ve stavebnictví
- Etické a právní aspekty digitalizace

„The great aim of education is not knowledge but action“

Herbert Spencer

3. Výzvy a příležitosti v Pozemním stavitelství 4.0

Pozemní stavitelství 4.0, reprezentující čtvrtou průmyslovou revoluci ve stavebnictví, přináší s sebou nejen nové technologie a inovace, ale také řadu výzev a příležitostí, které formují budoucnost tohoto odvětví. Tato kapitola se zabývá komplexním prozkoumáním ekonomických, odborných, etických a právních aspektů spojených s technologickou transformací v oblasti stavebnictví. Zkoumáme ekonomické výhody a rizika, která tato éra přináší, od zvýšení efektivity a snížení nákladů po potenciální nejistoty a investiční rizika spojená s přijetím nových technologií.

Zvláštní pozornost je věnována také novým požadavkům na odborné dovednosti pracovníků ve stavebnictví. V kontextu stále se vyvíjejících technologií a digitalizace je nezbytné, aby pracovníci ve stavebnictví rozšířili své dovednosti a adaptovali se na nové pracovní postupy a nástroje. Tato podkapitola se zaměřuje na identifikaci klíčových dovedností potřebných pro úspěšnou kariéru v moderním stavebnictví a na to, jak mohou vzdělávací instituce a firmy přispět k rozvoji těchto dovedností.

Nakonec se věnujeme etickým a právním aspektům digitalizace ve stavebnictví, Tyto aspekty jsou zásadní pro pochopení, jak může stavební průmysl eticky a zákonně navigovat v digitálním prostředí, a jsou klíčové pro zajištění, aby technologický pokrok šel ruku v ruce s právními a etickými normami.

Celkově tato kapitola poskytuje ucelený pohled na komplexní spektrum výzev a příležitostí, které přináší Pozemní stavitelství 4.0, a nabízí cenné vhledy do toho, jak mohou firmy, pracovníci a regulátoři efektivně reagovat na tyto nové vývoje.

3.1. Ekonomické výhody a rizika spojená s technologickou transformací

Technologická transformace v pozemním stavitelství přináší významný potenciál pro zvýšení efektivity a snížení nákladů, ale vyžaduje pečlivé zvážení investic, rizik a strategického plánování pro dosažení optimálního využití těchto technologií. Pokud bychom měli definovat hlavní výhody a rizika, tak by tento přehled mohl vypadat následovně:

Ekonomické výhody:

- **Zrychlení procesu povolování**

Digitalizace a automatizace procesů mohou značně zrychlit proces získávání stavebních povolení. Použití elektronických systémů pro podávání žádostí a správu dokumentace může zkrátit dobu čekání a zvýšit transparentnost procesu. Je vyloučen subjektivní přístup k dokumentaci.
- **Přesnost a efektivita v projektování**

3D modelování a BIM (Building Information Modeling) umožňují větší přesnost v projekční fázi. Tyto nástroje pomáhají identifikovat potenciální problémy ještě před zahájením výstavby, což může vést k úsporám času a nákladů. Jsou významnou měrou eliminovány kolizní body.
- **Optimalizace realizace staveb**

Technologie jako je automatizované sledování průběhu stavby, pokročilé plánovací software a robotizace mohou zvýšit efektivitu na staveništi, snížit náklady na práci a zkrátit dobu výstavby. Například využití RFID čipů pro přesnou identifikaci stavebních elementů a způsobu jejich zabudování.
- **Zvýšená přesnost odhadů nákladů**

Využití pokročilých softwarů a modelování může zlepšit přesnost předběžných odhadů nákladů projektu. Díky tomu je možné efektivněji spravovat rozpočty a minimalizovat nepředvídané výdaje.
- **Lepší správa zdrojů a materiálů**

Digitální nástroje umožňují lepší sledování a správu materiálů a zdrojů, což vede k efektivnějšímu využití a snižování odpadu.
- **Zlepšení komunikace a koordinace**

Digitální nástroje a platformy usnadňují komunikaci a koordinaci mezi různými týmy a dodavateli, což zvyšuje celkovou efektivitu projektu.
- **Lepší shoda s environmentálními standardy**

Technologie mohou pomoci v dosahování environmentálních cílů a standardů, například prostřednictvím energeticky úsporných návrhů a udržitelných stavebních metod.

Ekonomická rizika:**- Vysoké počáteční investice**

Implementace nových technologií často vyžaduje značné počáteční investice, ať už jde o nákup softwaru, hardwaru nebo školení pracovníků. Firmy musí pečlivě zvážit návratnost svých investic a analyzovat dlouhodobé výhody s ohledem na nezbytnou úpravu cenotvorby prací.

- Závislost na technologii a riziko zastarávání

Technologický pokrok je rychlý a stavební firmy mohou čelit riziku, že jejich technologie rychle zastarají. To vyžaduje průběžné investice do aktualizací a udržování technologické infrastruktury.

- Komplexita regulace a schválení

Zatímco digitalizace může proces povolování urychlit, může také přinést nové výzvy v podobě složitějších regulačních požadavků, zejména v případě nových technologií, jako je 3D tisk v stavebnictví, které ještě nemají jasně definovaný právní rámec.

- Potřeba nových dovedností

Implementace nových technologií vyžaduje, aby pracovníci ve stavebnictví měli nové dovednosti a zkušenosti, což může vyžadovat další investice do školení a vzdělávání.

- Zabezpečení dat a kybernetické riziko

S rostoucím využíváním digitálních nástrojů a dat se zvyšuje potřeba zabezpečení a riziko kybernetických útoků, což může mít finanční a operační dopady, a může opět vyžadovat další investice do školení a vzdělávání.

- Riziko závislosti na jednom dodavateli technologie

Exkluzivní závislost na jednom dodavateli softwaru nebo technologie může znamenat riziko omezení flexibility a možných komplikací při změně dodavatele.

- Náročnost integrace s existujícími systémy

Integrace nových technologií s již existujícími systémy a procesy může být komplikovaná a časově náročná.

Pokud se podíváme na finanční náročnost zavádění technologií rozšířené reality (MR) do stavební praxe, nemusí jít o extrémně drahý proces. Jedním z příkladů techniky, která umožňuje snadnou adopci VR, jsou nyní velmi rozšířené brýle pro virtuální a rozšířenou realitu Meta Quest. Konkrétně Meta Quest 3, které jsou již dnes dostupné za cenu kolem 17 tis. Kč. Jsou plně autonomní a nepotřebují připojení k PC nebo mobilu. Stačí nahrát 3D modely staveb a inspektor může provádět prohlídky či prezentace klientům přímo na staveništi.



Obr. 31 a 32) Vlevo VR/AR brýle Meta Quest 3 s rozlišením 4K+ a integrovanou baterií (zdroj: <https://www.meta.com>). Vpravo sférická 360°kamera s rozlišením 5,7K InstaOne X3 (zdroj: <https://www.insta360.com>)

Podobně i v případě sférických kamer již existují na trhu varianty, které usnadňují jejich zavedení do běžné praxe. Jedním z příkladů je kamera Insta360 One X2, která je momentálně dostupná za cenu kolem 8 000 Kč. Jedná se o plně autonomní 360° kameru s možností natáčet v 5,7 K rozlišení.

Stejně jako v případě VR brýlí, i zde lze získat kvalitní techniku pro digitalizaci procesů za cenu srovnatelnou s běžným fotografickým nebo videotechnickým vybavením.

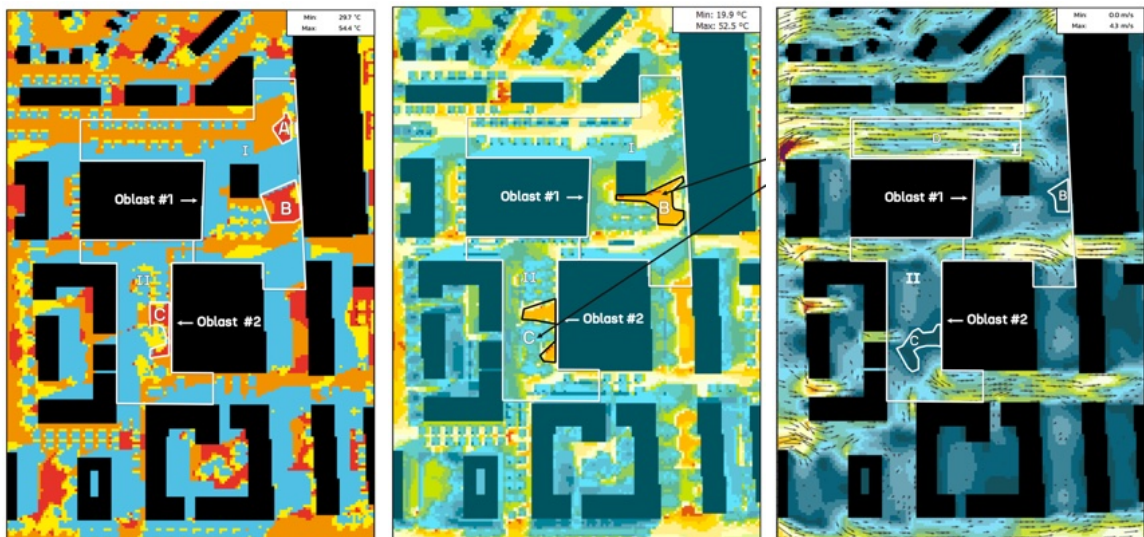
3.2. Nové požadavky na odborné dovednosti pracovníků ve stavebnictví

Přechod od tradičních metod k technologicky pokročilým postupům vyžaduje od pracovníků nejen hlubší technické znalosti, ale také schopnost adaptace na nové nástroje a pracovní postupy. Důležitost rozvoje nových dovedností a adaptace na měnící se pracovní prostředí ve stavebnictví, je nezbytná proto, aby bylo možné efektivně využít přínosů technologického pokroku.

Zvýšený důraz na technologickou gramotnost

Moderní technologie jako 3D modelování, BIM (Building Information Modeling), automatizované stavební systémy a další digitální nástroje hrají klíčovou roli ve zvyšování efektivity a produktivity v pozemním stavitelství. Pracovníci, kteří se naučí efektivně využívat tyto nástroje, mohou realizovat projekty rychleji a s větší přesností. Tato efektivita vede k rychlejšímu plánování, návrhu a konstrukci, což významně snižuje chybovost a zkracuje dobu potřebnou k dokončení projektů.

Další klíčovou výhodou je prevence chyb a snižování nákladů. Přesné digitální modely a simulace pomáhají předvídat a řešit potenciální problémy ještě



Obr.33) Pohled na simulaci povrchových teplot, pocitové teploty a proudění větru v lokalitě Praha - Nové Dvory (zdroj: autor)

před zahájením fyzické výstavby. Tím se snižuje pravděpodobnost chyb, což vede k úsporám nákladů a zamezení zpožděním projektů. Navíc, využití moderních technologií ve stavebnictví může výrazně přispět k vyšší kvalitě a trvanlivosti stavebních děl, což zvyšuje celkovou životnost a funkčnost budov.

Technologie také hrají klíčovou roli v udržitelnosti a environmentální odpovědnosti stavebních projektů. Efektivnější využívání materiálů a snižování množství odpadu přispívají k environmentální udržitelnosti. 3D modelování a BIM umožňují optimalizovat využití materiálů a energie, což je významným přínosem pro ekologii.

V neposlední řadě, v době rychlého technologického pokroku je pro stavební společnosti nezbytné, aby jejich pracovníci byli schopni využívat moderní technologie, což zvyšuje konkurenceschopnost firmy a její schopnost vyhovět požadavkům moderních stavebních projektů.

Potřeba kontinuálního vzdělávání a školení

Kontinuální vzdělávání a školení jsou pro pracovníky ve stavebnictví nesmírně důležité, zvláště v rychle se vyvíjejícím prostředí Pozemního stavitelství 4.0. S postupem technologie, jako je 3D tisk, digitální fabrikace a automatizace a pokročilé softwarové nástroje, je nezbytné, aby pracovníci neustále rozšiřovali své znalosti a dovednosti, aby mohli tyto nástroje efektivně využívat. Tento proces neustálého učení zvyšuje jejich hodnotu na trhu práce a zlepšuje jejich schopnost reagovat na dynamické požadavky průmyslu.

Kromě zvyšování efektivity a produktivity, kontinuální vzdělávání a školení pomáhají pracovníkům získat hlubší porozumění pro svou práci, což vede ke zvýšení kvality výsledného produktu a snížení chyb. Vzdělávání v oblasti udržitelných a inovativních praktik podporuje adopci ekologických postupů a sociální odpovědnosti v projektu. To je zásadní pro podporu ekologické udržitelnosti v průmyslu a napomáhá rozvoji inovací.

Bezpečnost na pracovišti je dalším klíčovým aspektem, kde vzdělávání a školení hrají zásadní roli. Pravidelné školení v oblasti bezpečnostních postupů a regulací je nezbytné pro minimalizaci rizik na staveništi. To je nejen prospěšné pro ochranu pracovníků, ale také pro zajištění plynulého průběhu projektů.

Nakonec, technologický pokrok nevyhnutelně vede ke změnám v pracovních rolích a povinnostech. Pracovníci, kteří se věnují kontinuálnímu

vzdělávání, jsou lépe připraveni na tyto změny. Schopnost adaptovat se a rozvíjet nové dovednosti je nezbytná pro efektivní přispění k různorodým aspektům stavebních projektů.

Rozvoj multidisciplinárních dovedností

V moderním stavebnictví, které prochází rychlým technologickým vývojem a čelí narůstající komplexnosti projektů, je rozvoj multidisciplinárních dovedností pracovníků nezbytný. Současné stavební projekty často zahrnují integraci různých technologií a systémů, což vyžaduje širokou škálu dovedností od týmu. Pracovníci, kteří rozumí jak tradičním stavebním metodám, tak moderním technologiím jako je BIM, 3D tisk a automatizace, jsou schopni efektivněji koordinovat a implementovat různé aspekty projektu. Tato schopnost nejen zvyšuje efektivitu a kvalitu práce, ale také umožňuje pracovníkům přizpůsobit se měnícím se potřebám a požadavkům trhu.

Kromě technických dovedností je důležitá také schopnost efektivní komunikace a spolupráce v multidisciplinárních týmech. Pracovníci s rozšířenými znalostmi a dovednostmi mohou lépe komunikovat s kolegy z různých disciplín, což je klíčové pro úspěšné dokončení komplexních projektů. Rovněž, v reakci na měnící se požadavky trhu, pracovníci s multidisciplinárními dovednostmi jsou více konkurenceschopní a žádaní. Tato adaptabilita a flexibilita jsou zásadní pro podporu inovací a udržitelných praktik ve stavebnictví, což je stále důležitější v kontextu současných globálních výzev.

3.3. Etické a právní aspekty digitalizace

Etické a právní aspekty digitalizace ve stavebnictví představují významnou oblast, která vyžaduje pozornost v rámci moderního stavebního průmyslu. Digitalizace přináší celou řadu nových výzev a příležitostí, jež ovlivňují nejen způsob, jakým jsou projekty realizovány, ale také jak jsou řízeny z hlediska etiky a práva. Jedním z hlavních etických a právních aspektů je ochrana a správa dat. V éře BIM, IoT a automatizovaných systémů je zajištění bezpečnosti a soukromí dat klíčové. To zahrnuje nejen ochranu proti kybernetickým útokům, ale také zodpovědné zacházení s daty, včetně jejich shromažďování, ukládání a sdílení.

Dalším důležitým aspektem je dodržování právních předpisů a norem. S rychlým rozvojem nových technologií se často objevují právní šedé zóny, které vyžadují jasnější regulace a standardy. To zahrnuje i otázky týkající se autorských práv a duševního vlastnictví, zejména v kontextu sdílení a využívání digitálních modelů a návrhů. Z etického hlediska je důležité, aby firmy a jednotlivci, kteří se podílejí na digitální transformaci ve stavebnictví, jednali transparentně, zodpovědně a s ohledem na širší dopady svých činů na společnost a životní prostředí. To zahrnuje i způsob, jakým se technologie používají k zajištění bezpečnosti na pracovišti a k ochraně zájmů všech zúčastněných stran.

Stavební průmysl stojí před novými výzvami, ale také možnostmi souvisejícími s nástupem technologií Průmyslu 4.0. Klíčové bude nejen efektivně využívat nové digitální technologie, ale také se zaměřit na rozvoj lidského kapitálu a nalezení vyváženého přístupu, který bude respektovat etické a legislativní hlediska. Jestliže všichni aktéři ve stavebnictví zareagují na tyto změny odpovědně a koordinovaně, otevírá se stavebnímu sektoru prostor pro inovace, růst a udržitelný rozvoj i v budoucí éře chytrého stavitelství. Tato kapitola naznačuje možnosti, jak převést současné výzvy ve strategické příležitosti pro celé odvětví. V následující kapitole jsou prezentovány příklady úspěšných implementací technologií Pozemního stavebnictví 4.0. na projektech autora.

Příklady úspěšných implementací technologií

- IoT a senzorové sítě pro stavební aplikace
 - Zelené střechy a fasády
 - Aplikace virtuální a rozšířené reality
- Parametrický návrh a digitální dvojče
 - Prefabrikace a aditivní výroba

*„As an architect, you design for the present, with an awareness of the past,
for a future which is essentially unknown.”*

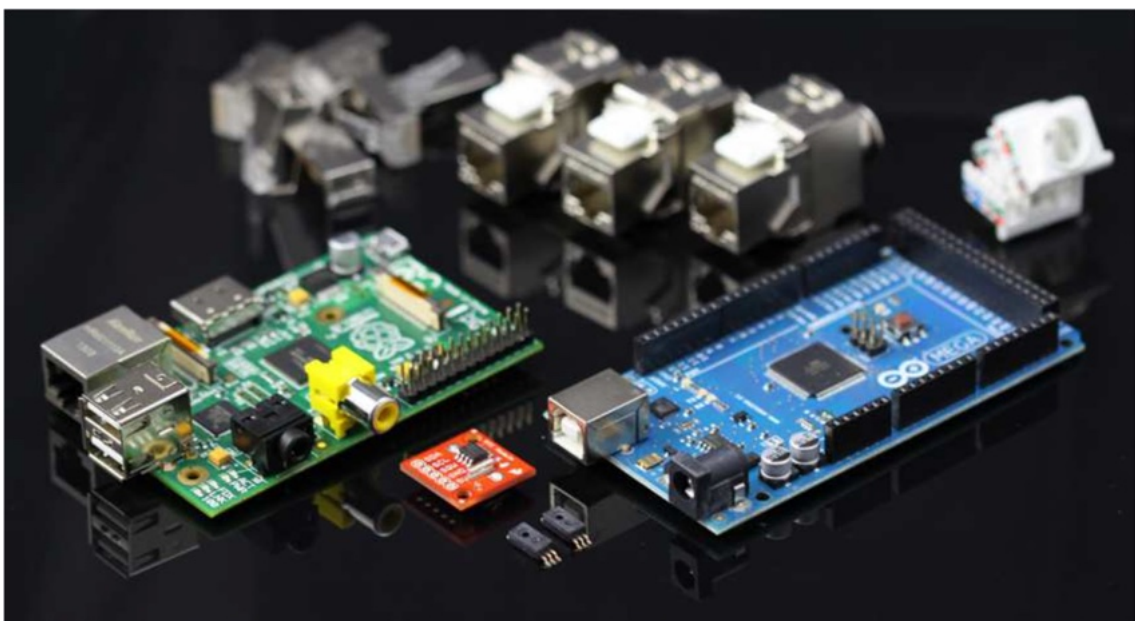
Norman Foster

4. Příklady úspěšných implementací technologií

Tato kapitola se věnujeme příkladům úspěšných autorských implementací řady pokročilých technologií, které formují současné a budoucí trendy v oblasti stavebnictví a architektury. Internet věcí (IoT) a senzorové sítě, které přinášejí revoluční způsoby monitorování a správy stavebních konstrukcí. Dále se věnuje konceptu zelených střech a fasád, které jsou nejen esteticky přitažlivé, ale především přispívají k udržitelnosti a energetické efektivitě budov. V oblasti virtuální a rozšířené reality se zaměřuje na jejich aplikace ve stavebnictví, od návrhu po realizaci. Parametrický návrh a koncept digitálního dvojčete jsou dalšími klíčovými tématy, které demonstrují, jak pokročilé modelování a simulace transformují proces návrhu a udržování stavebních děl. Nakonec se zaměří na prefabrikaci a aditivní výrobu, které představují zásadní posun v metodách výstavby, zvyšují rychlost a snižují náklady při zachování kvality a udržitelnosti. Každá z těchto technologií představuje unikátní příležitost i výzvy.

4.1. IoT a senzorové sítě pro stavební aplikace

V posledním desetiletí došlo k nárůstu počtu výzkumných projektů v oblasti konstrukcí pozemních staveb a studiu procesů v nich probíhajících nejen v oblasti stavební fyziky. Tento trend je způsoben potřebou ověřovat přesnost



Obr. 34) Komponenty systému BRESET, Raspberry a Arduino (zdroj: autor)

numerických modelů v inženýrské praxi. Většina probíhajících výzkumných projektů je zaměřena na pozorování vnitřního prostředí a proto je potřeba monitorovat velké množství fyzikálních parametrů. Přičemž každý z těchto parametrů je měřen jiným senzorem, což představuje potřebu významných investic k jejich pořízení.

Vzhledem k individuálním požadavkům výzkumných týmů a neustálému vývoji výpočetního hardwaru a informačních technologií, byl v roce 2013 vytvořen vlastní datový záznamník s vysokou variabilitou připojitelných částí a senzorů [].

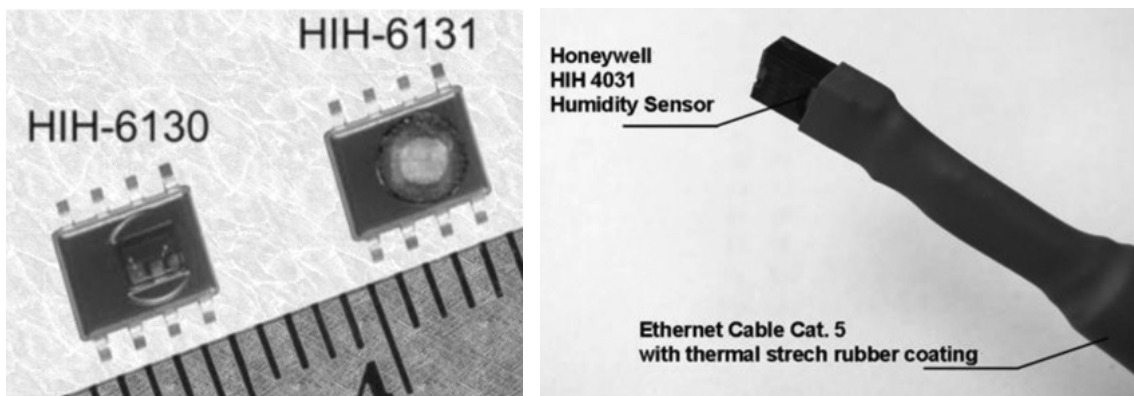
Z důvodu redukce nákladů a dostatečné variabilitě prototypování byly pro konstrukci vybrány: procesor ARM založený na Raspberry Pi v modelu B a open-source deska známá jako Arduino (v čase konstrukce přesně Arduino Mega 2560 rev. 2). Konstrukce umožňovala komunikovat prostřednictvím USB (Univerzální Sériová Sběrnice), I2C případně SPI sběrnic a rozhraní. Architektura záznamníku byla využita i v projektu Experimentální dřevostavby EXDR1 [34][35][36][37].



Obr. 35) Experimentální dřevostavba s osazeným systémem monitoringu konstrukcí BRESET (zdroj: autor)

Při výzkumu vnitřního prostředí byl potřebný poměrně velký počet senzorů: několik termočlánků, senzory relativní vlhkosti a další. Senzory, cenově přijatelné, byly vyráběny společnostmi Honeywell, Dallas Instruments, Panasonic a mohly být zvoleny jak digitální nebo analogové. Prototyp ArduPi využil již zmíněné analogové senzory vlhkosti HIH-4031 od společnosti Honeywell. Aby se uvolnily analogové vstupní piny na desce Arduino pro různé senzory, plánovalo se využití kombinovaných digitálních senzorů HIH 6131-021. Tyto senzory také byly vyráběny Honeywellem.

Tyto senzory komunikovaly prostřednictvím již zmíněného komunikačního protokolu I2C. Senzory spotřeby energie byly důležité pro monitorování vnitřního prostředí, protože v případě výpadku proudu okamžitě zaznamenávaly dobu bez elektrické energie. Informace o takových podmínkách mohly být okamžitě doručeny prostřednictvím GPRS nebo EDGE.



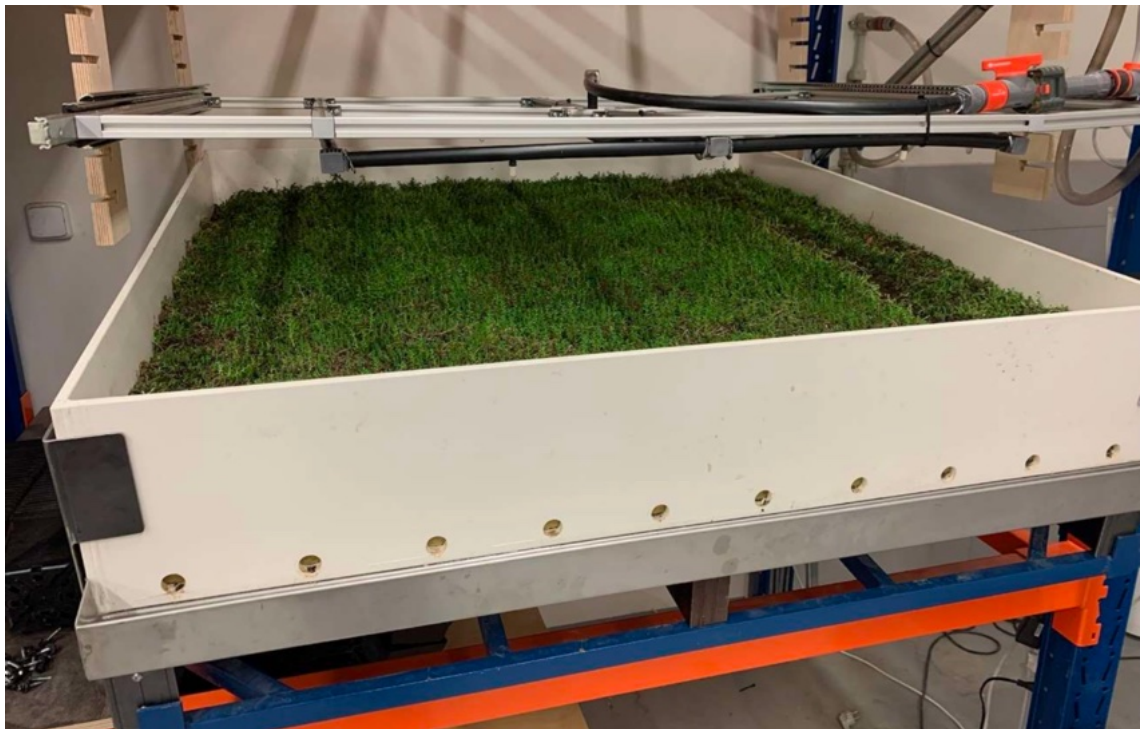
Obr. 36 a 37) Pohled na senzory HIH-613X o velikosti 5 mm a napájený senzor na kabelu HIH-4031 sensor (zdroj: autor)

Analogové propojení pro senzory mFi-CS byly k dispozici od společnosti Ubiquiti Networks a používaly se pro monitorování spotřeby energie domácích spotřebičů a mnoha dalších. Datové záznamníky byly přizpůsobeny potřebám uživatele, včetně softwarové báze pro provoz. Výběr senzorů a měřicího zařízení závisel pouze na uživateli. Zda byly připojené senzory měly přesnost 0,5 % nebo 5 %, záviselo pouze na dostupných fondech. Jediným požadavkem byla jejich kompatibilita s jakýmkoliv z podporovaných komunikačních protokolů. Bylo řečeno, že vytvoření BRESET na základě ArduPi bylo významným krokem, protože přiblížilo možnosti výzkumných aktivit vědecké komunitě.

4.2. Zelené střechy a fasády

Tato kapitola se zaměřuje na inovativní využívání zelených střech a fasád v kontextu technologií 4.0, které přinášejí významné přínosy pro udržitelnost a energetickou účinnost budov. V této části jsou představeny případové studie a experimenty, které byly provedeny v posledních letech, včetně několika konkrétních příkladů z nedávných výzkumů realizovaných na VUT v Brně. Tyto studie demonstrují, zelené stěny v interiérech mohou efektivně regulovat teplotu a vlhkost, což má přímý vliv na zdraví a pohodlí obyvatel. Tato část poskytuje hlubší vhled do praktických aplikací a benefitů zelených střech a fasád, které jsou stále více uznávané jako klíčové prvky moderního, udržitelného designu.

V roce 2015, během řešení projektu FV10078, bylo na Ústavu pozemního stavitelství (PST) identifikováno, že české republice dochází k značnému množství realizací zelených střech bez dostatečné datové základny, případně evidence základních veličin, které reflektují dynamické chování zelených střech. Toto zjištění přišlo v době, kdy se v České republice začaly více realizovat zelené střechy z důvodu dotační podpory, avšak bez hlubšího znalostního základu a bez adekvátní evidence klíčových aspektů, jako je statické zatížení a hydraulika odtoku srážkových vod.



Obr. 38) Pohled na testovací stolicí odtokových koeficientů zelených střech [24]

V této situaci se ukázalo jako nezbytné zahájit komplexní dialog mezi realizátory, výrobci a distributory stavebních materiálů pro zelené střechy k testování zelených střech, aby bylo možné shromáždit a analyzovat data, jež by mohla sloužit jako základ pro další návrh a realizaci těchto systémů. Cílem testování na Ústavu PST bylo získat hlubší porozumění pro interakci mezi různými složkami zelených střešních systémů a jejich vlivem na celkovou strukturu budovy.

Zvláštní pozornost byla věnována dynamice odtoku srážkových vod. Statické zatížení je klíčové pro zajištění stability a bezpečnosti konstrukce budovy, zatímco správné pochopení hydrauliky odtoku srážkových vod je nezbytné pro efektivní správu vodních zdrojů a prevenci povodňových rizik.

Tato iniciativa měla za cíl přispět k rozvoji zelených střech v České republice na vědecky podloženém základu, s důrazem na udržitelnost, ekologickou efektivitu a bezpečnost. Testování mělo také pomoci definovat standardy a směrnice pro projektování a realizaci zelených střech, čímž by se zvýšila kvalita a spolehlivost těchto systémů v praxi [17].



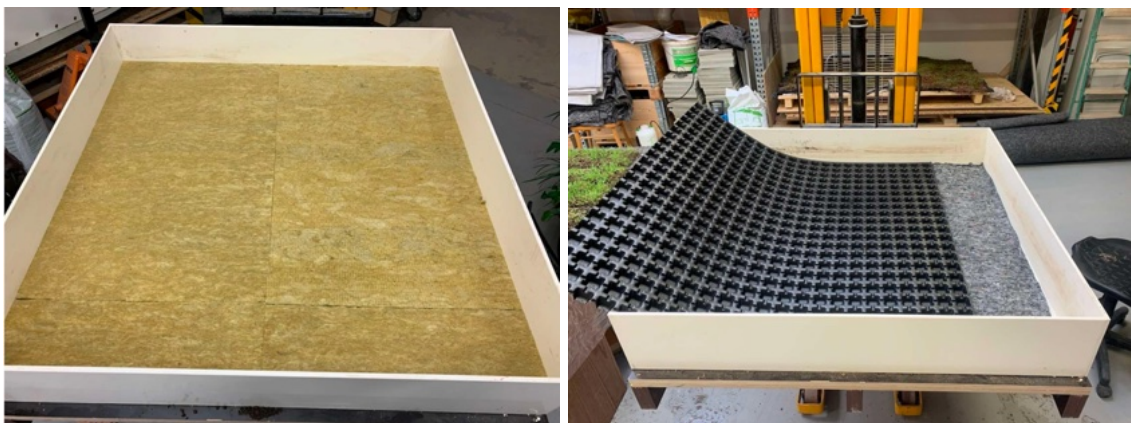
Obr.39) Pohled na realizovanou zelenou střechu v rámci dotačního programu statutárního města Brna „Zeleň střechám“ v roce 2020 (zdroj: autor)

V Německu jsou odtokové výkony zelených střech standardizovány podle normy FLL, která definuje přesné postupy měření. Na rozdíl od Německa měla Česká republika v minulosti nižší počet realizovaných extenzivních zelených střech, a tudíž i méně zkušeností s měřením a evidencí jejich odtokových vlastností. Přímé přejímání německých standardů FLL v tomto „early stage“ vyžadovalo značné časové a finanční náklady na realizaci měření. Proto bylo rozhodnuto definovat a otestovat vlastní zjednodušenou metodiku měření, která by odpovídala českým podmínkám a zohledňovala finanční a časovou náročnost pro realizaci testů. Tímto přístupem bylo možné získat první platná česká data ke kvantifikaci odtoků [16][17].

Metodika byla navržena tak, aby splňovala následující kritéria:

- Za prvé, aby umožňovala srovnatelná měření a porovnání odtokových vlastností různých typů extenzivních zelených střech. Proto byly pevně dané rozměry testovacího zařízení a postupy měření, které jsou stejné pro všechny testované materiály.
- Za druhé, aby poskytla využitelné výsledky pro návrh optimálních skladeb zelených střech vzhledem k odtokovým charakteristikám jednotlivých použitých substrátů a rostlin.

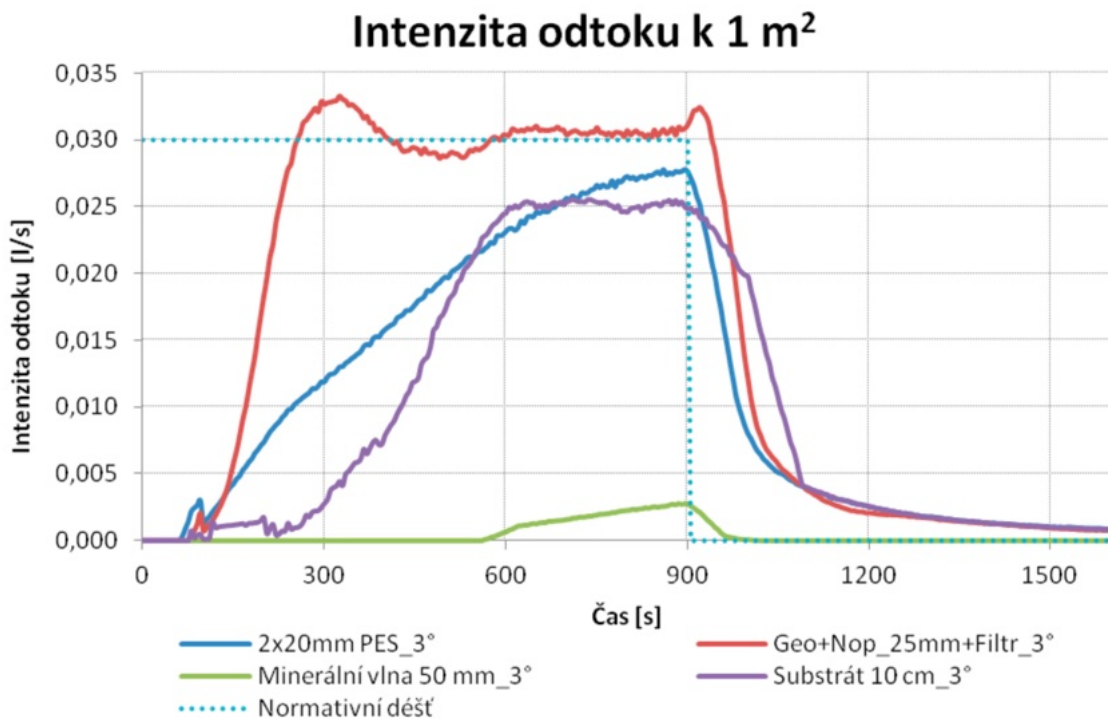
Proto byl navržený formát testů konzultován s hlavními výrobci substrátů, technických materiálů a rvegetace pro zelené střechy, tak aby metodika našla uplatnění ve fázi návrhu i realizace zelených střech napříč dodavatelským řetězcem. Finální metodika pak byla zveřejněna v roce 2020 jako ověřená technologie: Stanovení odtokových parametrů zelených střech evidována RIV/00216305:26110/20:PR34329 [43][44].



Obr. 40) Instalace jednotlivých materiálů tvořících souvrství zelené střechy [24]

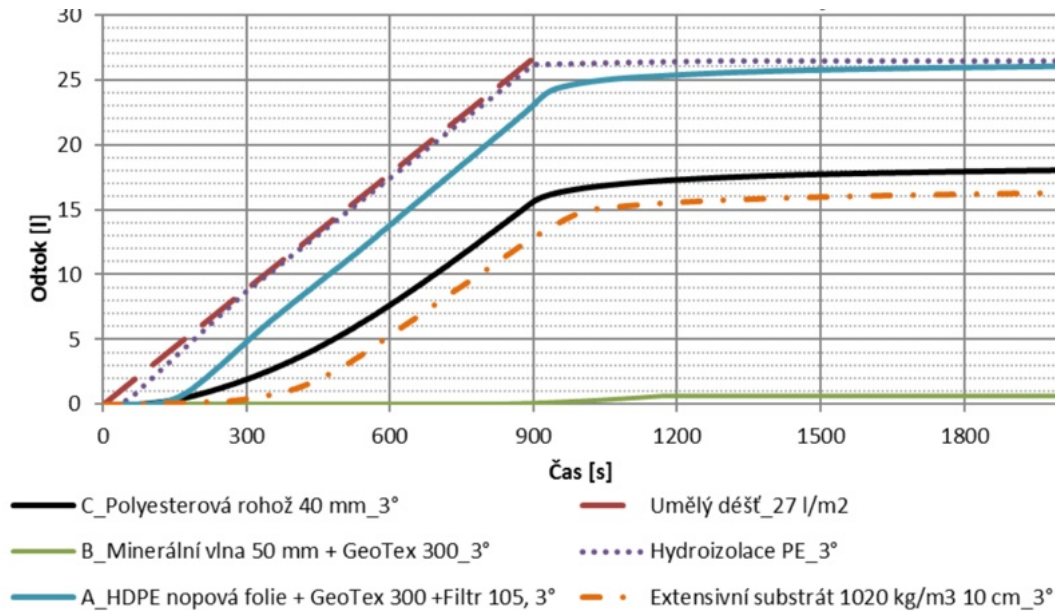
Metoda testování zahrnuje simulaci dešťového úhrnu s intenzitou $0,03 \text{ l/m}^2\text{s}$ po dobu patnácti minut a následné měření objemu vody po dobu 2 hodin, která z testované skladby vyteče. K tomuto účelu byla použita testovací stolice laboratoře Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT. Stolice se skládá z vanové konstrukce o rozměrech $1,2 \times 1,2$ metru pro umístění vzorku. Součástí zařízení je také systém umožňující simulaci individuálního sklonu střechy (maximum 20°) a nad vanou instalovaný zavlažovací systém pro imitaci dešťových srážek [44].

Zavlažovací systém obsahuje měřicí zařízení pro záznam průtoku vody, armaturu pro regulaci průtoku a perforované potrubí pro distribuci vody. Vzorek musí být před testováním řádně kondicionován. Vana je vybavena deseti odtokovými otvory podél okapové hrany pro odvod vody do žlabu, který je pevně spojen s vanou. Odvedená voda je sbírána v nádobě umístěné na laboratorní váze RADWAG WLC 120/C2/K. Hmotnost vody v nádobě se zaznamenává v pravidelných intervalech, což umožňuje posléze vyhodnotit odtokové charakteristiky. Laboratorní váha je připojena k přenosnému počítači pomocí portu RS 232, který ukládá naměřená data.



Graf 1) Data z měření vybraných materiálů zelených střech zpracovaná z měření dle metodiky Stanovení odtokových parametrů zelených střech [24][31].

Metodika popsaná výše poskytla spolehlivý nástroj pro objektivní hodnocení a porovnávání odtokových charakteristik různých typů materiálů pro zelené střechy. A je v současnosti využívána pro mezi výrobkovou komparaci.



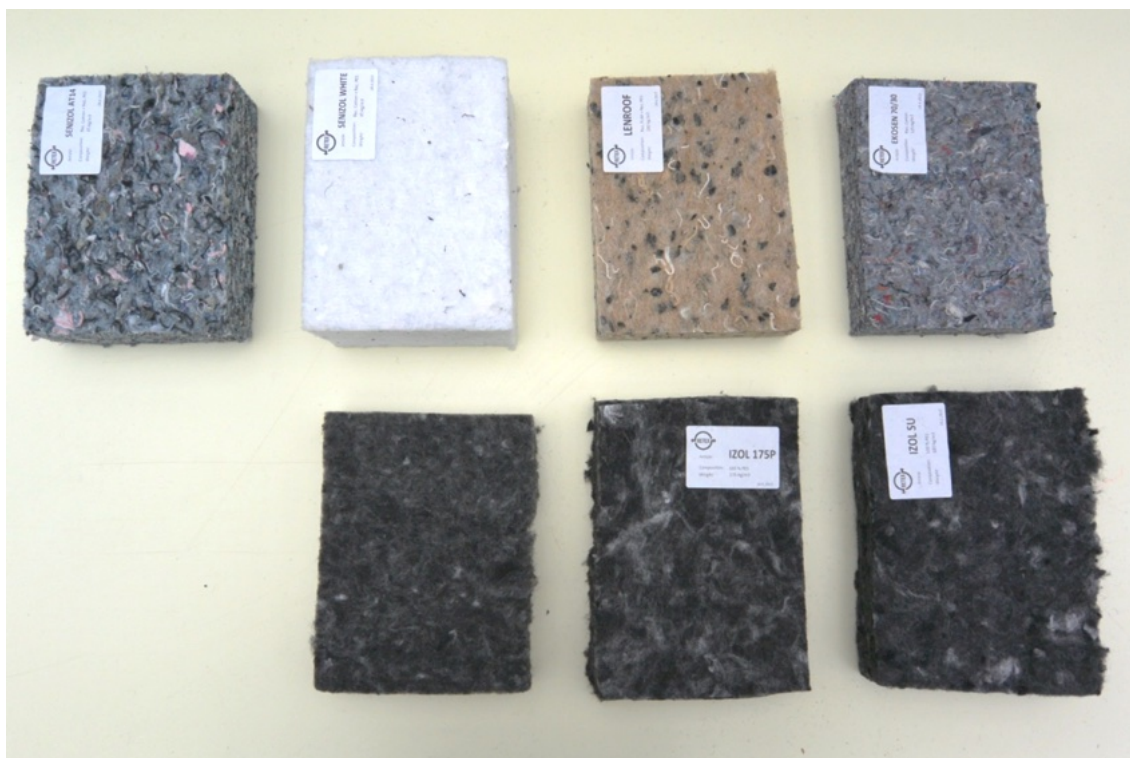
Graf 2) Celkový odtok z 1m² po zátěži 15 min. umělým deštěm o celkové vydatnosti 27 l/m² (zdroj: autor)

Vývoj recyklovaného materiálu pro souvrství zelených střech

Jedním z cílů výzkumného projektu FV10078 bylo ověřit možnosti využití recyklovaných a vedlejších produktů pro tvorbu retenčních a drenážních vrstev ve skladbách zelených střech. Využití takových materiálů by přineslo enviromentální i ekonomické výhody. Cílem bylo definovat optimální složení desky z recyklovaných materiálů s potřebnými fyzikálními charakteristikami, čímž by se otevřela cesta k jejich praktickému uplatnění v pozemním stavitelství [28].

Definice polyesterových matrací

Předmětem technického řešení byla vláknitá deska, jejíž kompozitní složení umožňuje vyšší schopnost zadržení odtoku srážek, což koresponduje spotřebami sukulentních rostlin respektive zelených střech. Další funkcí retenční desky je, že umožňuje prorůstání kořenů rostlin do své struktury, čímž celou skladbu vegetačního souvrství zpevní. Retenčně vegetační deska byla vyrobená



Obr. 41) Startovací soubor recyklovaných materiálů vyráběných společností Retex a.s. (zdroj: autor)

technologíí termopojení pomocí bikomponentních vláken bez použití chemických přísad na výrobní lince umožňující kontinuální výrobu. K retenční schopnosti kompozitní desky přispívá vstupní směs, která je z větší části složená z recyklovaných kousků o průměru 15 mm, recyklovaných vláken a termopojivých vláken. Deska umožňuje efektivní řešení detailů při stavebních pracích.

Definice skladeb střešního souvrství

V prvotním návrhu byly 3 základní varianty skladeb, přičemž nejjednodušší měla 2 modifikace. Základem byly desky z mletých recyklovaných materiálů prosévaných sítím 15x15 mm, a to v tloušťkách 15 a 35 mm.

Tyto kombinace byly otestovány technologickou zkouškou instalace, která neodhalila žádné komplikace. Při hledání optima ale byl zjištěn problém ve výrobě, který vedl ke změně tloušťky desek.

Tato změna pak podmínila úpravu druhé etapy testování a současně byl navržen i nový návrh variant skladeb s ohledem na zjištěný výrobní problém během prvního cyklu zkoušek. Cílem bylo na základě praktických zkušeností vyladit optimální technologické řešení systému. Pro testování deskových

materiálů na šikmé střeše byly použity desky o tloušťce 6 cm. Tyto desky udržely tvar bez problémů až do sklonu 30 stupňů. Jejich aplikace byla snadná a pohyb po nich nevyžadoval žádné dodatečné zajištění bezpečnosti nad rámec požadavků stanovených předpisy.

Technologické ukotvení desek probíhalo za pomoci montážní pěny na bázi polyuretanu, která je dlouhodobě odolná působení huminových kyselin přítomných v půdě. Zpočátku navíc sloužila ke stabilizaci jednotlivých vrstev a urychlení osídlení plochy vegetací. Cílem bylo zajistit komplexní stabilizaci systému již během počáteční etapy zakládání zelené střechy.

Na závěr bylo vyvinuto upravené složení koncového materiálu na bázi recyklovaného polyesteru (PES). Tento materiál prošel vývojem po otestování několika variant lišících se gramáží, teplotou výroby a velikostí síta při mletí vstupních recyklovaných surovin. Tyto parametry vedly k vytvoření ideální mikrostruktury s vysokou nasákavostí a pevností v sušším i vlhčím stavu. Koncový materiál na této bázi tak splnil stanovené požadavky a byl vyhodnocen jako nejvhodnější řešení pro testování ve větším měřítku.

Ze všech testovaných materiálů měl zkoumaný materiál jediný intenzitu odtoku srovnatelnou se standardní tloušťkou substrátu, ve kterém vegetace nejlépe roste. Jeho vláknitá struktura umožňovala pronikání kořenů. V kombinaci s retenčními vlastnostmi tak bylo možné zvažovat snížení vrstvy substrátu v extrémech až na 3 cm.

Cílem tak byla skladba extenzivní střechy pro sušší oblasti s minimální hmotností. Testovaný materiál představoval doplněk stávající nabídky na trhu s ohledem na extenzivní řešení pro středoevropské podmínky.

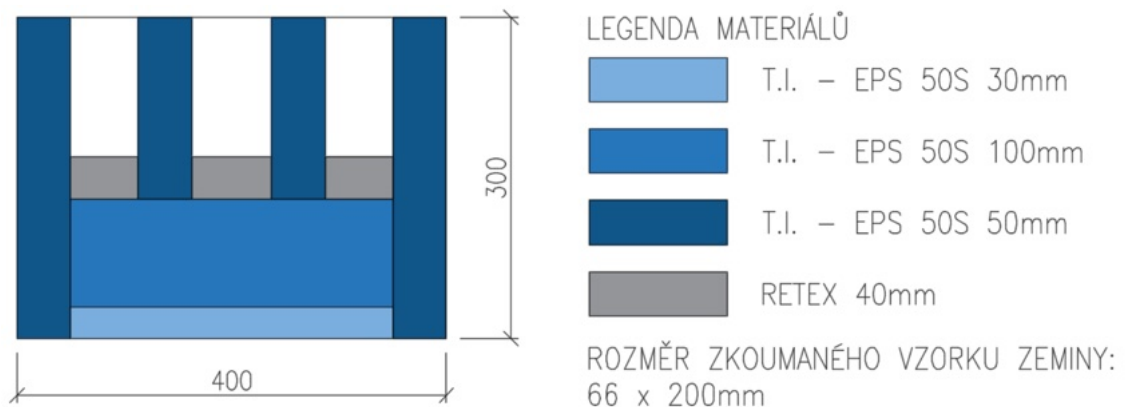
V současnosti je materiál stavebním trhem zcela přijat a tvoří nedílnou součást skladeb extenzivních střech [28].

Pro zajištění myšlenky datové podpory návrhu vegetačních konstrukcí byl definován směr dalšího výzkumu těchto konstrukcí a to studium teplotně vlhkostních procesů. Dále v této kapitole je uvedeno tepelně technické měření na výseku skladeb zelených střech pro získání prvotních informací o procesech přenosu tepla a hmoty ve vegetačním souvrství.

V rámci tepelně-technických požadavků na střešní plášť je dle ČSN 730540 prováděn výpočet součinitele tepelné vodivosti při stacionárních okrajových

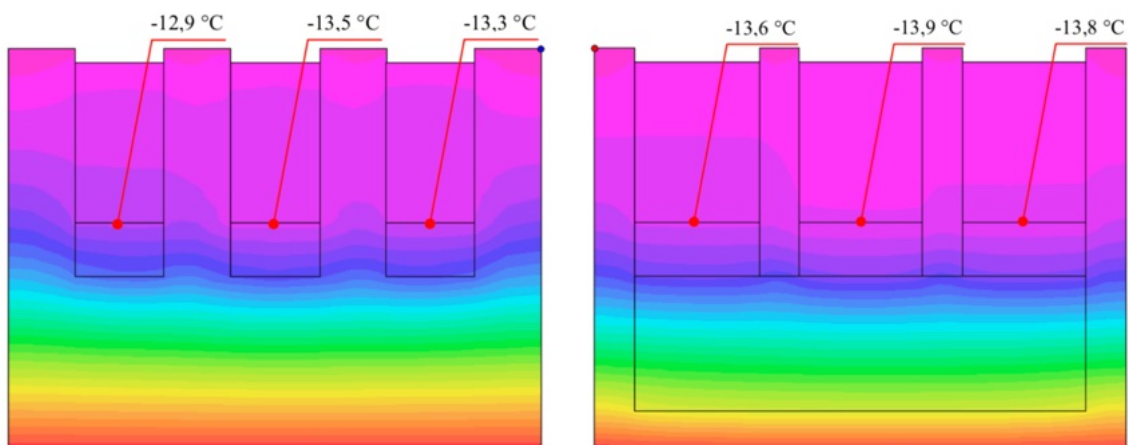
podmínkách běžné praxe dle lokality $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jelikož aplikované materiály vykazují vysokou nasákavost byly měření zaměřeny nikoliv na tepelný odpor materiálu, ale na fázový posun teplotního kmitu (dynamické tepelně-vlhkostní procesy ve skladbě zelené střechy).

Pro experimentální ověření vlivu charakteru teplotní rampy na fázovou přeměnu vody v souvrství zelené střechy bylo nutné navrhnout zkušební box, tak aby byl experiment co nejméně ovlivněn deformací teplotního pole, jak od jednotlivých vzorků mezi sebou, tak od okolní teploty, která v klimakomoře



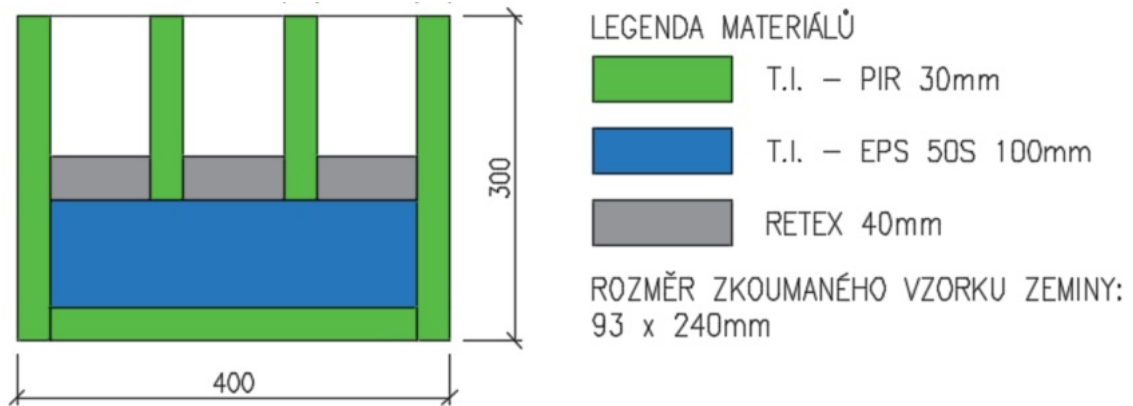
Obr. 42) Schéma testovacího boxu varianty A [28]

působí na zkušební element ze všech stran. Zkušební box byl limitován maximálním rozměrem 50 x 50 x 40 cm z důvodu velikosti klima komory, ve které měření probíhalo. Dále musel být zkušební box rozčleněn na tři samostatné části,



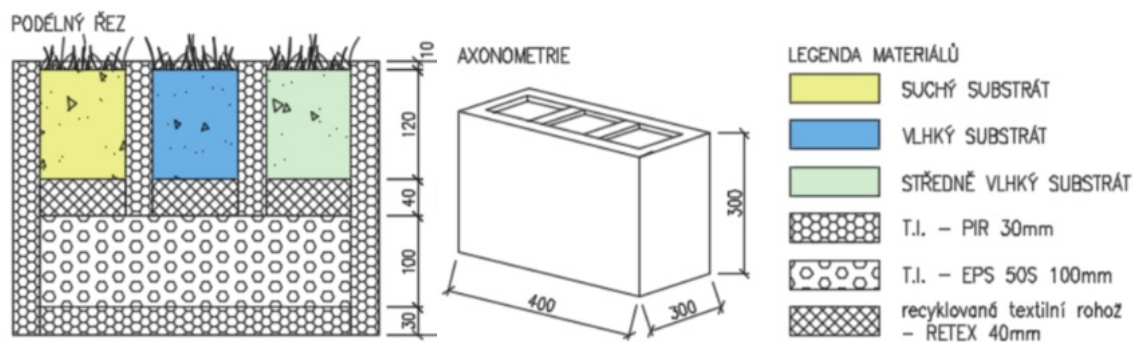
Obr. 43 a 44) Rozložení vnitřních teplot v testovacím boxu varianty A a B [28]

tak aby mohli být současně měřeny různě nasycené vzorky souvrství zelené střechy. Dle tohoto zadání a materiálů, které byly k dispozici v laboratořích, byl vytvořen první návrh zkušební boxu.



Obr. 45) Schéma testovacího boxu varianty B [28].

U této první varianty A byl k dispozici pouze malý vzorek zeminy o rozměrech 66 x 200 mm. Sestavení požadovaného zkušební boxu pro tuto variantu bylo proto velmi komplikované. Z tohoto důvodu byla navržena varianta B kde byla použita PIR izolace tloušťky 30 mm. Díky tomu se podařilo zvětšit velikost zkoušeného vzorku zeminy a zjednodušit přípravu samotného zkušební boxu. Tato varianta využívala výhod izolačního materiálu PIR, který má tenkou vrstvu, lepší tepelnou izolační vlastnosti a nižší náročnost při zpracování a řezání. Současně zajišťoval vyšší přenosnost boxu. Tato varianta tak kombinovala požadované vlastnosti pro měření s optimální konstrukcí boxu. Díky postupné optimalizaci se podařilo zajistit kvalitní podmínky pro sledování teplotních vlivů na analyzované vzorky půdy [28].



Obr. 46) Schéma testovacího boxu varianty B včetně identifikace vlhkosti substrátu [28].

Varianta B vykazovala nejmenší teplotní deformace. Rozdíly teplot ve srovnání s předchozí variantou činily pouze 0,1 °C po zaokrouhlení.

Právě tato varianta C byla vybrána pro další měření. Hlavními důvody byly:

- Největší rozměr zkoušeného vzorku souvrství zelené střechy (93 x 240 mm)
- Nejplynulejší průběh teplotního pole
- Nižší náročnost zpracování v porovnání s EPS
- Vyšší přesnost při práci s PIR izolací

Jestliže budeme vycházet z předpokladu, že celkové teplo, citelné i latentní teplo, které lze do substrátu akumulovat v teplotách okolo 0° C, tedy teplotách fázové přeměny vody v led a opačně, můžeme vyjádřit následujícím vztahem

$$Q = Q_s + Q_l = \int_{T_1}^{T_{melt}} mc_{ps} dT + m \cdot \Delta h_{melt} + \int_{T_{melt}}^{T_2} mc_{pl} dT \quad (1)$$

$$Q = m \left[c_{ps} \cdot (T_{melt} - T_1) + \Delta h_{melt} + c_{pl} \cdot (T_2 - T_{melt}) \right] \quad (2)$$

<i>kde</i>	Q_s	<i>citelné teplo</i>
	Q_l	<i>latentní teplo</i>
	m	<i>hmotnost materiálů</i>
	c_{ps}	<i>měrná tepelná kapacita – pevné skupenství</i>
	c_{pl}	<i>měrná tepelná kapacita – kapalné skupenství</i>
	Δh_{melt}	<i>měrný tepelný obsah (entalpie)</i>
	T_1	<i>teplota počáteční</i>
	T_{melt}	<i>teplota tání</i>
	T_2	<i>teplota konečná</i>

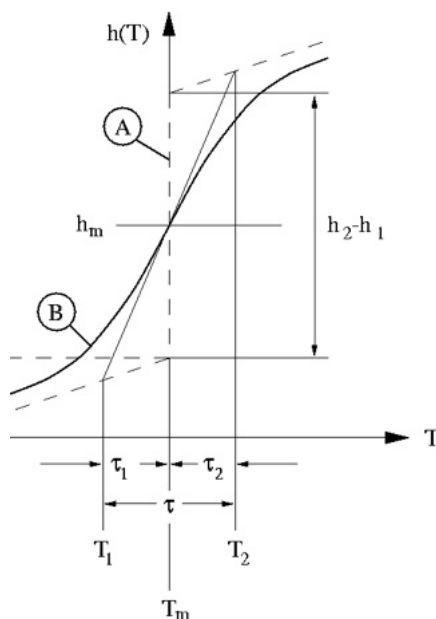
pak vegetační substrát může absorbovat až desetinásobné množství tepla než klasické materiály, z důvodu fázové změny, která v materiálu nastává. Jedny z hlavních faktorů, ovlivňující charakteristiku průběh fázové změny ve vegetačním souvrství, jsou vlhkost a pórovitost, resp. obsah vzduchu v substrátu.. Ty mohou podstatnou měrou zpomalit zvyšování teploty zeminy a nasákových vegetačních materiálů.

Jestliže soustava při ději za konstantního tlaku zvětšuje svůj objem, je Δh větší než přírůstek vnitřní energie o příslušnou hodnotu vykonané objemové práce. Při zmenšování objemu je naopak Δh menší o získanou práci. Zavedení takto definované funkce stavu zjednodušuje výpočty při uvažování změn soustavy za konstantního tlaku.

Entalpií je funkce teploty s diskontuitou v teplotě fázové změny materiálu. Matematicky lze entalpii vyjádřit:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = n \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (3)$$

kde c_p měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
 Δh měrný tepelný obsah (entalpie) [$J \cdot kg^{-1}$],
 T teplota [T].



τ teplotní úsek skupenské změny [K]
 c_p měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 T_m teplota tání [K]
 T_1 počáteční teplota [K]
 T_2 koncová teplota [K]
 A nespojitá funkce pro specifickou entalpii
 B spojitá funkce pro specifickou entalpii

Graf 3) Funkce pro specifickou entalpii vegetačního substrátu a nasávkových vegetačních materiálů.

Při teplotách mimo fázovou přeměnu vody v led dochází k akumulaci pouze citelného tepla (tzn. mění se teplota vlastního materiálu). Teplo, které lze pak

akumulovat do materiálu, je definováno jako množství akumulovaného tepla závisící na množství materiálu, tepelné kapacitě materiálů a rozdílu teplot.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (4)$$

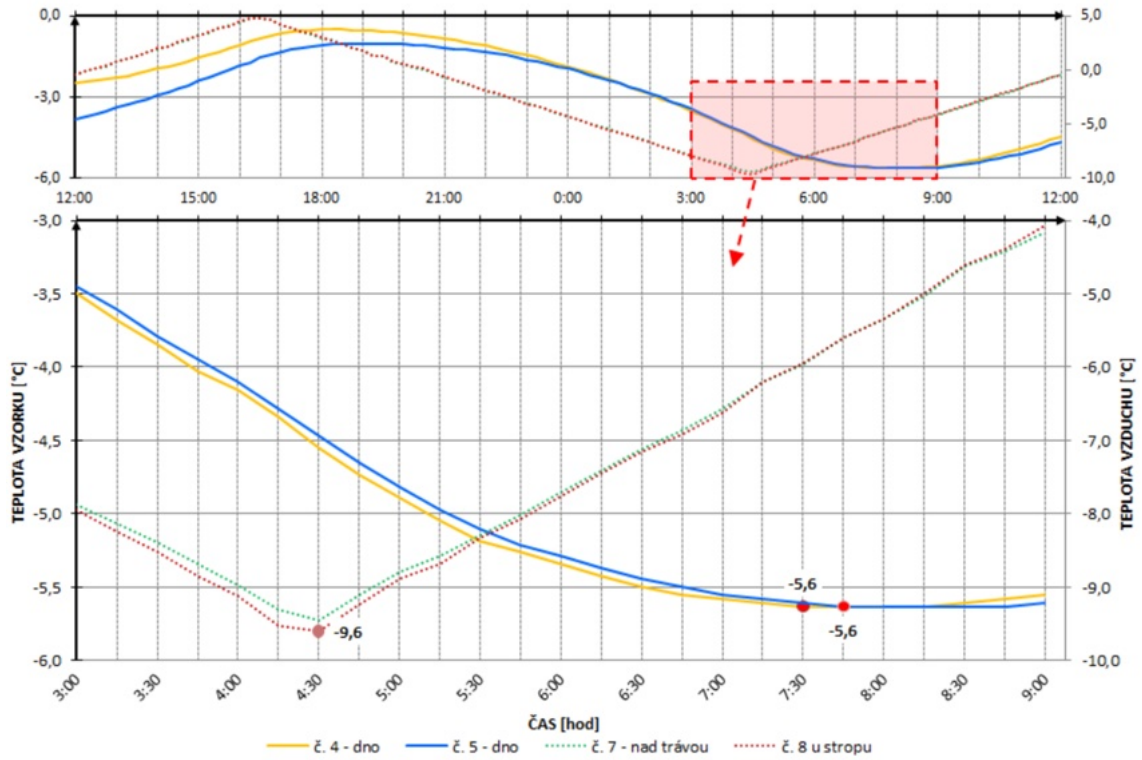
kde	Q	citelné teplo,
	m	hmotnost materiálů,
	c_p	měrná tepelná kapacita,
	θ_1	teplota počáteční,
	θ_2	teplota konečná.

Studium fázové přeměny vody ve vegetačním substrátu

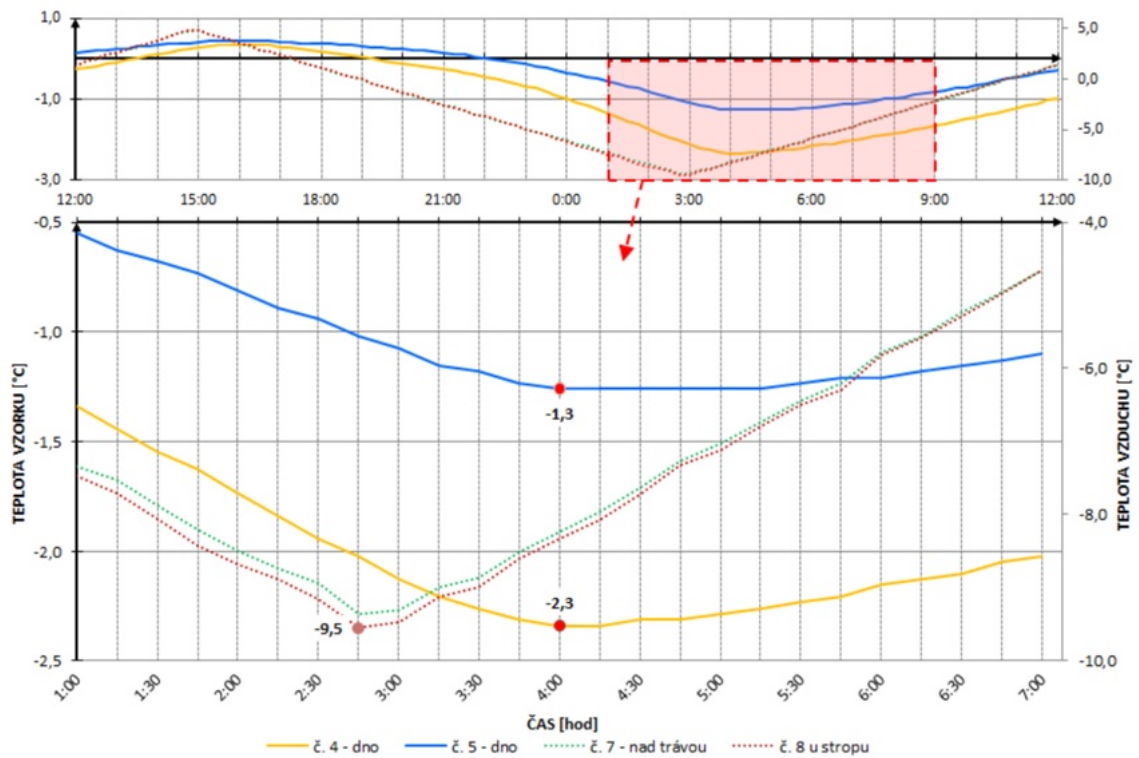
Experimenty simulovaly teploty vzduchu v běžné v zimě, kdy se nepravidelně střídají mrazy s teplotami nad nulou. Cílem bylo reálněji simulovat klimatické podmínky vybraných oblastí v zimním období. Dílčí experimenty sledovaly chování testovaných souvrství za různých teplotních scénářů typických pro dané roční období. Měly tak poskytnout komplexnější obraz o odezvě dané konstrukce na povětrnostní vlivy.



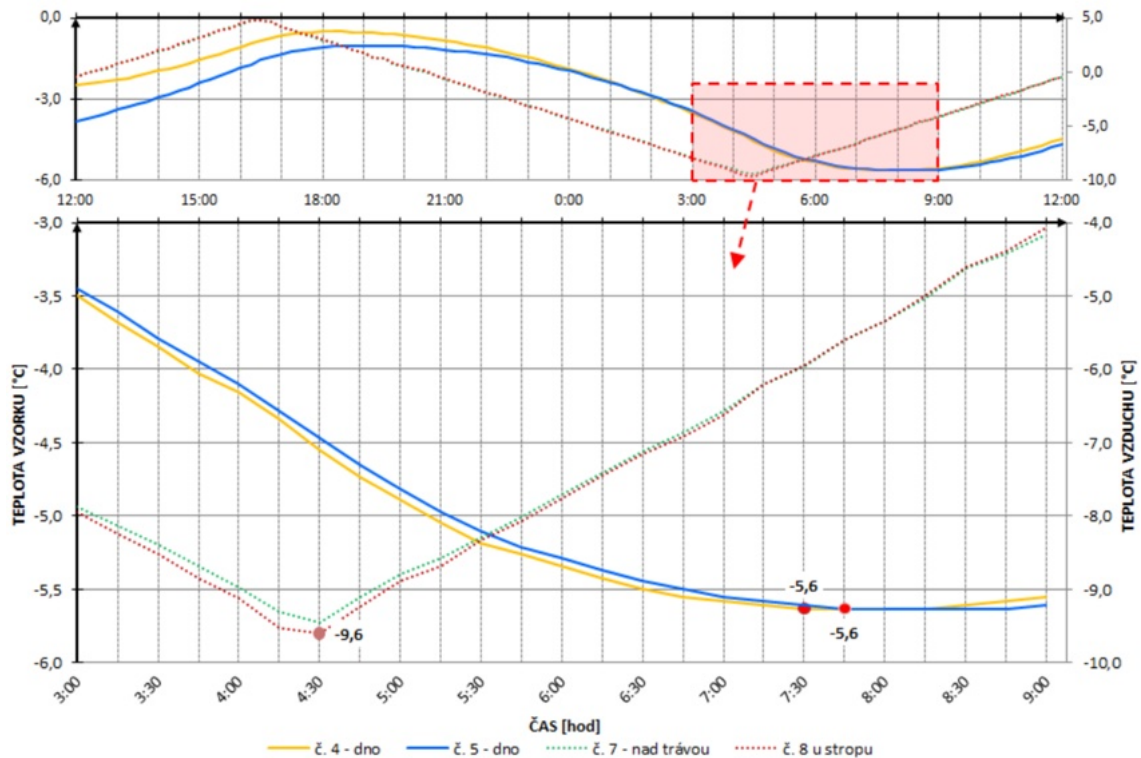
Obr. 47) Pohled do klimakomory Memmert CT256 se vzorky [28]



Graf 4) Teplotní kmit, +5 °C; -10 °C za 12 hodin [28].



Graf 5) Teplotní kmit, +1 °C; -10 °C za 12 hodin [28].



Graf 6) Teplotní kmit, $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 12 hodin [28].

Experimenty potvrdili nutnost zaměřit se na vliv fázového posunu s ohledem na vlhkost substrátu resp. typy skladby zelené střechy. Dosavadní poznatky ze série experimentů lze sumarizovat:

- Mírné kolísání teplot kolem nuly způsobuje posun 2-3 hodiny.
- Větší změny teplot (typické pro horské oblasti) vedou k posunu 3-4 hodiny.
- Nejdelší posun nastává při opakovaném ochlazování uprostřed zimy
- Při pozvolném jarním rozmrzání je posun 1-2 hodiny

Jelikož se jedná o velmi závažnou problematiku z hlediska energetického hodnocení staveb byly další výzkumné aktivity zaměřeny právě na studium fázové přeměny vody ve skladbě zelených střech a fasád, neboť tento jev má významný vliv na odvod dešťové vody [39][42][43][44][45][46].

Následující kapitola této práce bude dále zaměřena pozornost na významnou roli zelených střech a fasád v kontextu environmentálního hodnocení okolí staveb. Jak mohou tyto zelené prvky přispět k lepšímu mikroklimatu ve městech, snižování energetické náročnosti budov a podpoře městské biodiverzity.

Environmentální hodnocení lokality Praha – Nové Dvory

Pro vysoce kvalitní simulaci (velikost buňky 2x2 m) jsou projektové oblasti modelovány v úrovni detailu 2 s pomocí softwaru Greenpass Editor (GP.e) a simulovány systémem ENVI-met.

Simulace představuje přijatelné, ale hrubé zjednodušení reality. Typy fasád jsou kategorizovány. Navíc je model vytvořen bez topografie, aby bylo zajištěno simulování a analýza projektu ve vybraném rozlišení.

V klimatickém testu jsou zkoumány místní mikroklimatické podmínky následujících projektových oblastí:

- Plánování (PLAN) (Oblast #1)
- Plánování (PLAN) (Oblast #2)

Výsledky z těchto dvou oblastí následně umožňují hodnocení klimatické odolnosti stavu plánu, stejně jako odvození nezbytných akcí nebo možností dané lokality.

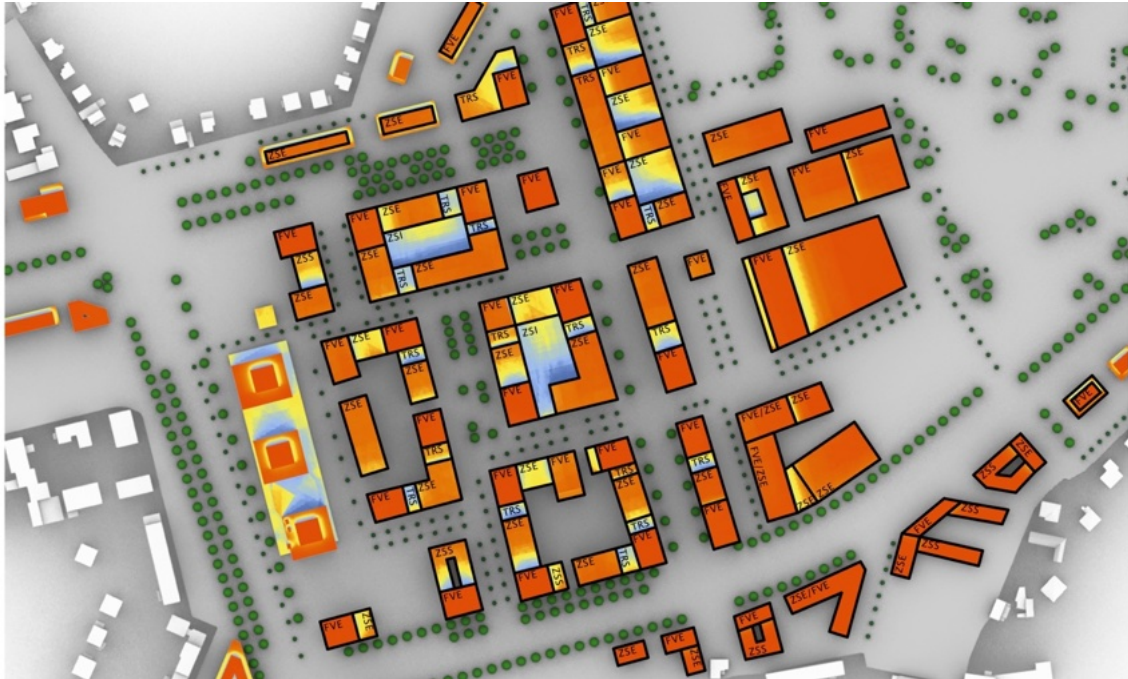
Komplexní zhodnocení pro střešní roviny

Na základě získaných poznatků ze simulací sluneční radiace a proudění větru byla vytvořena grafika se zobrazením množství dopadajícího slunečního záření na střešní roviny v kW/m²a.

Dále byla provedena korekce typů střech. Grafika ukazuje, jak jednotlivé typy střech absorbují a využívají sluneční energii. Zelené střechy mohou vstřebávat část slunečního záření pomocí vegetace, což přispívá ke snížení tepelné zátěže v budově a jejím okolí. Solární střechy jsou vybaveny fotovoltaickými panely, které dokážou přeměnit sluneční energii na elektrickou energii. Tradiční střechy jsou představovány jako referenční kategorie (bez označení), které nevyužívají sluneční energii k žádnému specifickému účelu.

- TRS – střecha s pobytovou terasou
- ZSS – střecha semi intenzivní
- ZSI – zelená střecha intenzivní
- ZSE – zelená střecha extenzivní
- FVE – střecha s fotovoltaickými panely

Tento grafický přehled umožňuje lepší porozumění rozdílnému využití sluneční energie v závislosti na typu střechy. Poskytuje náhled na možnosti, které jednotlivé typy střech nabízejí v rámci energetického využití a udržitelnosti budov.



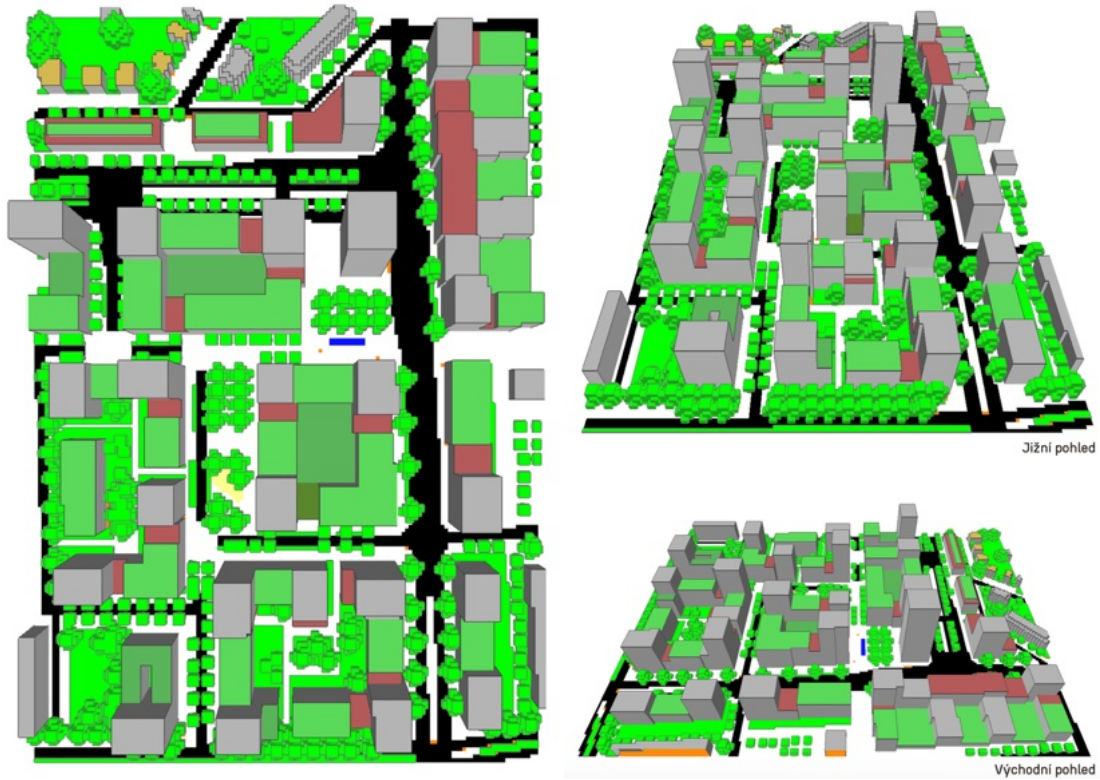
Obr. 48) Celkové množství sluneční radiace za rok v kWh/m² (zdroj: autor)

Vstupní simulační data

Pro simulaci plánovaného projektu je jako vstupní meteorologická data vybrán idealizovaný horký den z měřicí řady posledních 10 let (2012 - 2021), odpovídající dané lokalitě. Hlavní letní směr větru lze jasně identifikovat jako západ-jihozápad (JZZ). Hlavní letní směr větru a rychlost větru zůstávají konstantní pro lepší srovnatelnost. Teplota vzduchu a vlhkost jsou do simulace vkládány po hodinách.

Tab. 1) Přehled meteorologických dat vstupujících do výpočtu (zdroj: autor)

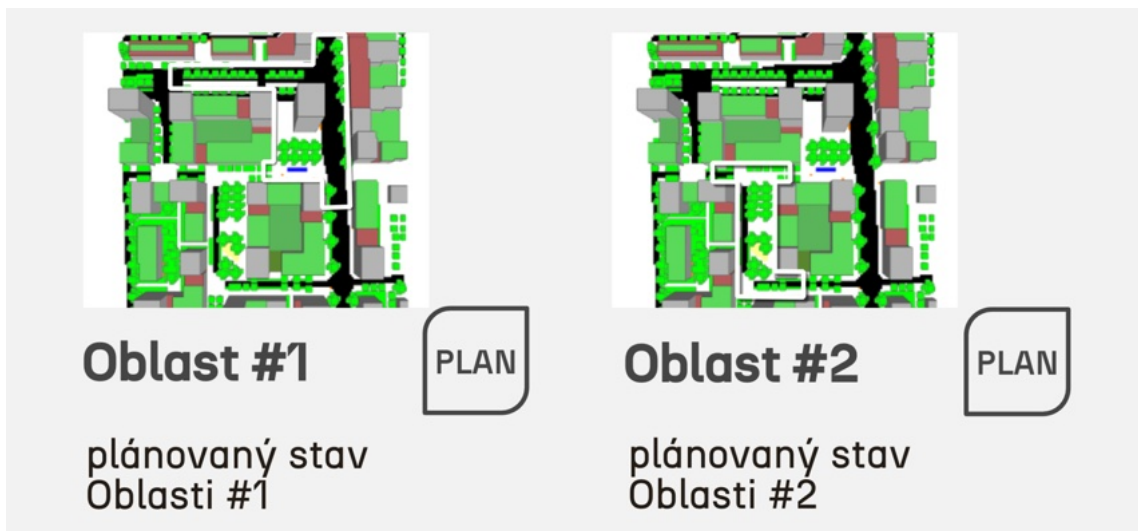
Meteorologická data		2012-2022 Praha, Nové Dvory teplota vzduchu, vlhkost, směr větru, rychlost větru, radiace
Optimální horký den	21. červenec	Projektovaný horký den
Směr větru	JZZ	Převládající směr větru v létě
Rychlost větru	3,78 m/s	Převládající rychlost větru
Teplota vzduchu	min 16,43 °C max 30,06 °C	Denní minimum & denní maximum
Vlhkost	min 36,00 % max 75,00 %	Denní minimum & denní maximum



Obr. 49) Výpočtový model lokality zohledňující jednotlivé typy střech dle simulace sluneční radiace (zdroj: autor)

Metodika hodnocení

Studie Climate check zahrnuje simulaci ve vysokém rozlišení, hodnocení a analýzu projektu s ohledem na 12 hlavních ukazatelů pro oblasti klimatu a energetické bilance, vodní bilance, vzdušné bilance a biodiverzity. Tvoří základ pro posouzení klimatické odolnosti projektu.



Obr. 50) Rozdělení lokality na dvě podrobněji hodnocené oblasti (zdroj: autor)

Níže je podrobně analyzováno šest zvláště významných klíčových ukazatelů vzhledem k jejich vlivu na příslušné tematické oblasti a jsou navržena opatření pro jejich optimalizaci.

Klima

- Skóre tepelného komfortu (TCS): používá definované teplotní třídy k hodnocení vnímané teploty na otevřeném prostranství na člověka, což je klíčový ukazatel kvality pobytu v projektové oblasti.
- Skóre tepelné zátěže (TLS): hodnotí tepelnou emisi projektové oblasti do okolí.

Energie

- Skóre tepelné akumulace (TSS): ukazuje, kolik energie je uloženo v materiálech budov a otevřeném prostoru.

Vodní bilance

- Odtokový součinitel (ROS): ukazuje průměrný odtokový koeficient pro projektovou oblast, tj. procento srážkové vody, která teče přímo do kanalizačního systému bez využití.

Ovzduší

- Pohlcení CO₂ (CSS): ukazuje schopnost sekvestrace (pohlcení) CO₂ (t/rok) vegetací (v biomase) v projektové oblasti.

Další ukazatele (klíčové výkonnostní ukazatele) doplňují rámec pro posouzení klimatické odolnosti přítomného projektu

- Pocitová teplota (PET): je ukazatelem vnímané pocitové teploty člověkem. Kromě teploty vzduchu se do výpočtu zahrnuje také vlhkost, rychlost větru a krátkovlnné a dlouhovlnné záření ze slunce i člověka.
- Listová plocha (LA): modelovaný součet ploch listů všech rostlin v projektové oblasti (viz obrázek vpravo).
- Záření (RAD): popisuje sluneční záření působící na povrch projektové oblasti nebo povrchové materiály projektu v rozhodný horký den.
- Albedo (ALB): je retro-reflexní chování povrchových materiálů (viz obrázek vpravo).
- Evapotranspirace (EVA): popisuje odpařovací kapacitu rostlin, vody a půdních ploch v projektové oblasti.
- Faktor stínění (SAF): ukazuje procento zastíněných povrchů v projektové oblasti.

Teplotní mapa na základě Pocitové teploty (PET) v projektové oblasti a mapa proudění vzduchu poskytují informace o oblasti citlivé na klimatické působení. Tyto prvotně slouží jako výchozí body pro cílené návrhy opatření pro optimalizaci.

Klimatická a energetická bilance projektu je měřena pomocí následujících indikátorů:

- Skóre tepelného komfortu (TCS): hodnotí vnímanou teplotu v otevřeném prostoru pomocí definovaných tříd teplot a je tak klíčovým ukazatelem kvality pobytu v projektové oblasti.
- Pocitová teplota (PET): je termální index pro vnímanou teplotu u lidí. Do výpočtu jsou kromě teploty vzduchu zahrnuty také vlhkost, rychlost větru a krátkovlnné a dlouhovlnné záření ze slunce.
- Skóre tepelné zátěže (TLS): měří tepelnou emisi projektové oblasti do jejího okolí.

Skóre tepelného komfortu (TCS)

Obě projektové oblasti mají díky stínění budov a vegetaci dobrou tepelnou pohodlí 57,76 TCS (Oblast #1) a 63,05 TCS (Oblast #2). Rozsah teplot "horko" až "extrémně horko" se pohybuje mezi 30% až 39% v obou oblastech. Nejnižší tepelné pohodlí v průběhu dne je měřeno v 16:00 (Oblast #1) a ve 13:00 (Oblast #2) a dosahuje hodnoty 38,40 TCS a 42,80 TCS.

Tab. 2)Skóre tepelného komfortu

	Oblast #1	Oblast #2
Skóre tepelného komfortu:	57,76 TCS	63,05 TCS
Rozsahy v úrovních "horká" až "extrémně horká" v průběhu dne:	38,90%	30,15%
Nejnižší tepelné pohodlí během dne:	16:00: 38,40 TCS	13:00: 42,80 TCS

TCS	Výkon
0-30	nízký
30-50	průměrný
50-70	dobrý
70-100	velmi dobrý

Tepelná pohoda

Oblasti zobrazené na tepelné mapě v modré barvě vykazují dobrou tepelnou pohodu. Je to především díky stínícímu efektu budov a vegetace. Je zřejmé, že existující i plánované výsadby stromů mají na tepelné pohodlí pozitivní vliv.

Naopak nezastíněné a sluncem ozářené oblasti vykazují nízkou tepelnou pohodu. Zejména v oblastech s malou ventilací na východě na hlavní silnici a v oblastech, které jsou jen mírně zastíněné, se tvoří horké body, které jsou na mapě zobrazeny červeně v třídě tepelného pohodlí "velmi horko".



Obr. 51) Tepelná mapa, fyziologická ekvivalentní teplota (PET) Horký den 15:00

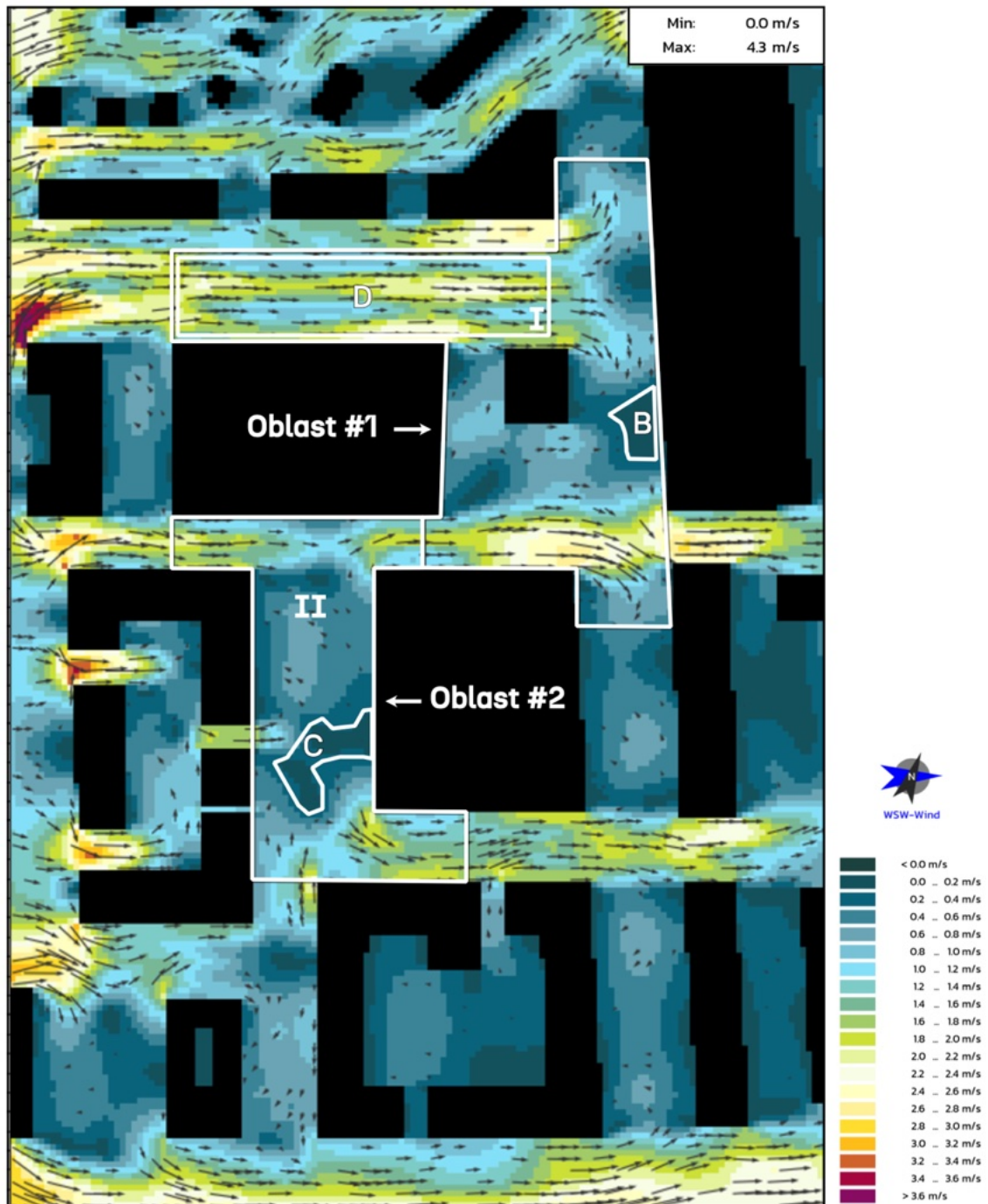
V současném projektu je velmi horko zejména v málo zastíněných oblastech hlavní silnice umístěné na východě (1+2) Oblastí #1, stejně jako v venkovní oblasti pobytu v centrální části (C) Oblasti #2. Centrální otevřené prostory v rámci projektu jsou převážně charakterizovány výrazným stíněním, které poskytují okolní velké budovy. Oblast #2 prezentuje pocitovou teplotu (PET) o $+1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve srovnání s Oblastí #1, a to díky tomu, že Oblast #1 se skládá z větší hlavní silnice, která přispívá ke zvýšení nezastíněných prostor, což následně vede k vyššímu výskytu vyšších teplot v rámci částí oblasti A a B. Termogram na předchozí straně demonstruje výsledky PET v 15:00 v daný projektovaný den.

Proudění větru

Na jedné straně je vyvětrání otevřeného prostoru klíčové pro vnímanou teplotu v otevřeném prostoru a na druhé straně je zvláště důležité pro ochlazení oblasti během nočních hodin. Aktuální projektové oblasti jsou ve většině částí velmi dobře větrané. Oblasti s nízkou rychlostí větru, především v centrální části C Oblasti #2 a podél hlavní silnice a centrálního otevřeného prostoru části B Oblasti #1, mohou přispívat k vyšším teplotám a vzniku lokálního tepelného ostrova. Stojí za zmínku, že nízká rychlost větru hraje zásadní roli při poskytování pozitivního větrného pohodlí na pobytových plochách. Srovnání mezi Oblastí #1 a Oblastí #2 ukazuje vliv budov na odchytku větru a komfort v oblasti. Mapa proudění větru na další straně ukazuje směr a rychlost větru v 15:00 v daný projektovaný den.

Vodní bilance

Vodní bilance projektu se měří pomocí odtokového koeficientu. Odtokový koeficient (ROS) udává průměrný odtokový koeficient projektové oblasti, tedy poměr srážkové vody, která proudí přímo do kanalizace, aniž by byla využita. Skóre odtoku v Oblasti #1 má hodnotu 0,58, což znamená, že 42% srážkové vody může přímo infiltrovat, zasakovat se nebo odpařovat. Oblast #2 má hodnotu 0,37, což představuje 63%. Tyto hodnoty lze snížit dalším využitím propustných povrchových materiálů a zeleně.



Obr. 52) Mapy proudění větru | Větrné pole - horký den 15:00 (zdroj: autor)

Pohlčení CO₂

Pohodlí vzduchu v projektu je měřeno pomocí skóre pro sekvestraci uhlíku (CSS). Kapacita pohlčení CO₂ (CSS): udává kapacitu pohlčení CO₂ (t/rok) vegetací (biomasy) v projektové oblasti. Skóre sekvestrace CO₂ (CSS) Oblasti #1 je 3,39 t/rok, zatímco Oblast #2 má hodnotu 2,78 t/rok. Zvýšená hodnota Oblasti #1 je hlavně dána větším počtem velkých stromů.

Skóre environmentálního hodnocení

Výsledky simulace ukazují velmi dobrý výsledek pro současný stav projektových oblastí v oblasti klimatu a proudění vzduchu. Stojí za zmínku dobré tepelné pohodlí v projektové oblasti díky stínění vegetací a budovami a také rozsáhlým opatřením k zasakování srážkové vody. Některé horké body by mohly být sníženy dalšími optimalizačními opatřeními. Větrání v projektových oblastech je většinou na dostatečné úrovni, s určitými zónami se střední rychlostí větru, která také přispívá k vylepšenému tepelnému pohodlí. Naopak existují oblasti s nízkou rychlostí větru, což je výhodné v oblastech, kde lidé tráví čas. Oblasti A, B i C vykazují ale téměř nulovou rychlost větru, což způsobuje mírné lokální přehřívání. Jedná se v podstatě o jediný zásadní defekt lokality ve fázi plánování.

Tab. 3) Skóre hlavních ukazatelů oblasti Praha – Nové Dvory

Klima		
	Oblast #1	Oblast #2
Skóre tepelného komfortu (TCS)	57,76 TCS	63,05 TCS
Skóre tepelné zátěže (TLS)	+0,016 °C	+0,013 °C
Energie		
Akumulace energie (TSS)	2,37 GJ	1,10 GJ
Vodní bilance		
Odtokový koeficient (ROS)	0,58	0,37
Pohlčení CO₂		
Pohlčení CO₂ (CSS)	3,39 t/rok	2,78 t/rok

V této části habilitační práce byly představeny případové studie a experimenty, ukazující, jak systémy vegetačních konstrukcí přispívají k energetické efektivitě a udržitelnosti budov. Testování na Ústavu pozemního stavitelství naznačilo potřebu komplexního dialogu mezi odborníky pro lepší porozumění interakci různých složek zelených střešních systémů. Tato kapitola také zdůrazňuje význam zelených střech a fasád pro zlepšení mikroklimatu ve městech, snížení energetické náročnosti budov a podporu městské biodiverzity. Výsledky simulací a testů v této kapitole poskytují informace pro další rozvoj a aplikaci těchto systémů v praxi, podporující udržitelný rozvoj městských oblastí.

4.3. Aplikace virtuální a rozšířené reality

Dalším z klíčových témat 4.0 je využití smíšené (MX) reality ve stavebnictví, a to jak v praktické aplikaci, tak i v akademickém prostředí. Představí se případ, kdy byla rozšířená realita použita pro montáž digitální repliky stavební konstrukce na Stavebním veletrhu v Brně, kde návštěvníci mohli skrze digitální zařízení sledovat a interagovat s virtuálními prvky konstrukce. A představení virtuální reality pro expertní činnost a následnou analýzu obrazových dat při stavebním dozoru nebo konzultací prací studentů v BIM. Tato kapitola tak poskytne pohled na rozmanité možnosti, které rozšířená realita nabízí pro inovace ve stavebnictví.

Výstavba lehké příčky pomocí rozšířené reality

Postup realizace vzorové sádrokartonové příčky včetně osazení umyvadla za pomoci modelu digitálního dvojčete v rozšířené realitě (AR) byl realizován v roce 2020 následujícím způsobem:

- **Příprava a plánování**

Prostor pro montáž byl připraven a všechny potřebné materiály a nástroje shromážděny. Pomocí aplikace rozšířené reality byl virtuálně zobrazen plán příčky a umístění umyvadla v existujícím fyzickém prostředí, což umožnilo přesné určení polohy příčky a umyvadla.

- **Výstavba sádrokartonové příčky**

Nastavení kostry příčky: Kovové profily byly umístěny podle virtuálně zobrazených vodicích linií z AR modelu.

- **Montáž sádrokartonových desek**

Po instalaci nosné konstrukce byly montovány sádrokartonové desky, přičemž AR aplikace poskytovala virtuální vodicí linie pro řezání a umístění desek.

- **Zakrytí spojů a dokončovací práce**

Po montáži desek byl použit tmel na zakrytí spojů mezi deskami a vytvoření hladkého povrchu.

- **Instalace umyvadla s vyznačením místa instalace**

Na sádrokartonové příčce bylo za pomoci AR vyznačeno místo pro instalaci umyvadla.

- **Příprava instalace**

Bylo provedeno potřebné vrtání a instalován montážní systém pro umyvadlo.

- **Montáž umyvadla**

Umyvadlo bylo připevněno k připravenému montážnímu systému.

- **Kontrola a revize**

Po dokončení montáže byla za pomoci AR aplikace provedena kontrola, zda byla práce provedena správně a zda vše odpovídá původnímu plánu.



Obr. 53) Pohled na digitální dvojče v rozšířené realitě a na realizaci vnitřní nosné konstrukce příčky (zdroj: autor)

Aplikace VR nejen při stavebním dozoru

Využití moderních 360° sférických kamer představuje revoluční změnu v oblasti stavebních dozorů a expertních znaleckých činností. Tato technologie poskytuje zcela nový způsob, jak tyto aktivity provádět, a to prostřednictvím komplexního záznamu a následné analýzy staveb z 360° perspektivy. Umožňuje pořizovat jedinečné fotografie, videa i 3D modely staveb ve vysokém rozlišení se zorným polem 360°. Díky tomu značně usnadňuje práci stavebních dozorů, znalců či projektantů a nabízí jim celou řadu významných výhod. Hlavní přínosy jsou možnost detailního zhodnocení stavu konstrukcí z jakéhokoliv úhlu, snadnější komunikace s klienty, či vzdálený monitoring staveb. Sférické kamery tak otevírají nové možnosti digitalizace procesů ve stavebnictví a nabízejí inovativní prostředek pro zefektivnění dozorů, posudků i projektování.

- Komplexní záznamy

Sférické kamery zaznamenávají celé prostředí kolem sebe, což umožňuje získat úplný přehled o stavu stavby. To je obzvláště užitečné pro identifikaci a dokumentaci problematických míst, která by mohla být při tradičním způsobu inspekce přehlédnuta.

- Detailní prohlídky

Sférické záznamy poskytují možnost detailního pohledu na konkrétní části stavby. Experti mohou záznamy pečlivě zkoumat a identifikovat potenciální problémy nebo nedostatky ať už díky 5G přenosu v reálném čase, nebo zpětně na cloudovém uložišti.

- Virtuální realita pro lepší přehled

Záznamy ze sférických kamer lze prohlížet pomocí VR brýlí, což přináší imerzivní zážitek a umožňuje uživatelům pocítit, jako by byli přímo na místě. To je obzvláště užitečné pro stavební dozory a expertní znaleckou činnost, kde je důležité mít co nejrealističtější přehled o stavu a problémech stavby.

- Zlepšení komunikace a dokumentace

Sférické záznamy lze sdílet s dalšími členy týmu, investory nebo klienty, což zlepšuje komunikaci a poskytuje jasný vizuální důkaz o stavu projektu. To je obzvláště užitečné pro zdůraznění specifických problémů nebo pro demonstraci pokroku v průběhu projektu.

□ Efektivita a úspora času

Použití sférických kamer může výrazně zvýšit efektivitu inspekčních a dozorových procesů tím, že snižuje potřebu častých fyzických návštěv na staveništi. To šetří čas a umožňuje expertům zaměřit se na klíčové aspekty projektu.

- **Dlouhodobé sledování**

Sférické záznamy lze archivovat pro dlouhodobé sledování stavu objektu, což je užitečné pro historickou dokumentaci a sledování vývoje projektu.

Celkově využití sférických kamer 360° a VR technologií v pozemním stavitelství vede k přesnějším, efektivnějším a uživatelsky přívětivějším procesům. Je důležité podotknout, že tyto technologie využívané ve stavebnictví jsou převzaty z jiných oblastí, konkrétně z tvorby videí pro virtuální výlety nebo z herního průmyslu, kde je 360° video a VR prezentace prostředí je běžně využívána. Jde tedy o příklad úspěšné adaptace již existujících technologií z jiných oborů právě do stavebnictví, kde přináší významné benefity pro digitalizaci procesů a zefektivnění činností.



Obr. 54) Rozvinutý 360° záznam dozoru stavby rodinného domu (období lockdownu COVID-19, 2020). Využito pro cloudové sdílení s investorem a dodavateli (zdroj: autor)

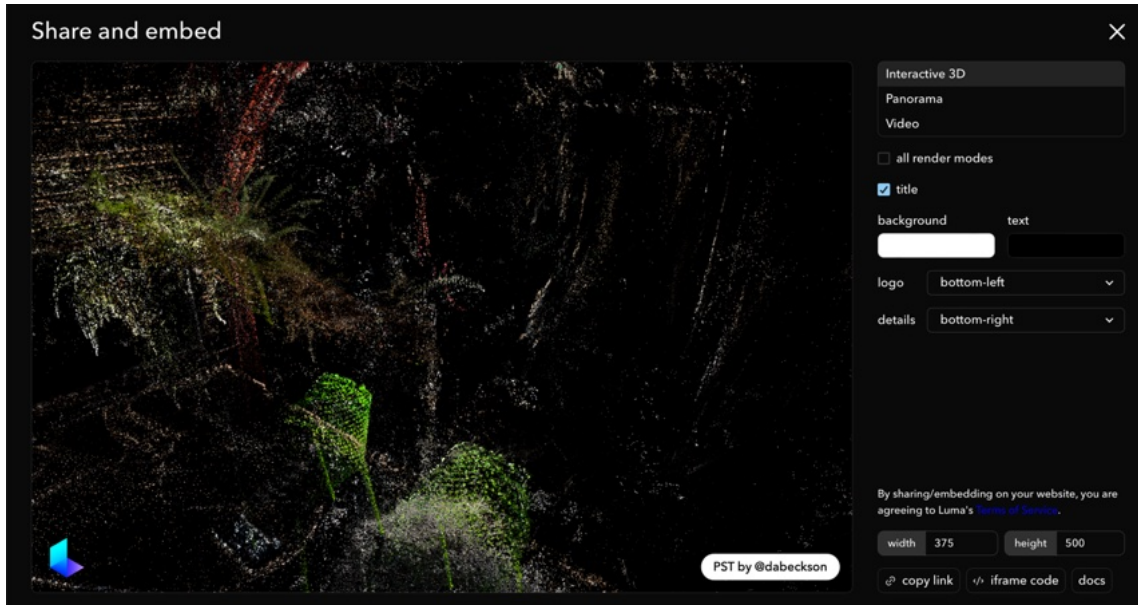


Obr. 55) Zobrazení výřezu POV ve VR brýlích Meta Quest 2 (zdroj: autor)

Další klíčovou technologií akcelerující adopci 360°sférických kamer pro dozorování staveb je NeRF (Neural Radiance Fields). Tato technika umělé inteligence, umožňuje generovat fotorealistické 3D modely na základě série fotografií. Konkrétně jde o tento postup:

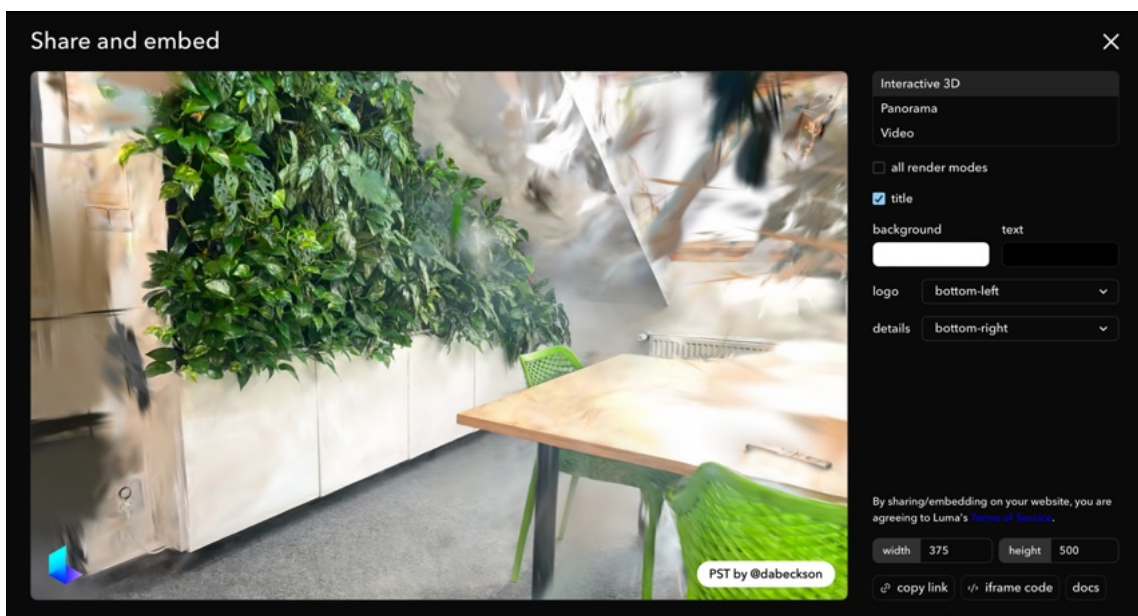
- NeRF analyzuje velké množství překrývajících se fotografií určité scény/prostředí.
- Na základě výskytu jednotlivých pixelů v různých fotografiích odhadne jejich hloubku a pozici ve 3D prostoru.
- Současně určí také množství světla, které se od jednotlivých pixelů/bodů odrazí (radiance).
- Na základě toho vytvoří reprezentaci scény, která umí předpovědět hloubku, pozici i radiance libovolného pixelu.
- Tato reprezentace (NeRF model) tak umožňuje generovat fotorealistické rendery scény z libovolného úhlu.
- NeRF v podstatě učí algoritmus vnímat svět jako "políčka světla" a efektivně to reprezentovat matematicky. Umožňuje tak vytvářet velmi realistické, fotorealistické 3D digitální dvojčata na základě fotografií.

Zpracování dat pro vytvoření digitálního trojrozměrného modelu pomocí technologie NeRF lze v omezené míře provádět i prostřednictvím běžných chytrých mobilních telefonů, které jsou již dnes vybaveny vícenásobnými



Obr. 56) Automatické zpracování dat z kamery v aplikaci Luma.ai a příprava 3D modelu místnosti (zdroj: autor, <https://lumalabs.ai/>).

fotoaparáty a jsou schopny pořizovat panoramatické snímky. Nicméně pro pořízení dostatečného množství kvalitních překrývajících se snímků nutných pro přesné zachycení prostorových dat je třeba věnovat této činnosti mnohem více času v porovnání se 360° sférickou kamerou. Ta je schopna zachytit celé prostředí v řádu minut, zatímco při použití běžného mobilu by proces pořizování vstupních dat pro NeRF trval několika násobně déle, což není pro praktické využití při terénních šetřeních tolik komfortní [18][19][20].

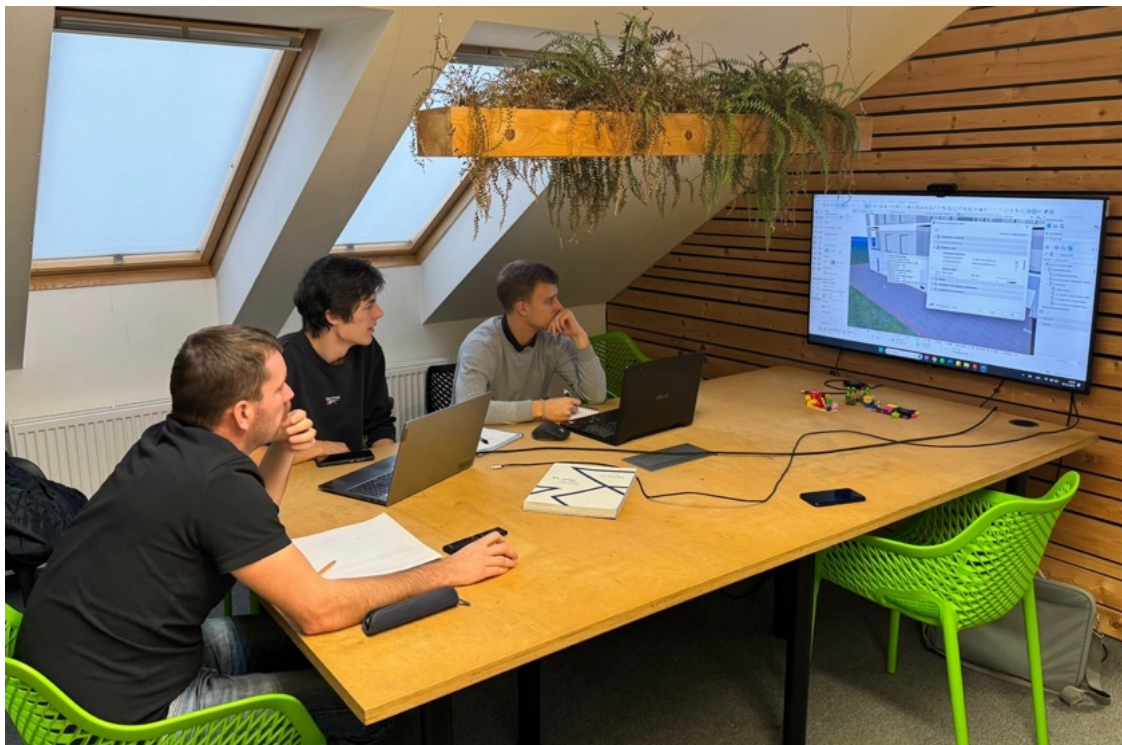


Obr. 57) Již vytvořený 3D model místnosti (zdroj: autor, <https://lumalabs.ai/>).

Lze tedy konstatovat, že kombinace 360° sférických kamer a moderních technologií jako jsou VR/AR a NeRF znamená průlom v digitalizaci stavebních dozorů a expertních znaleckých činností. Umožňuje vytvářet komplexní a hyperrealistické 3D modely staveb, které usnadňují práci inspektorů, urychlují komunikaci a získávání podkladů. Pokročilé technologie jako NeRF navíc umožňují automatizovanou přípravu modelů ze sférických snímků, což zajišťuje ještě efektivnější využití dat. S pokračujícím rozvojem těchto technologií lze očekávat další optimalizaci stavebních dozorů a posílení jejich role při zajišťování kvality a bezpečnosti stavebních projektů. Digitalizace tohoto oboru tak přináší značné přínosy ve formě úspor času, zjednodušení procesů i zvýšení míry kontroly realizace staveb.

Konzultace prací v BIM

Konzultace studentských prací v oblasti Building Information Modeling (BIM) na formou společných konzultací s velkoplošnou projekcí na TV nabízí řadu významných benefitů:



Obr. 58) Konzultace bakalářských prací v D333 podkroví Ústavu pozemního stavitelství (zdroj: autor).

- **Lepší vizualizace a porozumění**
Velké monitory poskytují rozsáhlejší a detailnější vizualizaci BIM modelů. To umožňuje lépe pochopit a analyzovat složité aspekty projektu, jako jsou prostorové vztahy, konstrukční detaily a integrace různých systémů budovy.
- **Interaktivní spolupráce a diskuse**
Společné konzultace na velkých monitorech podporují interaktivní diskusi a brainstorming. Tato interaktivita vede k hlubšímu pochopení problémů, lepším nápadům a efektivnějšímu řešení problémů.
- **Podpora týmové práce**
Ve skupinových projektech BIM umožňují velké monitory celému týmu spolupracovat a vidět přesně, na čem se pracuje. To zlepšuje koordinaci a komunikaci v týmu a podporuje efektivní spolupráci.
- **Okamžitá zpětná vazba a náprava**
Během společných konzultací lze poskytnout okamžitou zpětnou vazbu, což umožňuje rychlou nápravu chyb a precizaci projektů.
- **Podpora kritického myšlení a analytických schopností**
Diskuse a analýza projektů při projekci posilují kritické myšlení a analytické schopnosti. Studenti jsou nuceni aktivně přemýšlet o možných problémech a jejich řešeních, což je klíčové pro jejich profesní rozvoj.
- **Zlepšení technických dovedností**
Práce s BIM modely na velkých monitorech umožňuje studentům zlepšit své technické dovednosti a porozumění BIM nástrojům a procesům, což je připravuje na budoucí kariéru v oboru.
- **Větší zapojení studentů**
Vizuálně atraktivní a interaktivní prostředí konzultací může zvýšit zájem a zapojení studentů, což vede k lepšímu učení a porozumění.
- **Efektivnější výuka a učení**
Učitelé mohou efektivně demonstrovat a vysvětlit složité koncepty v BIM, což zlepšuje celkový proces učení a výuky.

Společné konzultace prací v digitálním prostředí představují významný krok vpřed ve vzdělávacím procesu v oblasti stavitelství a architektury. Přechod od tradičních papírových výkresů k digitálnímu prostředí je nejen nezbytností v dnešním rychle se vyvíjejícím technologickém světě, ale také přináší mnoho výhod. Digitální konzultace umožňují efektivnější a interaktivnější způsoby výuky a učení, které reflektují moderními technologické standardy a potřeby budoucího pracovního trhu.

Tato metoda vzdělávání nejenže podporuje rozvoj technických a analytických dovedností studentů, ale také zvyšuje jejich zapojení a motivaci. Transformace z tradičních papírových výkresů na digitální BIM modely představuje důležitý krok v přizpůsobování vzdělávacího procesu aktuálním i budoucím potřebám stavitelství 4.0. Tímto způsobem se vzdělávací instituce nejen adaptují na současné požadavky průmyslu, ale také připraví studenty na kariéru v moderním stavitelství a architektuře.



Obr. 59) Konzultace bakalářských prací v D333 podkroví Ústavu pozemního stavitelství (zdroj: autor).

4.4. Parametrický návrh a digitální dvojče

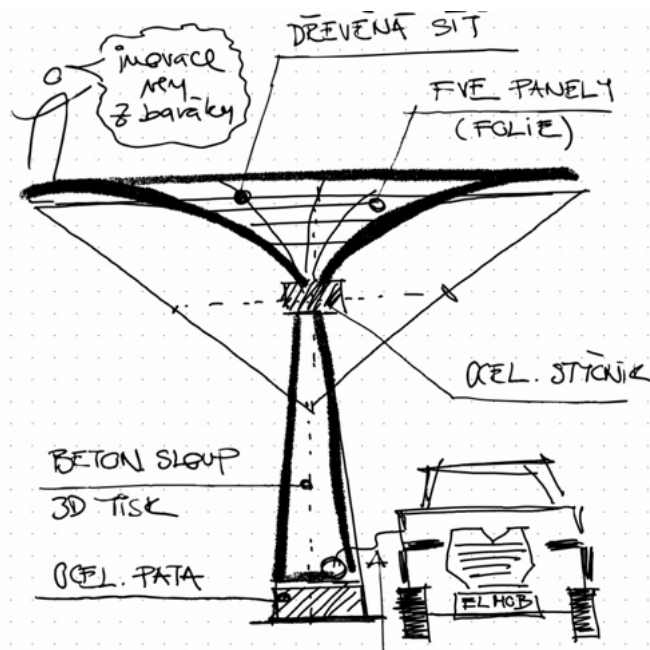
Stavebnictví v současnosti prochází zásadní proměnou díky novým digitálním technologiím. Jednou z nejvýznamnějších je koncept virtuálního dvojčete či digitálního dvojčete, který umožňuje simulovat a optimalizovat budovy, stavby a jejich jednotlivé prvky již ve fázi návrhu.

Digitální dvojče představuje přesnou virtuální repliku fyzické stavby, která umožňuje komplexně testovat a vyhodnocovat různé varianty již v rané fázi plánování. To výrazně urychluje a zefektivňuje proces návrhu a výstavby. Synergie virtuálních dvojčat a pokročilých technologií, jako je parametrický návrh, rozšířená realita, simulace nebo robotika, nám dláždí cestu k chytřejší, efektivnější a udržitelnější architektuře a výstavbě budoucnosti.

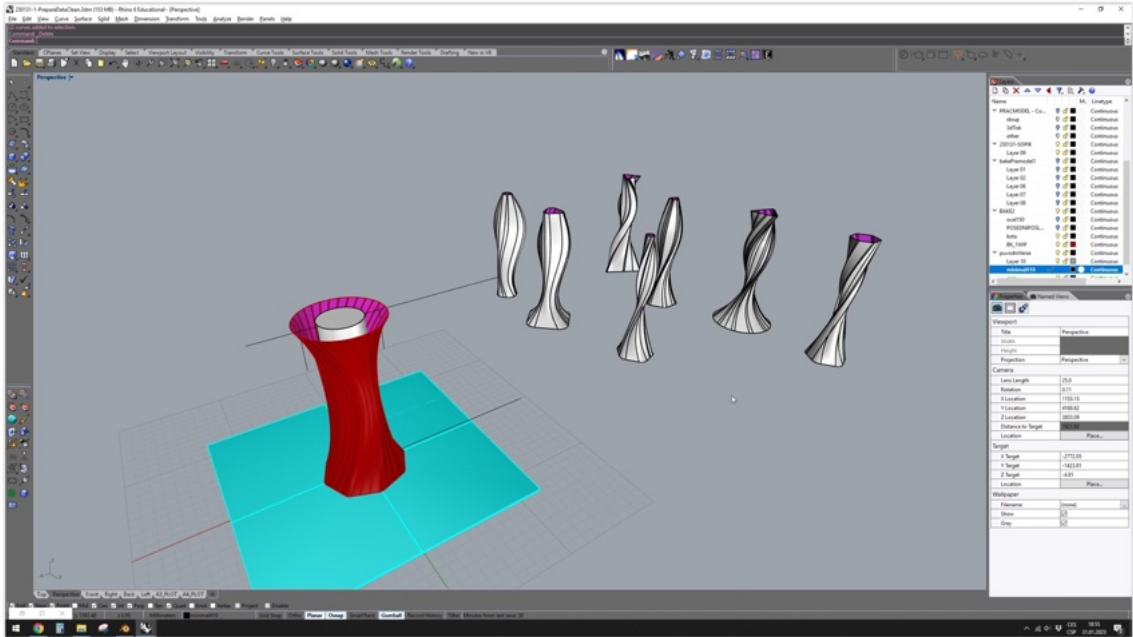
Projekt hybridní konstrukce TAPIRUS

Stavebnictví není strojírenství a není obvyklé, aby se v něm digitální data návrhu přímo uplatňovala ihned ve výrobě. Současný stavební proces zahrnuje mezi digitálním návrhem a realizací objektu řadu mezikroků, upřesnění a optimalizací, které vyžadují velké množství času.

Projekt hybridní konstrukce TAPIRUS, jehož iniciátorem byl Ing. Michal Šopík z firmy Vesper Homes, byl ukázkou úspěšného propojení komerční a akademické sféry. Příprava projektu probíhala pouze virtuálně, bez fyzického

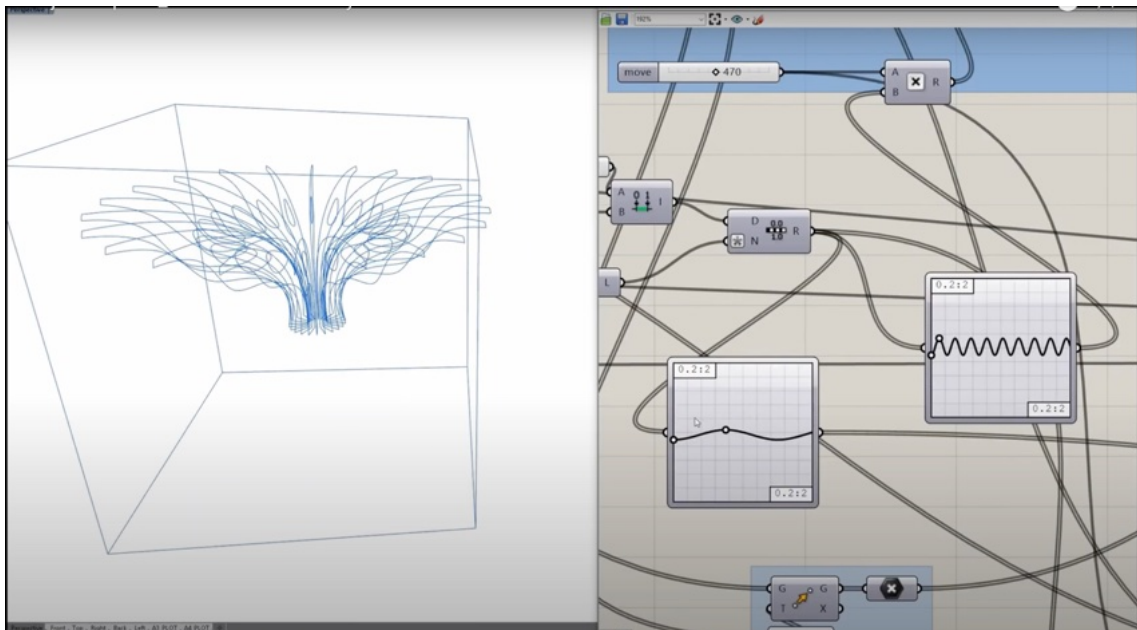


Obr. 60) Prvotní skica zahajující dialog napříč profesemi (zdroj: Michal Šopík)



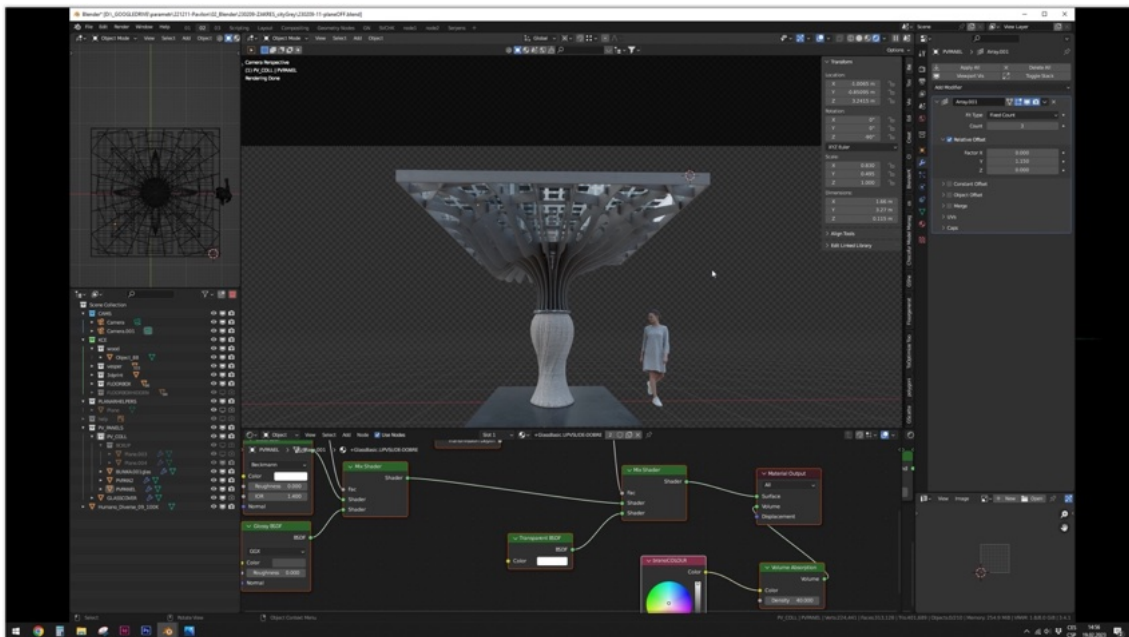
Obr. 61) Představení Jiřím Šmejkalem parametrického návrhu betonového kmene stromu TAPIRUS při diskuzi nad proveditelností 3D tiskem na platformě MS Teams (zdroj: autor)

setkání se a bez fyzické dokumentace. Jednotlivé konstrukční elementy byly navrženy a realizovány pro výslednou konstrukci z odlišných materiálů: betonu, oceli a dřeva. Výroba byla decentralizována po ČR. Na brněnském výstavišti pak byla konstrukce úspěšně zkompletována 2 dny před slavnostním odhalením bez jakýchkoliv mezikroků a příprav, pouze na základě digitálního dvojčete.



Obr. 62) Parametrické úpravy dřevěné koruny stromu (zdroj: Jiří Šmejkal)

Mimořádnost uvedeného postupu digitálního návrhu a parametrické optimalizace se ještě více projevila v případě, kdy bylo nutné provést úpravy některých parametrů konstrukce ještě před zahájením výroby. Zatímco v rámci běžného neautomatizovaného procesu by úprava tvaru nebo rozměrů vyžadovala ruční překreslení všech vstupních výkresů a následnou novou analýzu, zde stačilo změnit hodnotu parametru v digitálním modelu. Díky parametricce celé konstrukce se pak automaticky přepočítal celý digitální projekt včetně výsledků statických výpočtů.



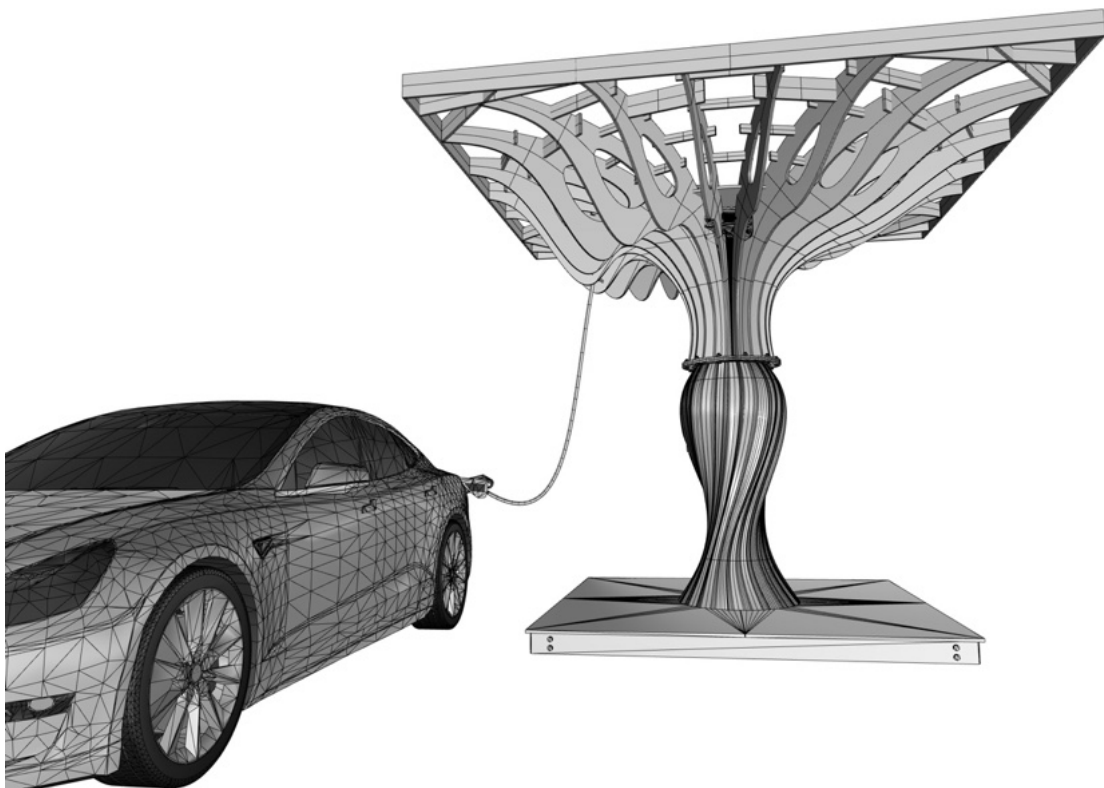
Obr. 63) Model vytvořený v softwaru Blender (autor: Jiří Šmejkal)

Tato změna parametrů tak trvala pouhé minuty, zatímco tradiční postup by vyžadoval několik dnů práce. Současně se přitom automaticky generovala i data pro výrobní linku, která mohla po změně parametrů ihned pokračovat ve výrobě. Tento přístup tak výrazně urychlil proces úprav konstrukce ještě před zahájením výroby a zajistil okamžitou aktualizaci vstupů pro výrobu. Pro návrh a realizaci digitální parametrické konstrukce byla využita kombinace několika softwarových nástrojů:

- Blender - volně dostupný software pro 3D modelaci, který byl využit pro vytvoření základní vizuální podoby konstrukce.

- Rhinoceros 3D - profesionální program pro 3D modelování, jehož klíčovou výhodou byla možnost vytvořit plně parametrický model konstrukce s definovanými proměnnými.
- Díky vytvoření specifických konektorů bylo mezi Rhinocerosem a následujícími programy zajištěno automatické předávání a načítání dat.
- AxisVM - software pro statické výpočty, jemuž Rhinoceros parametry a tvar konstrukce exportoval a AxisVM prováděl výpočty pevnosti a nosnosti.
- Cadwork - program pro přípravu výrobní dokumentace, kam AxisVM exportoval výsledky výpočtů a Cadwork na jejich základě automaticky generoval podklady pro výrobu.

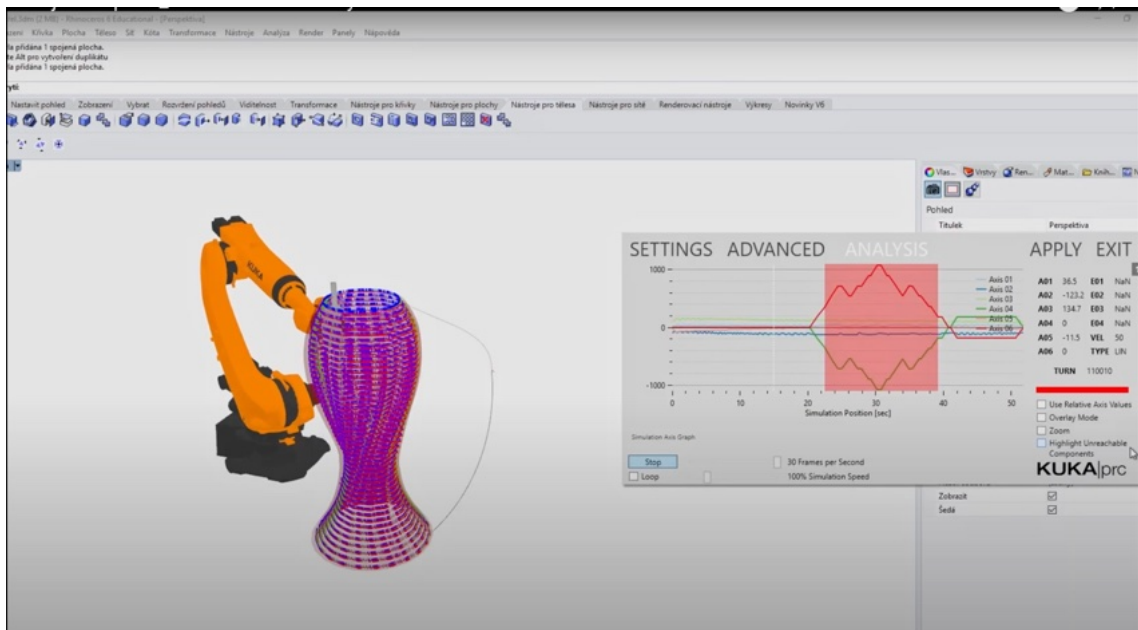
Díky propojení jednotlivých programů tak byl zajištěn neustálý obousměrný tok dat mezi návrhářskou, výpočtovou a výrobní fází. To umožnilo iterativní virtuální prototypování konstrukce ještě před zahájením reálné výroby.



Obr. 64) 3D model již finální geometrie digitálního dvojčete se zobrazením všech konstrukčních elementů (zdroj: autor)

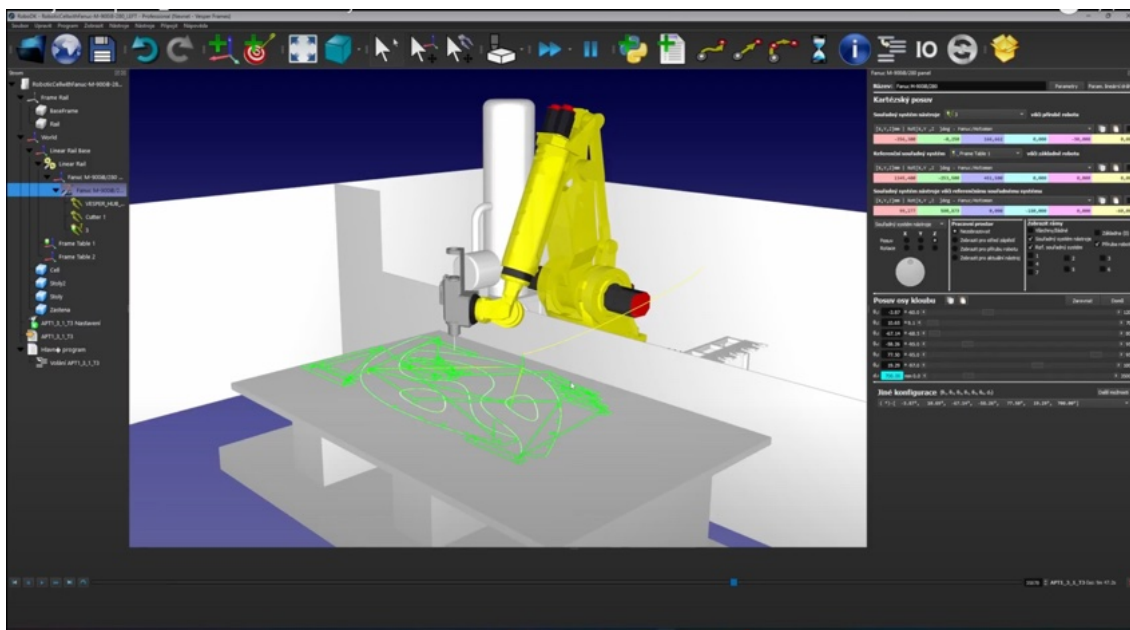
Před předáním výrobní dokumentace do výroby bylo nutné ověřit proveditelnost návrhu konstrukce z hlediska možností jednotlivých výrobních technologií. Proto byly digitálně simulovány následující klíčové aspekty:

- Simulace drah CNC obrábění - Na základě parametrického modelu byly vymodelovány pohyby obráběcího centra a ověřena absence kolizí nástrojů s díly.
- Simulace pohybu tiskové hlavy - Pomocí virtuální simulace byla ověřena proveditelnost trasy trysky pro ukládání betonové směsi, včetně analýzy rychlosti přírůstku výšky a hmotnosti konstrukce. Tato analýza byla nezbytná pro eliminaci kolapsu konstrukce při samotném tisku.
- Simulace nasazování kompletace a sestavování dílů - Digitálně bylo možné mnohokrát provést simulaci skládání konstrukce a odhalit případné kolize.



Obr. 65) Zobrazení přípravy tiskové stopy betonu pro realizaci betonové části konstrukce. Software Rhinoceros 3D + Grasshopper (zdroj: autor)

Tímto způsobem bylo ještě před zahájením výroby zajištěno, že parametrický návrh konstrukce plně vyhovuje možnostem zvolených digitálních výrobních technologií a nebude nutné provádět nápravy až v reálné výrobě.



Obr. 66) Revize kolizí, frézovacích drah robota s nástavbou CNC, v softwaru cadwork (zdroj: Michal Šopík)

Na začátku projektu byl vytvořen základní časový pracovní diagram. V něm byly definovány jednotlivé fáze projektu s odhadovanou časovou dotací včetně započtení komplikací.



Obr. 67) Obráběcí robot Vesper Robotics, frézující dřevěné lamely koruny stromu. Každá z lamel má unikátní nezaměnitelný tvar definovaný algoritmem parametrického návrhu. (zdroj: Michal Šopík)

Časový harmonogram

1. Architektura - Supervize a korekce (09/01 - 20/01, 12 dní)
2. Konstrukční model I. - Dřevo - Ocel (23/01 - 10/02, 19 dní)
3. Statika (11/01 - 20/01, 10 dní)
4. Konstrukční model II. - Dřevo - Ocel (18/01 - 03/02, 17 dní)
5. Konstrukční model CC - Beton (23/01 - 10/02, 19 dní)
6. MTZ - Dřevo (18/01 - 03/02, 17 dní)
7. MTZ - Ocel (23/01 - 10/02, 19 dní)
8. MTZ - Ostatní (23/01 - 17/02, 26 dní)
9. Výroba CNC a RUR (30/01 - 24/02, 26 dní)
10. Beton PrePrint (13/02 - 24/02, 12 dní)
11. Beton Final Cut (23/01 - 10/02, 19 dní)
12. Montáž (27/02 - 03/03, 5 dní)

Práce na projektu parametrické konstrukce byly zahájeny dne 9.1.2023, kdy byl vytvořen základní pracovní diagram. V něm byly definovány jednotlivé fáze projektu s odhadovanou dobou trvání a časovými rezervami pro případné komplikace.



Obr. 68 a 69) Vlevo auto transport kompletního prvku 3D tištěného kmene s osazenými ocelovými přírubami. Vpravo kompletace stromu TAPIRUS, osazení dřevěné koruny (zdroj: autor).

Celková doba realizace byla naplánována na 50 dnů, počínaje 9. lednem. I přes precizní plánování nemohly být vyloučeny kolize a komplikace během projektu. Nicméně i tyto dílčí komplikace byly v rámci zakomponovaných časových rezerv vyřešeny a projekt byl dopracován dle harmonogramu. Všechny etapy projektu byly dodrženy dle časového harmonogramu a kompletní parametricky navržená a digitálně vyrobená konstrukce byla úspěšně dokončena 27.2.2023, tedy dle plánu do 50 dnů od zahájení dialogu o architektonickém a konstrukčním návrhu.



Obr. 70 a 71) Pohled na realizovanou hybridní konstrukci TAPIRUS, díky technologiím parametrického návrhu, digitálního dvojčete, CNC prefabrikace a aditivní výroby 3D tisku betonu (zdroj: autor).

Koncept digitálního dvojčete, jako je ukázáno na projektu TAPIRUS, umožňuje efektivní simulaci a optimalizaci konstrukcí již v návrhové fázi, což vede k rychlejší a udržitelnější výstavbě.

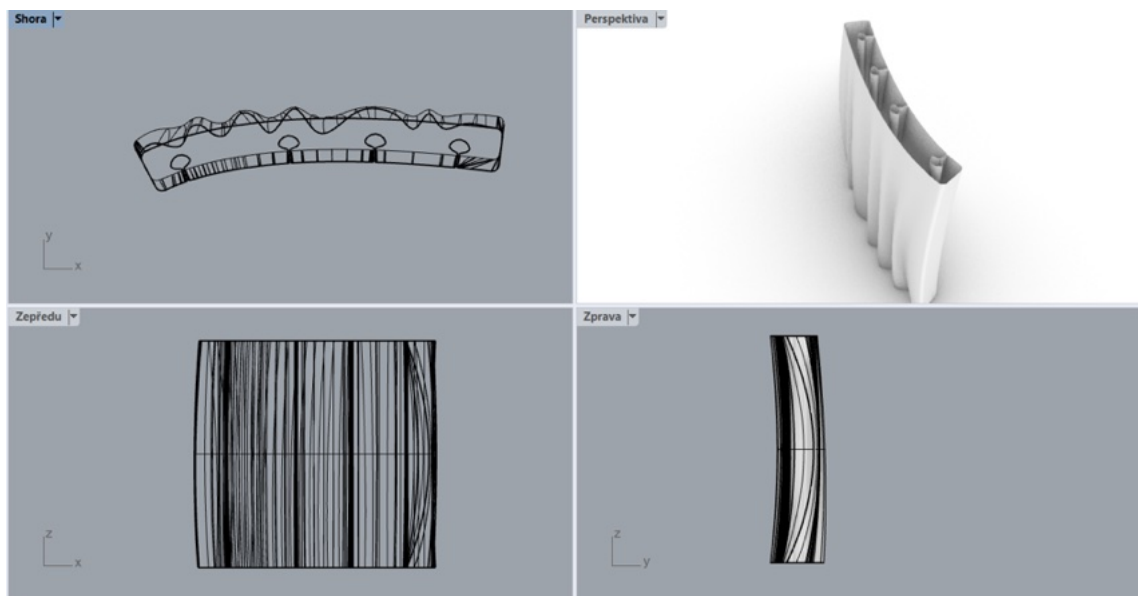
Projekt demonstruje, jak kombinace vybraných softwarů umožňuje rychlé a efektivní návrhy, včetně přípravy výrobních dat. Díky tomu lze provádět změny v parametrech konstrukce během několika minut, což je výrazně rychlejší než tradiční metody. Tento přístup zásadně zjednodušuje a urychluje procesy ve stavebnictví, a zároveň zachovává vysokou kvalitu a funkčnost výsledné konstrukce. Kapitola ukazuje, že integrace digitálních technologií a parametrického návrhu nastavuje nové standardy pro design a výrobu ve stavebnictví.

4.5. Prefabrikace a aditivní výroba

Tato kapitola se detailně věnuje metodám prefabrikace a aditivní výroby, konkrétně pilotnímu procesu 3D tisku betonu. Popisuje klíčové aspekty jako samotný tiskový proces, monitorování vlastností materiálu během tisku i studium teplotně-vlhkostních jevů ve 3D tištěných konstrukcích, které podmiňují jejich životnost a funkci. 3D tisk sice přináší inovační příležitosti, zároveň však nové výzvy - zejména z hlediska udržitelnosti a efektivity materiálových zdrojů.

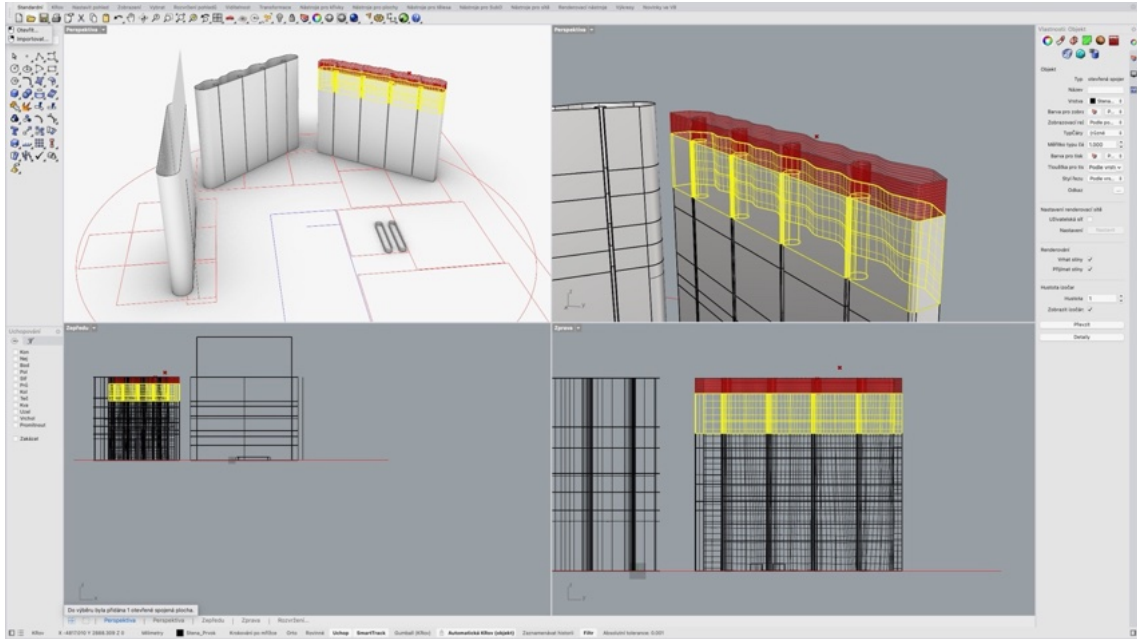
Realizace pilotních 3D tištěných stěn

V roce 2021 byly na ústavu vytvořeny 3 pilotní tištěné betonové konstrukce stěn za účelem testování v rámci výzkumu digitalizace ve stavebnictví. Jednalo se o tři dimenzionálně totožné betonové stěny, jejichž digitální modely byly vytvořeny v grafickém modelovacím softwaru Rhinoceros 3D a následně plugin Grasshopper posloužil k jejich rozřezání na vrstvy vhodné pro 3D tisk.



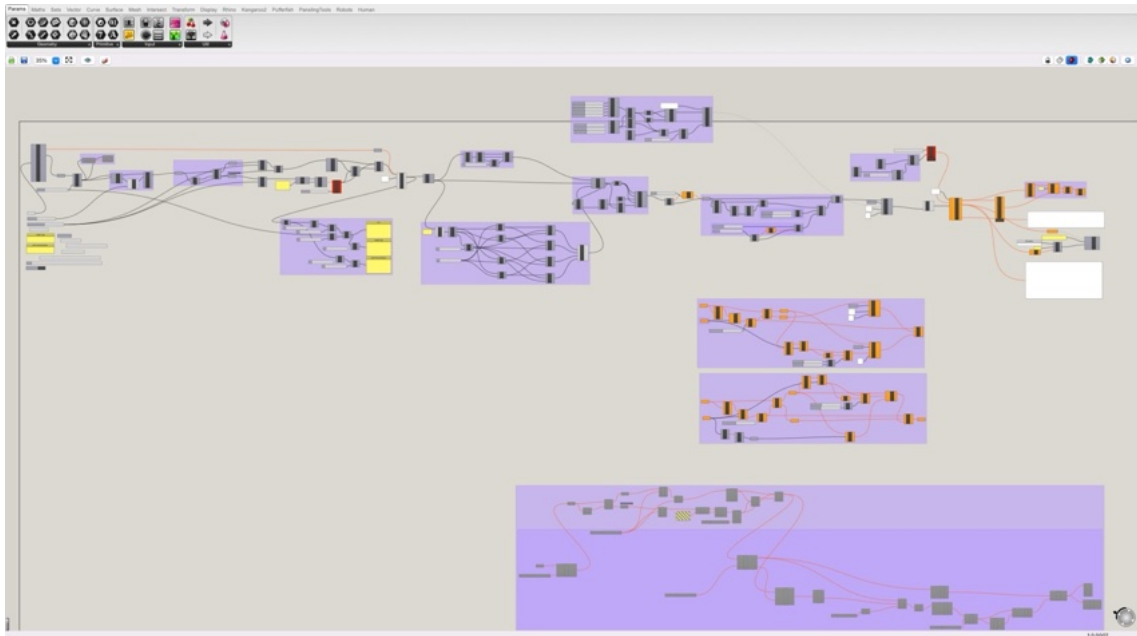
Obr. 72) Prostředí programu Rhinoceros s 3D modelem stěny (zdroj: autor)

Rozměrově identické stěny byly vyrobeny z důvodu jejich teplotně-vlhkostního testování v komorách Envibox. Cílem bylo prostřednictvím těchto pilotních elementů získat data o chování tištěného betonu při simulování reálných povětrnostních vlivů. Testování těchto pilotních konstrukcí mělo přispět k pochopení výzev digitalizace ve stavebnictví spojených s aplikací 3D tisku betonu v pozemním stavitelství. Tisk proběhl v Českých Budějovicích v prostorách společnosti Scoolp s.r.o.



Obr. 73) Pohled na finální rozložení stěn pro 3D tisk (zdroj: autor)

Z důvodu zachování kontinuity tisku a zamezení tuhnutí betonové směsi z hadicích a tiskové hlavě, bylo zvoleno rozmístění všech 3 stěn v pracovním prostoru robota.



Obr. 74) Parametrický návrh v Grasshopper všech 3 stěn a pohybu tiskového robota po předem definovaných trajektoriích (zdroj: autor)



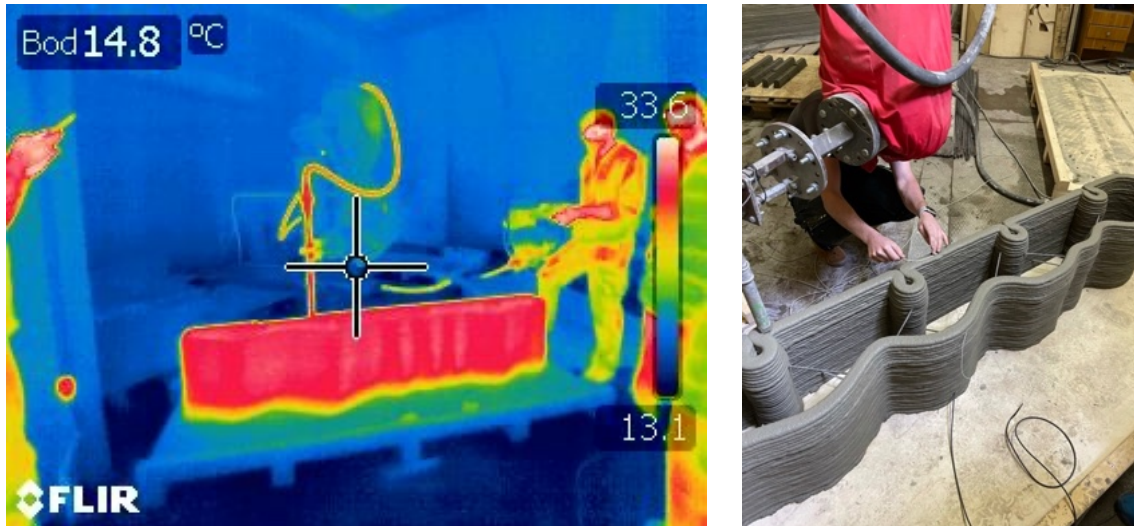
Obr. 75) Vlevo tisk stěny s jednostrannou tvarovou profilací proměnlivou po výšce. Vpravo její kolaps z důvodu nízkých teplot prostředí tisku a nezačínání procesu tuhnutí tiskové směsi (zdroj: autor)

Volba variant geometrického řešení se odvíjela od potřeb zisku poznatků jak ze samotné realizace, tak popisu chování materiálů a samotných elementů v klimatických komorách.

Navrženy a zrealizovány byly tyto varianty stěn:

- Stěna bez výrazných tvarových profilací, bez změny tvaru po výšce. Jednostrane vytvořena se povrchovou strukturou vlnek.
- Stěna s jednostrannou výraznou profilací, bez změny tvaru po výšce
- Stěna s výraznou jednostrannou profilací ve všech směrech i po výšce

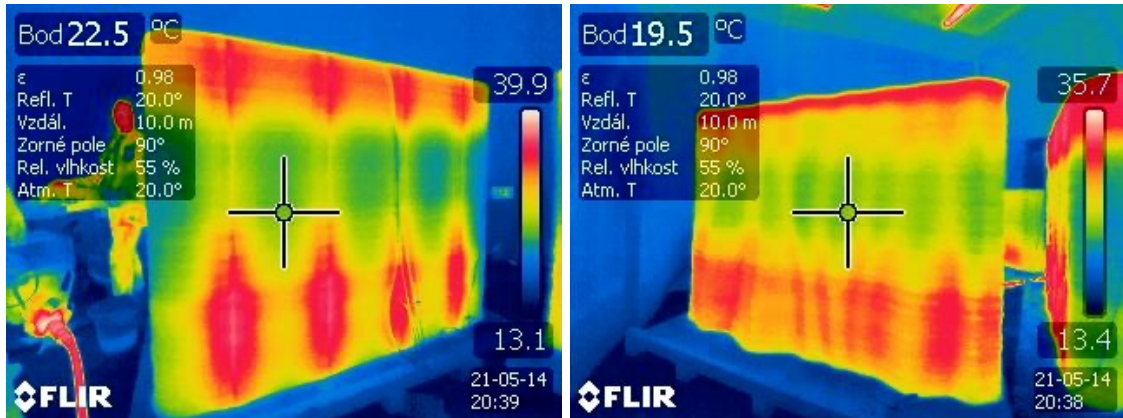
Jedna ze stěn byla při samotném tisku doplňována termočlánky, aby bylo možné sledovat změny teploty a předpovídat potenciální zhroucení konstrukce v případě, že by nedošlo k zahájení procesu tvrdnutí betonu. Tento proces je obvykle spojen s uvolňováním značného množství tepla, které může ovlivnit samotný průběh 3D tisku. Dalším kritickým bodem bylo tuhnutí cele již vytištěné konstrukce a sledování jejího stavu v následujících 24 hodinách, Z důvodu např. rozvoje trhlin od smrštění.



Obr.76 a 77) Termografická kontrola průběhu 3D tisku v reálném čase pomáhá s predikcí kolapsu konstrukce již během tisku (zdroj: autor)

Pro potřeby monitoringu při samotném tisku byla zvolena kontinuální kontrola termovizními kamerami. z několika důvodů:

- **Kontrola kvality:** Termovize umožňuje sledovat rozložení teploty v betonu během tisku. Neuniformní rozložení teplot může ukazovat na potenciální problémy, jako jsou nedostatečně smíchané komponenty nebo nekonzistence v materiálu.
- **Sledování procesu tuhnutí:** Beton tuhne exotermní reakcí, což znamená, že uvolňuje teplo. Monitorováním teploty lze zjistit, zda probíhá tuhnutí správně a zda je dosaženo požadované pevnosti.
- **Prevence trhlin a defektů:** Nepravidelné rozložení tepla může vést k trhlinám nebo jiným strukturálním defektům. Termovizní sledování pomáhá identifikovat potenciální problémové oblasti dříve, než se stihnou rozvinout do vážnějších problémů.
- **Optimalizace procesu:** Sledování a analýza termovizních dat může pomoci vylepšit proces tisku, například přizpůsobením rychlosti tisku nebo složení betonu, aby se dosáhlo lepších výsledků.
- **Zajištění bezpečnosti:** Při 3D tisku betonu mohou vznikat lokální horké oblasti s teplotami přesahující 50 °C. Termovize pomůže identifikovat tyto oblasti a zajistit, že se nepřekročí bezpečnostní limity.



Obr.78 a 79) Pohled na nesouměrné rozložení teplot v tiskovém elementu, Tuhnutí neprobíhá rovnoměrně. Může tak docházet k vzniku nesoudržných linií v konstrukci (zdroj: autor)

Tyto záznamy například přispěly při reverzní analýze havárie stěny během přepravy v centru AdMaS. K poškození došlo právě na místě, které je viditelné na obrázku XX. Tato stěna byla vystavena 1 rok povětrnostním vlivům, včetně zmrazovacích cyklů. Stěna nebyla zmonolitněna a obsahovala pouze sypanou tepelnou izolaci EPS.



Obr.80 a 81) Pohled na havárii stěny, která byla poškozena během manipulace pro vnitroareálový transport (zdroj: autor)



Obr. 82) Pohled na dovezené stěny (zdroj: autor).

Na ústavu PST byly stěny následně stěny zaizolovány sypanou izolací z drceného polystyrenu EPS frakce 3 – 20 mm.



Obr. 83 a 84) Izolace stěn sypaným polystyrenem (zdroj: autor)



Obr. 85 a 86) Příprava osazení stěn do klimatických komor Envibox (zdroj: autor)

Konstrukce stěn již během tisku byly osazeny teplotními a vlhkostními čidly. Po osazení stěn do EnviBoxu bylo zahájení měření a byly pravidelně monitorovány termovizní technikou na obou površích pro získání plošných kvantitativních i kvalitativních dat.



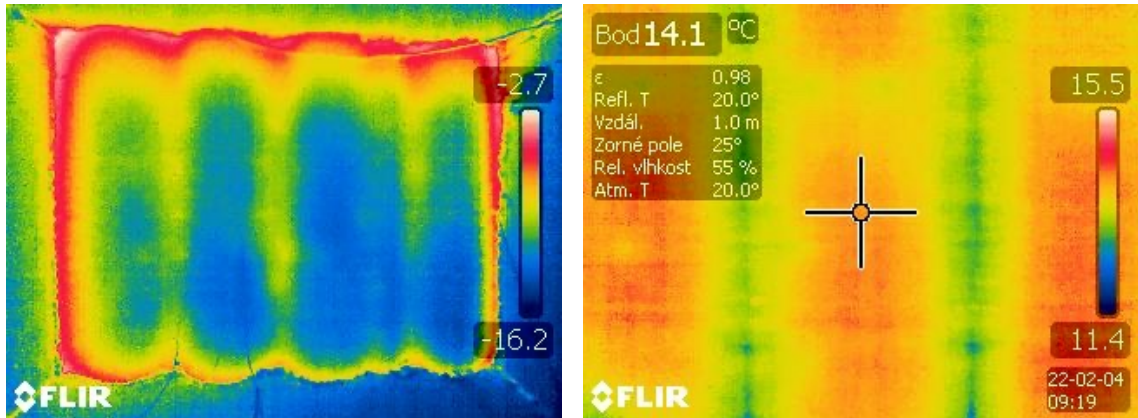
Obr. 87 a 88) Měření povrchových teplot, parametrů prostředí a vzduchové netěsnosti (zdroj: autor)



Obr. 89) Pohled na osazený měřicí rám s instalovanou 3D tištěnou stěnou v klima komorách Envibox (zdroj: autor).

Při monitoringu konstrukcí vystavených klimatickým testům, bylo pravidelně pozorováno:

- Spojité řešení testovací stěny má negativní vliv na šíření tepla a vlhkosti v okrajových částech, až do té míry, že dochází k vnitřní kondenzaci na povrchu 3D tisku. Pro další klimatické testy je zapotřebí vždy přerušit tiskovou stopou v místě na napojení s osazovacím rámem.
- Výztužné sloupky při teplotách v exteriéru okolo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ snižují povrchovou teplotu o $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlivem výrazného tepelného mosty nejen v horizontální rovině, ale i ve vertikálním směru.
- Odlišné řešení povrchové struktury (vlnky, linie) nemají vliv na povrchové teploty konstrukce.
- Pro eliminaci kondenzace vzdušné vlhkosti v konstrukci a zajištění statického spolupůsobení je zapotřebí vždy používat tepelnou izolaci umožňující zmonolitnění s tiskovými stopami.
- Vzduchotěsnost konstrukce vždy byla nad měřitelnými hodnotami zařízení BlowerDoor Minneapolis.

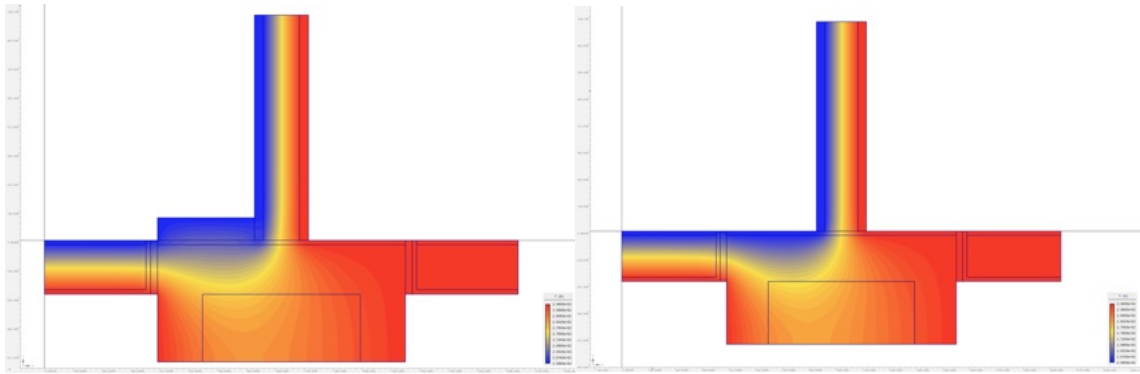


Obr. 90 a 91) Vlevo termogram zobrazující tepelné mosty v místě připojení konstrukce vlivem výskytu kondenzátu na vnitřním povrchu stěny ve styku s tepelnou izolací. Vpravo termogram zobrazující tepelné mosty v místě vnitřních výztužných sloupků (zdroj: autor)

V současné době jsou již k dispozici izolační materiály, které umožňují zmonolitnění a zároveň neohrozí konstrukci namáhání tlakem, který by měl za následek havárii konstrukce. Jelikož konstrukce stěn nebyly zničeny, bude vnitřní izolace nahrazena novým typem a budou konstrukce stěn znovu testovány na tepelně vlhkostní namáhání. Tato řešení také umožní rozdělení stěn v místě styku s osazovacím rámem a přerušení tepelného mostu.



Obr. 92) Pohled na exteriérovou část stěny před osazením povrchových čidel. Patrné dotěsnění montážní PUR pěnou ve styku s osazovacím rámem.



Obr. 93 a 94) Analýza tepelných vazeb osazovacího rámu, klimakomor Envibox a samotné 3D tištěné stěny.

Realizace pilotních 3D tištěných stěn a jejich testování v klimatických komorách poskytlo cenné poznatky o využití této technologie v pozemním stavitelství. Byly identifikovány klíčové oblasti, na které je potřeba se dále zaměřit, jako je řešení tepelných mostů, nebo řešení styků jednotlivých vrstev tak, aby nedocházelo ke kondenzaci vlhkosti uvnitř konstrukce. Výsledky testování napomohly k hlubšímu porozumění chování 3D tištěných konstrukcí a identifikaci dalších výzkumných otázek, které je třeba řešit pro uplatnění této technologie v praxi. Získané poznatky lze využít při další optimalizaci procesů 3D tisku betonu a návrhu tištěných konstrukcí.

Budoucnost Pozemního stavitelství 4.0

- Projekty pozemního stavitelství 4.0 na VUT v Brně

"Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever."

Mahátma Gándhí

5. Budoucnost pozemního stavitelství 4.0

Pozemní stavitelství 4.0 představuje období transformace a inovace, které formuje způsob, jakým navrhujeme, stavíme a spravujeme infrastrukturu a stavby. Pokud se zaměříme na prozkoumání aktuálních trendů a predikcí, které naznačují, kam se stavitelství ubírá, lze na základě posledních informací vytvořit následující přehled:

- Řešení aktuálních společenských problémů, jako je nedostatek bytů a dostupné bydlení. Digitalizace a nové technologie mohou pomoci s efektivnější výstavbou dostupných, energeticky úsporných budov za nižší náklady.
- Zaměřit se na rozsáhlou digitalizaci a modernizaci stávajícího bytového fondu. Využít laserové skenování, BIM a robotiku pro urychlení a zlevnění rekonstrukcí. Tímto řešit i snížení energetické náročnosti stávající zástavby.
- Zavést povinnou digitalizaci a standardizaci stavebního řízení a povolovacích procesů formou online a mobilních platforem. Zrychlit tak výstavbu a zvýšit transparentnost.
- Rozšířit využívání BIM mezi všemi subjekty ve stavebnictví a zpřístupnit také běžným uživatelům. Umožnit tak lepší spolupráci všech zainteresovaných stran.
- Využít potenciálu umělé inteligence pro návrh budoucích objektů s ohledem na klimatické změny a demografický vývoj společnosti.
- Budovat dlouhodobé vize a strategie propojující stavebnictví, společnost a životní prostředí.

5.1. Projekty pozemního stavitelství 4.0 na VUT v Brně

Přehled aktuálních projektů Ústavu pozemního stavitelství FAST, VUT v Brně, které demonstrují aplikaci konceptů a technologií pozemního stavitelství 4.0 v praxi. Jsou zde prezentovány příklady konkrétních projektů, které využívají inovativní přístupy a technologie, a to jak v měřítku České republiky, tak v mezinárodním kontextu. Tato část slouží jako ilustrace možností, které Pozemní stavitelství 4.0 nabízí, a ukazuje, jak mohou tyto technologie transformovat tradiční stavební metody a postupy.

Digitální fabrikace – systémy prefabrikovaných schodišť

Hlavní řešitel: Ing. Ondřej Nespěšný, doc. Ing. Jan Pěňčík, Ph.D.

Zaměření: Experimentální testování schodišť, návrh prefabrikovaných schodišť

Technologie: IoT, digitální fabrikace, CNC, reverzní inženýrství

Přínosy: datová podpora pro návrh prefabrikovaných schodišť



Obr. 95, 96, 97) Pohled na prefabrikované schodiště a jeho testování na polygonu Ústavu pozemního stavitelství (zdroj: autor + Ondřej Nespěšný)

Aditivní výroba - 3D tisk betonu

Řešitel: Ing. Vojtěch Vaněk, doc. Ing. Jan Pěncík, Ph.D.,

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Zaměření: Experimentální testování konstrukcí vytvořených technologií 3DCP

Technologie: digitální fabrikace, 3DCP, reverzní inženýrství

Přínosy: datová podpora pro návrh a realizaci 3D tištěných konstrukcí



Obr. 98, 99, 100) Vlevo nahoře a dole pohled na 3D tištěné elementy a jejich testování v centru AdMaS a na Ústavu pozemního stavitelství. Vpravo nahoře ukázka tisku sloupu. (zdroj autor + Vojtěch Vaněk)

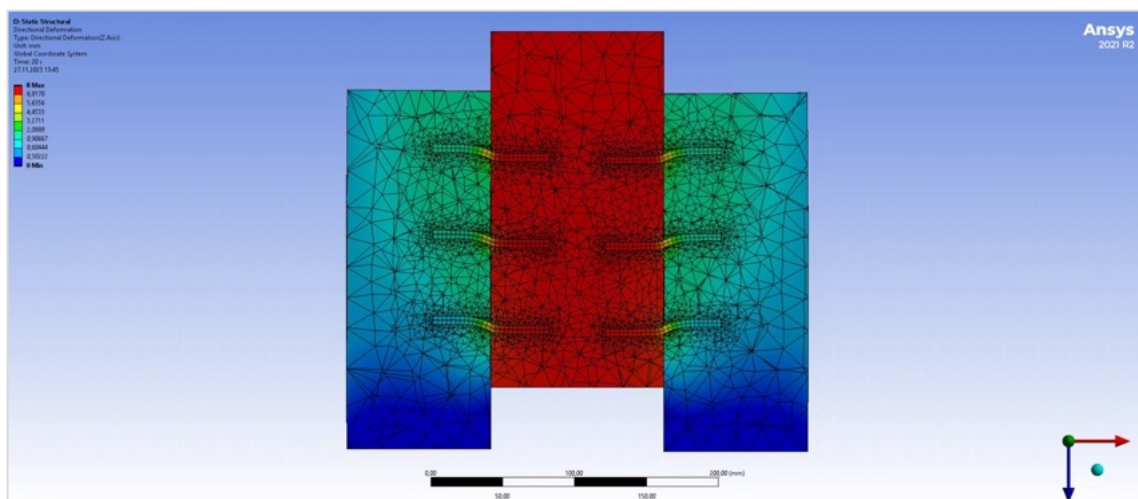
Aditivní výroba hybridní konstrukce

Řešitel: Ing. Antonín Železný, Ing. Vojtěch Vaněk, Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Zaměření: Aditivní technologie a digitální fabrikace

Technologie: hybridní konstrukce, digitální fabrikace, aditivní výroba, parametrický návrh

Přínosy: datová podpora aditivní výroby pro výrobu hybridních konstrukcí



Obr. 101, 102, 103) Testování elementů hybridní konstrukce na Ústavu pozemního stavitelství. Ukázka FEM analýzy (zdroj: autor).

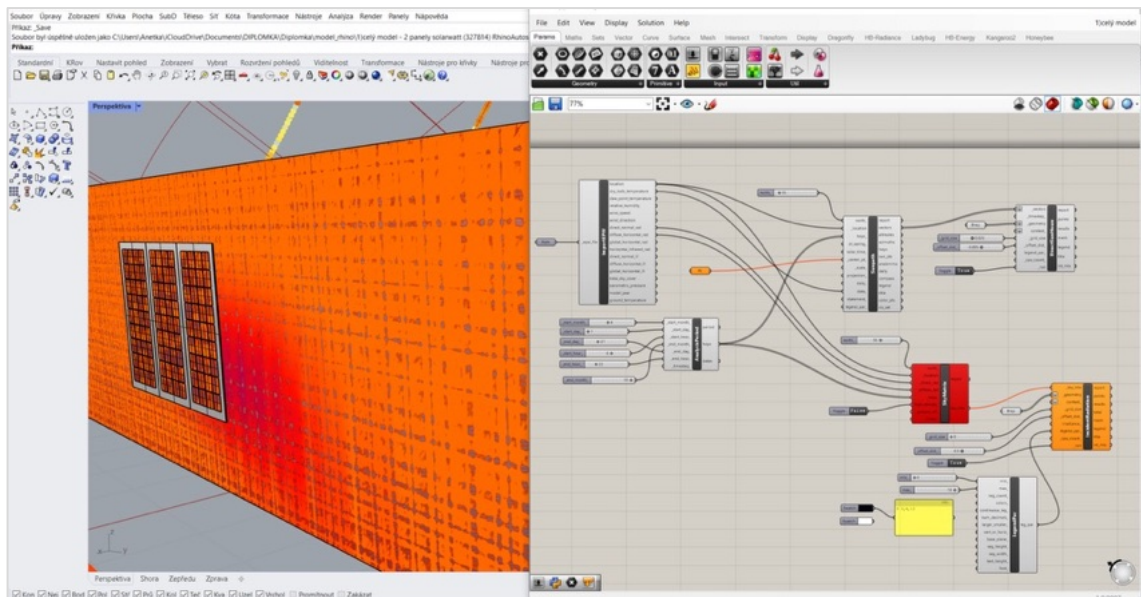
Biosolární konstrukce

Řešitel: Bc. Aneta Hermanová, Ing. Štěpánka Chomová,
Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Zaměření: Zelené střechy a fasády, dynamické simulace

Technologie: PV panely, zelené střechy a fasády, parametrický návrh, [45][46].

Přínosy: studium tepelně-vlhkostních procesů a datová podpora návrhu



Obr. 104,105) Pohled na biosolární konstrukci a testování na polygonu v centru AdMaS. Ukázka parametrického návrhu a simulace (zdroj: autor)

Datová podpora návrhu moderních konstrukcí

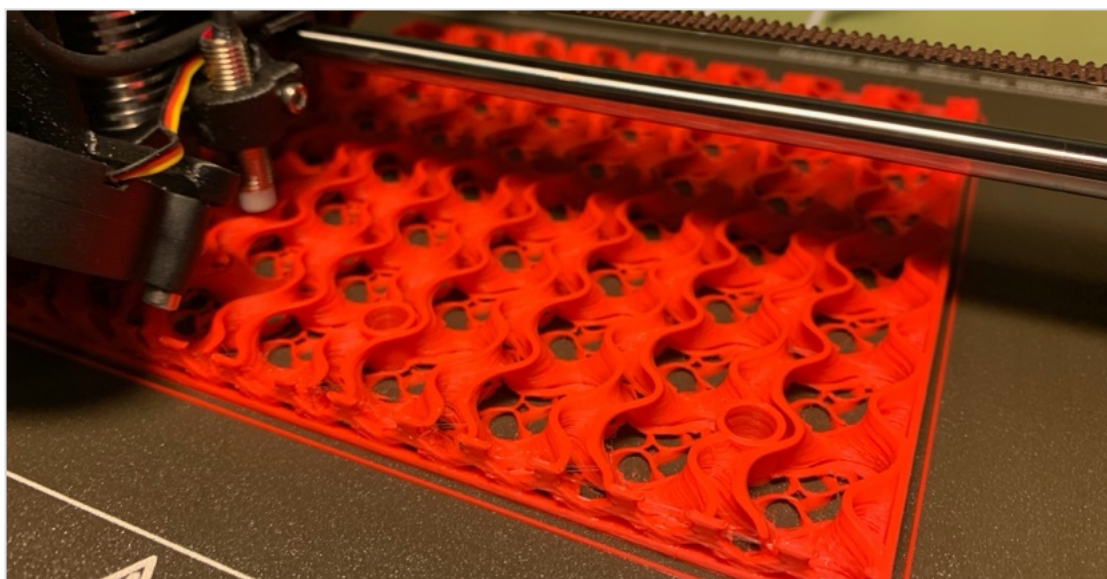
Řešitel: Ing. Jan Vystrčil, Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.,

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Zaměření: Prefabrikované systémy zelených fasád

Technologie: aditivní výroba, využití recyklovaných materiálů, parametrický návrh, [45],[46].

Přínosy: studium tepelně-vlhkostních procesů a datová podpora návrhu



Obr. 106, 107, 108) Testování elementů zelených fasád. Ukázka 3D tisku recyklátu PET pro nosné jádro panelu. (zdroj: autor + Jan Vystrčil)

Datová podpora návrhu moderních konstrukcí

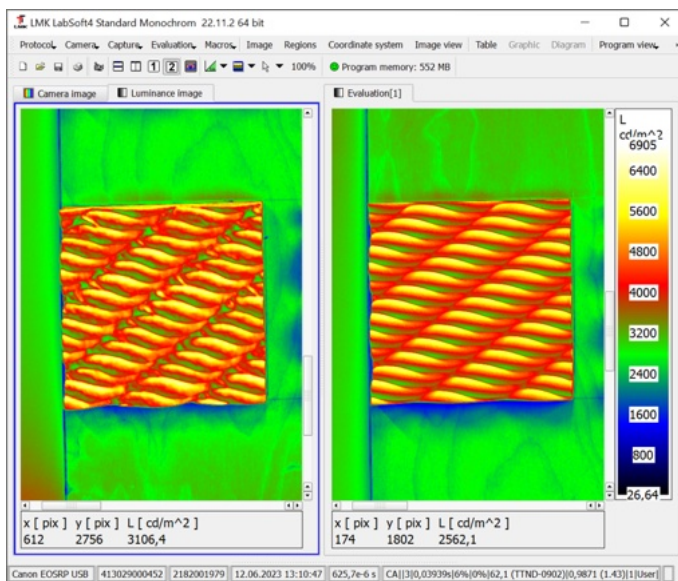
Řešitel: Bc. Marek Povýšil, Ing. František Vajkay, Ph.D.,

Ing. David Bečkovský, Ph.D.

Zaměření: Tepelná a světelná technika u staveb realizovaných aditivní technologií

Technologie: aditivní výroba, strojové učení, parametrický návrh, strojové učení

Přínosy: datová podpora pro návrh a realizaci 3D tištěných konstrukcí



Obr. 109, 110 a 111) Měření a analýza světelně technických vlastností parametricky navržené 3D tištěné stěny (zdroj: autor + František Vajkay)

6. Přehled zkratk a symbolů

BIM	- Building Information Modeling (Modelování informací o budově)
IoT	- Internet of Things (Internet věcí)
AI	- Artificial Intelligence (Umělá inteligence)
ML	- Machine Learning (Strojové učení)
VR	- Virtual Reality (Virtuální realita)
AR	- Augmented Reality (Rozšířená realita)
MR	- Mixed Reality (Smíšená realita)
XR	- Extended Reality (Rozšířená realita, termín zahrnující AR, VR, MR)
UAV	- Unmanned Aerial Vehicle (Bezpilotní letecké vozidlo)
3D	- Three-Dimensional (Trojrozměrný)
CAD	- Computer-Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CNC	- Computer Numerical Control (Počítačově řízené obrábění)
3DCP	- 3D Concrete Printing (3D tisk betonu)
RFID	- Radio-Frequency Identification (Identifikace pomocí rádiových vln)
LIDAR	- Light Detection and Ranging (Detekce světla a měření vzdáleností)
FEM	- Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
PV	- Photovoltaic (Fotovoltaické panely)
RPA	- Robotic Process Automation (Robotická automatizace procesů)
NeRF	- Neural Radiance Fields (generování fotorealistických 3D modelů na základě fotografií)
NFC	- Near Field Communication (Komunikace na krátké vzdálenosti)
HMD	- Head-Mounted Display (Hlavový displej, používá se v VR a AR)
FOV	- Field of View (Zorné pole, důležité v kontextu HMD)
UI	- User Interface (Uživatelské rozhraní, důležité pro design aplikací AR/VR)
UX	- User Experience (Uživatelské zkušenosti, souvisí s kvalitou interakce v AR/VR)
SDK	- Software Development Kit (Softwarová vývojová sada, nástroje pro vývoj AR/VR aplikací)
API	- Application Programming Interface (Aplikační programovací rozhraní, klíčové pro integraci AR/VR s jinými systémy)

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] *Artificial Intelligence (AI) in Construction Market Size*. Online. Mordor Intelligence 2022. Dostupné z: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/artificial-intelligence-in-construction-market>. [cit. 2023-11-05].
- [2] *AI Applications for the Construction Industry*. Online. SharpML. 2018. Dostupné z: <https://sharpml.com/ai-for-construction-061720/>. [cit. 2023-11-02].
- [3] S hledáním nebezpečných vad v konstrukci budov pomáhají drony. Online. ABS-Portál. 2019. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/stavebni-technika/s-hledanim-nebezpecnych-vad-v-konstrukci-budov-pomahaji-drony>. [cit. 2023-11-02].
- [4] Chytřejší stavebnictví díky Internetu věcí. Online. System On Line. 2021. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/it-reseni-pro-stavebnictvi/chytrejsi-stavebnictvi-diky-internetu-veci.htm>. [cit. 2023-11-06].
- [5] Halder, S. Afsari, K., Chiou, E., Patrick, R., Hamed, K., A., Construction inspection & monitoring with quadruped robots in future human-robot teaming: A preliminary study, *Journal of Building Engineering*, Volume 65, 2023, 105814, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105814>.
- [6] B. Rouhanizadeh, S. Kermanshachi, Challenges and strategies incorporated with transportation construction inspection, in: *Construction Research Congress 2020*, 2020, pp. 446–454, <https://doi.org/10.1061/9780784482889.047>.
- [7] M. Golparvar-Fard, F. Peña-Mora, S. Savarese, Monitoring of construction performance using daily progress photograph logs and 4D as-planned models, *Proc. 2009 ASCE Int. Workshop on Comput. Civ. Eng.* 346 (2009) 53–63, [https://doi.org/10.1061/41052\(346\)6](https://doi.org/10.1061/41052(346)6).
- [8] Real-time Mapping of Industrial Structures with the Spot Quadruped Robot. Online. Dynamic Robot Systems Group. 2021. Dostupné z: <https://ori.ox.ac.uk/labs/drs>. [cit. 2023-11-07].

- [9] 6 Major Benefits of Aerial Thermography for Solar Inspections. Online. Drone Life. 2022. Dostupné z: <https://thedronelifenj.com/benefits-of-infrared-drone-solar-inspections/>. [cit. 2023-11-07].
- [10] Infrared Thermography Inspections Detect and Document Roof Moisture Problems. Infrared roof inspection for New York State, Capitol District, and Central New York. Online. Infrared Imaging Services. 2022. Dostupné z: <https://www.infraredimagingervices.com/roof-scan-ir/>. [cit. 2023-11-07].
- [11] Catalano, CH.; Marcenó, C.; Laudicina, V.A.; Guarino, R., L. Thirty years unmanaged green roofs: Ecological research and design implications. In: Landscape and Urban Planning, Volume 149, Elsevier, Amsterdam, 2016. s. 11-19. ISSN: 0169-2046.
- [12] Gebetemariam, T. K. Post Construction Green Infrastructure Performance Monitoring Parameters and Their Functional Components, MDPI AG, Switzerland, vol.4(1), DOI 10.3390/environments4010002, 2017. ISSN 2076-3298.
- [13] N. Dunnet, N. Kingsbury, Planting Green Roofs and Living Walls, Timber Press, Portland, 2010. pp. 23, 35, 43. ISBN 978-0-88192-911-9
- [14] J. Mentés, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, Landscape and Urban Planning, Vol. 77, 2006, p. 217-226. ISSN 0169-2046.
- [15] European Federation of Green Roofs & Walls [online]. White Paper Market Report. Available at http://efb-greenroof.eu/wp-content/uploads/2016/12/efb_whitepaper_2015.pdf
- [16] S. R. Gaffin, R. Khanbilvardi and C. Rosenzweig, "Development of a Green Roof Environmental Monitoring and Meteorological Network in New York City," Sensors, Molecular Diversity Preservation International-MDPI, Switzerland, vol.9 (4), pp. 2647- 2660, 2009. ISSN 1424-8220
- [17] Pokorný J. Hospodaření s vodou v krajině – funkce ekosystémů, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 2014, pp. 19-31. Electronical ISBN 978-80-7414-886-6
- [18] Relja Arandjelovic´ and Andrew Zisserman. NeRF in detail: Learning to sample for view synthesis. arXiv:2106.05264, 2021

- [19] Tobias Bertel, Mingze Yuan, Reuben Lindroos, and Christian Richardt. OmniPhotos: Casual 360° VR photography. ACM Transactions on Graphics, 2020
- [20] Jonathan T. Barron, Ben Mildenhall, Dor Verbin, Pratul P. Srinivasan, Peter Hedman, Mip-NeRF 360: Unbounded Anti-Aliased Neural Radiance Fields. Online. S. 18. Dostupné z: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.12077>. [cit. 2023-12-03].
- [21] Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., Papaefthimiou, S., Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 180, 2023, 113306, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>.
- [22] Natutal Water Retention Measures [online]. Green Infrastructure. Dostupné z <http://nwrn.eu/concept/3835>
- [23] Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně (SZÚZ). Vegetační souvrství zelených střech – Standardy pro navrhování, provádění a údržbu. 2019. Dostupné z: www.zelenestrechy.info/standardy-ke-stazeni
- [24] Zelené střechy při Svazu zakládání a údržby zeleně (SZÚZ). Plocha zelených střech v České republice se za posledních pět let zdvojnásobila, tisková zpráva [online]. Brno, 25. listopadu 2020. Dostupné z: www.zelenestrechy.info/tz-plocha-zelenych-strech-2019
- [25] Státní fond životního prostředí ČR. Zvyšujeme dotaci na zelené střechy, tisková zpráva [online]. 15. května 2020. Dostupné z: www.sfzp.cz/zvysujeme-dotaci-na-zelene-strechy/
- [26] Statutární město Brno – Odbor životního prostředí MMB. Program: Podpora vytváření zelených střech – Výzva k podávání žádostí o dotace z rozpočtu města Brna pro rok 2022. Dostupné z: www.ekodotace.brno.cz/dotace/zelen-strecham/
- [27] SELNÍK, P.; BEČKOVSKÝ, D.; REBROVA, T. VYUŽITÍ TEXTILNÍHO RECYKLÁTU V KONSTRUKCI ZELENÝCH STŘECH. In Konference Hydroizolace 2018. Mikulov: NOVOPRESS s.r.o., nám. Republiky 15, 614 00 Brno, 2018. s. 51-54. ISBN: 978-80-87342-20-6.

- [28] NOVOTNÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D., SELNÍK, P., Výzkumná zpráva projektu - FV10078 Rozvoj retenčních materiálů na bázi recyklátu technologicky kombinované stavební vegetační konstrukce pomocí naměřených dat s verifikací na výseku prototypu. MPO TRIO1 FV10078. 2019, s. 77.
- [29] W. Xu, S. Huang, D. Han, Z. Zhang, Y. Gao, P. Feng, D. Zhang, Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house, *Case studies in Construction Materials*. 17 (2022). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509522005745>.
- [30] D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, V. Mercuri, 3D printing of reinforced elements: Technology and design approach, *Construction and Building Materials*. 165 (2018) 218-231. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818300187>.
- [31] G. Ma, R. Buswell, W.R. Leal Da Silva, L. Wang, J. Xu, S.Z. Jones, Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development, *Cement and Concrete Research*. 156 (2022). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884622000655>.
- [32] S. Huang, W. Xu, Y. Li, The impacts of fabrication systems on 3D concrete printing building forms, *Frontiers of Architectural Research*. 11(4) (2022) 563-669. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095263522000279>.
- [33] L. Breseghello, R. Naboni, Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures, *Additive Manufacturing*. 56 (2022). <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860422002718>.

8. Významné původní výsledky

Publikace

- [34] BEČKOVSKÝ, D.; VAJKAY, F.; TICHOMIROV, V. Computer tools to determine physical parameters In wooden houses. *Materiali in tehnologije*, 2016, roč. 50, č. 4, s. 607-610. ISSN: 1580-2949.
- [35] VAJKAY, F.; BEČKOVSKÝ, D.; TICHOMIROV, V. Assessment of Tubular Light Guides with Respect to Building Physics. *Materiali in tehnologije*, 2016, roč. 50, č. 3, s. 409-412. ISSN: 1580-2949.
- [36] BEČKOVSKÝ, D.; VACKOVÁ, L.; BEČKOVSKÁ, T.; SOBOTKA, J.; PĚNČÍK, J.; LAVICKÝ, M. Analysis of the diffusional properties of Peripheral walls of wooden houses during Emw radiation exposure. *WOOD RESEARCH*, 2016, roč. 61, č. 4, s. 627-635. ISSN: 1336-4561.
- [37] BEČKOVSKÝ, D.; BEČKOVSKÁ, T.; VLACH, F.; VAJKAY, F. Diffusion of water vapour, monitoring and risk analysis of wooden walls. *WOOD RESEARCH*, 2014, roč. 59, č. 3, s. 431-438. ISSN: 1336- 4561.
- [38] BAROŇ, I.; BEČKOVSKÝ, D.; MIČA, L. Application of infrared thermography for mapping open fractures in deep-seated rockslides and unstable cliffs. *Landslides*, 2014, roč. 10, č. 2, s. 15-27. ISSN: 1612-510X.
- [39] ČÁKYOVÁ, K.; VERTAL', M.; VYSTRČIL, J.; NESPĚŠNÝ, O.; BEČKOVSKÝ, D.; RUBINA, A.; PĚNČÍK, J.; VRANAYOVÁ, Z. The Synergy of Living and Water Wall in Indoor Environment-Case Study in City of Brno, Czech Republic. *Sustainability*, 2021, roč. 13, č. 21, s. 1-23. ISSN: 2071-1050.
- [40] NESPĚŠNÝ, O.; BEČKOVSKÝ, D.; VYSTRČIL, J.; VANĚK, V.; NOVOTNÝ, M.; PĚNČÍK, J. Experimental Loading of Staircase Made from Cement Fiber Boards with Cellulose Fibers Using Full-Scale Model. *Buildings*, 2023, roč. 13, č. 3, ISSN: 2075-5309.
- [41] NESPĚŠNÝ, O.; PĚNČÍK, J.; BEČKOVSKÝ, D.; VYSTRČIL, J.; ŠUHAJDA, K. Determination of material and elasticity constants of cement fibre boards to extend field of application. *Construction and building materials*, 2021, roč. 306, č. 1, s. 1-10. ISSN: 0950-0618.

Tvůrčí činnost

- [42] BEČKOVSKÝ, D.; VYSTRČIL, J.; SELNÍK, P.; PÁNEK, M.: Fasádní kazeta TOPWET; Dílec vegetační vertikální fasády na bázi nového stavebního materiálu spočívajícího v kompozitní sendvičové desce. VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz>. (prototyp)
- [43] BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.: Stanovení odtokových parametrů zelených střech; Stanovení odtokových parametrů zelených střech. Laboratoře Ústavu pozemního stavitelství, VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno. (ověřená technologie)
- [44] BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.; VYSTRČIL, J.: Testovací polygon odtokových parametrů střech; Sestava pro měření odtokových charakteristik zelených a modrých střech. Veveří 95, 60200 Brno, Fakulta stavební, laboratoř D106. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz>. (funkční vzorek)
- [45] BEČKOVSKÝ, D.; VYSTRČIL, J.: Stanovení vodních parametrů zelených fasád a vegetačních stěn; Stanovení vodních parametrů zelených fasád a vegetačních stěn. Laboratoře Ústavu pozemního stavitelství, VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno. (ověřená technologie)
- [46] BEČKOVSKÝ, D.; VYSTRČIL, J.: Sestava pro měření zelených fasád a stěn; Sestava pro měření objemu vody v konstrukcích zelených fasád a vegetačních stěn. laboratoř D106, Fakulta stavební, Veveří 95, 60200 Brno. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz>. (funkční vzorek)
- [47] BEČKOVSKÝ, D.; VAJKAY, F.; BRESET; Zařízení pro dálkové sledování stavebních konstrukcí, vnitřního prostředí budov a spotřeby energie a médií. VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno. URL: http://upst.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=31. (funkční vzorek)
- [48] BEČKOVSKÝ, D.; VLACH, F.: EnviBoxy; EnviBoxy - sestava pro teplotně-vlhkostní analýzu konstrukcí pozemních staveb. Veveří 95, Brno 60200, Budova D1 místnost laboratoří D106. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz>. (funkční vzorek)
- [49] VAJKAY, F.; BEČKOVSKÝ, D.; SELNÍK, P.: SWARD; SWARD – Software pro návrh vegetačního souvrství pro ploché a šikmé střechy. Web ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební. URL: <https://pst.fce.vutbr.cz/en/software-en/software4u-en/>. (software)