

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**KOMPLEXNÍ ANALÝZA ZAVEDENÍ
ROBOTICKÝCH TECHNOLOGIÍ DO
STAVEBNICTVÍ**

2023

**DOMINIK
KYNZL**

**VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:
ING. VJAČESLAV USMANOV PH.D.**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

Bc. Dominik Kynzl

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vjačeslavovi Usmanovovi, Ph.D. za ochotu, věnovaný čas, cenné rady, připomínky a komentáře při vypracování práce. Dále bych touto formou chtěl poděkovat všem, kteří mě během mého studia podporovali.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kynzl Jméno: Dominik Osobní číslo: 476972
Zadávající katedra: Katedra technologie staveb - K122
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Komplexní analýza zavedení robotických technologií do stavebnictví
Název diplomové práce anglicky: Complex analysis of inclusion of robotic technologies into the construction industry

Pokyny pro vypracování:

Současný stav robotizace a digitalizace ve stavebnictví
Komplexní analýza vybraných stavebních činností a jejich nahrazování robotem
Návrh a posouzení robotických systémů
Aplikace navržených systémů na praktickém příkladu
Multikriteriální vyhodnocení a nalezení optimální cesty robotizace ve stavebnictví

Seznam doporučené literatury:

JARSKÝ, Č., MUSIL, F., SVOBODA, P.: Příprava a realizace staveb (Technologie staveb II), CERM, Brno 2003, ISBN 80-7204-282-3.
SVÍTEK, Miroslav. Modelování systémů a procesů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2361-3.
BOCK, Thomas; LINNER, Thomas, Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots. New York, NY: Cambridge University Press, 2016. ISBN isbn978-1-107-07599-3hardback.
KRL – Kuka Robotic Language - Reference Guide. Release 4.1. 135 pages. KUKA Roboter GmbH.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Vjačeslav Usmanov, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 30. 9. 2022 Termín odevzdání DP v IS KOS: 9. 1. 2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Obsah

Úvod	9
Cíle diplomové práce	10
1 Současný stav robotizace a digitalizace ve stavebnictví	11
1.1 Robotizace a stavební průmysl.....	11
1.2 Průmysl 4.0	16
1.3 Stavebnictví 4.0	17
1.4 Digitalizace.....	20
1.5 Komplexní analýza stavebních činností a jejich automatizace	21
2 Současný stav provádění vybraných stavebních činností	33
2.1 Technologie zdění.....	33
2.2 Technologie provádění omítek.....	36
2.3 Technologie provádění maleb	39
2.4 Technologie provádění obkladů	41
3 Aplikace na praktickém příkladu	44
3.1 Analýza ručního a robotického procesu zdění	46
3.1.1 Ruční způsob provádění	46
3.1.2 Robotický způsob provádění	46
3.2 Analýza ručního a robotického procesu omítání.....	53
3.2.1 Ruční způsob provádění	53
3.2.2 Robotický způsob provádění	53
3.3 Analýza ručního a robotického provádění maleb	58
3.3.1 Ruční způsob provádění	58
3.3.2 Robotický způsob provádění	58
3.4 Analýza ručního a robotického provádění obkladů	62

3.4.1	Ruční způsob provádění	62
3.4.2	Robotický způsob provádění	62
4	Multikriteriální vyhodnocení	68
4.1	Vyhodnocení procesu zdění	71
4.2	Vyhodnocení procesu omítání	74
4.3	Vyhodnocení procesu maleb	76
4.4	Vyhodnocení procesu obkladů	79
	Závěr	81
	Použitá literatura	84
	Použité elektronické dokumenty	84
	Použitá tištěná literatura	88
	Seznam zkratk	90
	Seznam obrázků	90
	Seznam tabulek	93
	Seznam grafů	94
	Seznam vzorců	94

Anotace

Komplexní analýza zavedení robotických technologií do stavebnictví

Diplomová práce se zabývá problematikou automatizace a robotizace ve stavebnictví. Zaměřuje se na důvody, které brzdí stavební průmysl na cestě k většímu využití autonomních robotů a vyšší digitalizaci stavebního procesu. V této práci je provedena rešerše stavebních činností, které jsou ve vyšší míře časově zastoupeny v procesu výstavby a u vybraných činností je porovnáváno ruční a robotické provádění dané technologie. Jsou nalezeny klíčové faktory, které zabraňují intenzivnějšímu zapojení robotických technologií do stavebního průmyslu. V závěru práce je provedeno kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení a doporučeno, na kterou robotickou technologii by se měl budoucí výzkum zaměřit.

Klíčová slova:

Automatizace, robotizace, stavební průmysl, robot, zdivo, omítky, malby, obklady, rodinný dům

Abstract

Complex analysis of inclusion of robotic technologies into the construction industry

This diploma thesis deals with issues of automation and robotization that appear in the construction industry. It focuses on the reasons that prevent the construction industry from the wider use of autonomous robots and higher digitization of the construction process. The research performed in this work concerns the construction works, which are more time-represented in the construction process. In addition, manual and robotic implementation for selected activities are compared. Key factors that are preventing greater adoption of robotic technologies in the construction industry have been identified. At the end of the thesis, a quantitative and qualitative evaluation is processed, and it recommends on which robotic technology future research should focus.

Keywords

Automation, robotization, construction industry, robot, masonry, plastering, painting, cladding, detached house

Úvod

Průmysl je velmi úzce spojován se snahou co největší efektivity produkce, tedy výrobou co nejkvalitnějšího produktu za co nejkratší dobu a co nejlevněji. K tomu se váže rychlost vývoje automatizovaných a robotizovaných technologií. Je absolutní snaha o vytvoření autonomních systémů, které by zvládaly vše potřebné bez jakékoli pomoci člověka.

Ve stavebnictví je však realita poněkud rozdílná. Robotické technologie ve stavebnictví jsou zatím na počátku, i přesto je, dle mého názoru, čeká velká budoucnost. Hlavní otázkou je, v čem konkrétně budou roboti na stavbách nejčastěji pomáhat, kde se investice do robotizace a automatizace vyplatí nejvíce, jak by měli roboti vypadat, aby stoprocentně nahradili člověka při určitých stavebních pracích nebo co všechno by měly umět. [1]

Hlavními problémy zavedení automatizace do stavebního průmyslu jsou výsledné výrobky a jejich velikost, unikátnost a složitost. Každá budova je originál, tedy každý nový produkt stavebního průmyslu je něčím ojedinělý a jinak ovlivňuje stavební proces. Dalším problémem jsou pracovní prostory, které se neustále mění. Není možné vše lokalizovat na jedno místo, jelikož lokace nových projektů se mohou lišit o stovky kilometrů. Nemělo by se zapomenout ani na problémy, které připravuje počasí a střídání ročních období. Toto všechno jsou překážky, se kterými se vývojáři robotických systému pro stavebnictví musí vypořádat, protože tyto problémy jsou trvalé. [2], [3].

Cílem této práce je najít ideální cestu, kterou se dál vydat ve výzkumu nových robotických systémů, pomoci investorům při výběru stavebních činností, do kterých se vyplatí vložit peníze a zjistit, kde je robotizace nejpotřebnější.

Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je pomoci postupné robotizaci ve stavebnictví a hledat optimální cestu a postup zavedení automatizace a robotizace ve stavebnictví. Dalším cílem je popsat současný stav robotizace ve stavebním průmyslu, porovnat jej s ostatními odvětvími a najít nedostatky, které se ve stavebnictví stále nachází. Dále také zanalyzovat, proč stavební průmysl ztrácí pomyslný krok v automatizaci, co by mělo předcházet všem výzkumům a pokusit se nastínit podmínky pro rychlejší pokrok. Jedním z vodítek při nastavování těchto podmínek by mělo být vytvoření komplexní analýzy stavebních činností, ze kterých budou vyselektovány činnosti, které člověku dělají největší problém, jsou nejnáročnější a daly by se co nejjednodušeji nahradit roboty. V této analýze je cílem stručně popsat v jaké fázi se nacházíme, kde je největší háček a zda už někteří roboti existují. Zjistit, jakým směrem by se měl výzkum vyvíjet a posouvat, kde je největší potenciál a kam se naopak implementace automatizace vůbec nehodí a lidé jsou pro danou práci ideálními vykonavateli. Vzápětí porovnat a zanalyzovat, při jaké práci je robot nejvýkonnější a nejužitečnější a kam se ho vyplatí implementovat co nejdříve. Výsledným bodem této práce by mělo být multikriteriální porovnání lidské a robotické práce a hledání výhod a nevýhod obou směrů. Nalezení levnějšího a rychlejšího pracovníka pro vybrané stavební činnosti, stanovení a odůvodnění podmínek, za kterých je jedna z variant lepší a v případě lepšího výsledku lidské práce nastínění toho, co by se mělo globálně změnit a jakým způsobem reagovat na vývoj průmyslu, aby šlo stavebnictví stále s dobou a došlo k vyššímu využívání robotické síly při náročných pracích.

1 Současný stav robotizace a digitalizace ve stavebnictví

1.1 Robotizace a stavební průmysl

Stavební průmysl, co se týče robotizace a automatizace, zaostává několik desítek let za některými jinými průmyslovými odvětvími. Je to dáno především odchylkami a specifikacemi, které prudce zabraňují rychlejšímu vývoji a odosobňování se od lidské práce ve stavebnictví. Při porovnání hlavních vlastností stavební a průmyslové výroby se dá zjistit, v čem se nachází největší problém pomalejšího růstu automatizace ve stavebnictví.

Hlavní vlastnosti stavební výroby

- Velké velikosti a složitost finálních výrobků (staveb)
- Výroba má často individuální charakter
- Nestálé výrobní prostory – přesuny čer, materiálu, strojů
- Časté přesuny a nutnost přizpůsobování se novému prostředí
- Velký vliv vnějších podmínek na výrobní proces
- Vznik nestálosti pracovníků a neúčast v práci
- Velmi dlouhá realizace výrobku
- Mnoho druhů pracovních předmětů a pracovních prostředků
- Logistická náročnost – zásobování
- Vysoký podíl pracnosti pro přepravu a manipulaci s materiálem, což váže značný počet pracovních sil a dopravních prostředků.



Obr. č. 1 – Stavební výroba

Zdroj: [4]

Hlavní vlastnosti průmyslové výroby

- Využití automatizace a počítačového plánování
- Převládání sériové výroby
- Výroba v továrnách, kde je vše pro výrobu potřebné
- Kvalifikované pracovní síly
- Vysoká organizace a dělba práce
- Tendence k nepřetržitosti provozu
- Nejvyšší kompletace výrobků na jednotlivých úrovních
- Maximálním využití normalizace, typizace, standardizace, simplifikace a unifikace [2]



Obr. č. 2 – Průmyslová výroba

Zdroj: [4]

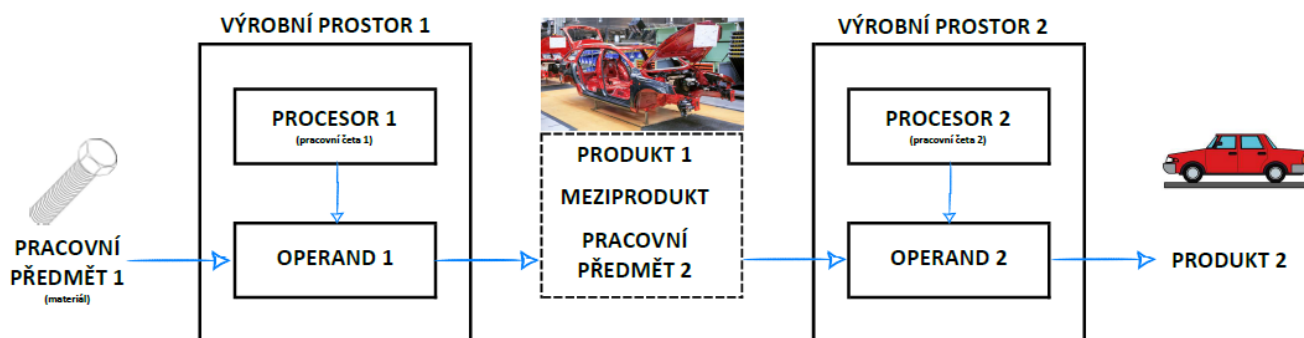
V dalších bodech práce jsou popsány hlavní specifika a odchylky od ostatních průmyslů, které mají největší vliv na vysokou náročnost automatizace pro stavebnictví.

Velké rozměry finálních výrobků

Pokud se budeme bavit o porovnání finálního výrobku ve stavebnictví, kde je koncovým prvek většinou budova a např. strojírenství, kde je finálním produktem zpravidla něco, co se do budovy musí vejít, uvidíme, že se svými rozměry absolutně liší. K velkým rozměrům jsou navázány i počty kusů, které je schopný vyprodukovat strojírenský průmysl a stavební průmysl. Tato čísla jsou absolutně nesrovnatelná. Myslím si, že právě to jsou první důvody velké náročnosti automatizace v oboru stavebnictví.

Výrobní prostory

Od velikosti finálního produktu se dostáváme k jeho výrobě. Výrobní průmysl má oproti stavebnictví nesmírnou výhodu, kterou je možnost využití jednoho místa, většinou továrny, kam se veškerá výroba situuje. Jak je znázorněno na obrázku č. 3, tovární výroba je typická tím, že pro procesor, operand a odpovídající transformaci jsou vytvořeny plně kompatibilní výrobní prostory. Procesory zůstávají stále na svém místě ve výrobních prostorech a produkty transformace výrobní prostor opouštějí, aby podstoupily další transformaci v jiném výrobním prostoru. Výrobek se v továrnách často pohybuje na výrobní lince, pracovníci jsou na jednom místě a nemusí se neustále přemísťovat. Také veškeré speciální systémy a zařízení nutná pro výrobu mohou být v zázemí továrny.

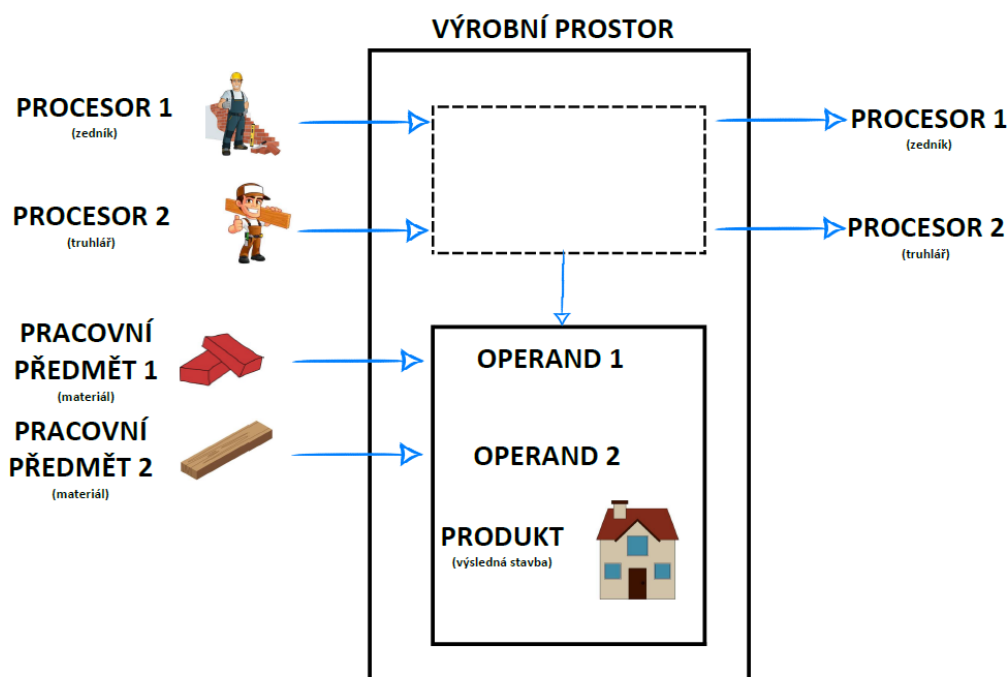


Obr. č. 3 – Tovární výroba

Zdroj: [2]; upraveno

Oproti tomu ve stavebnictví se vše musí orientovat na stavební pozemek, na kterém v budoucnu bude kýžený výrobek v podobě nové budovy stát. Na dané geografické umístění stavby je nutné se přizpůsobit, včetně všech vlastností staveniště a jeho vnějších podmínek. Při procesu výstavby však nedochází k tomu, že operand výrobní prostor neopouští a jsou to naopak jednotlivé procesory, které musí po skončené transformaci výrobní prostor opustit tak, jak vidíme na obrázku č. 4. Výrobním prostorem stavby se tedy stává celý prostor budoucího produktu. Proto je nutné, aby bylo neustále přemýšleno nad logistikou a neustálým se měnění výrobního prostoru. Zároveň je nutné brát v potaz, že se pohybujeme v oblasti budoucího výrobku a není možné ho nějakým způsobem ničit a poškozovat.

Dalším velkým rozdílem je i to, že transformovaný operand nelze umísťovat do výhodných pracovních poloh, jak tomu může být např. na montážní lince, kde lze montovaný výrobek otáčet podle potřeb rychlé montáže. Naopak pracovníci musí být ti, kteří se musí podřizovat nepříznivým podmínkám. [2]



Obr. č. 4 – Staveništní výroba

Zdroj: [2]; upraveno

V současné době můžeme vidět větší rozvoj prefabrikace a vyšší využití prefabrikovaných dílců, což mírně propojuje stavební a strojní výrobu a posouvá automatizaci ve stavebnictví trochu dále. Prefabrikované dílce jsou vyráběny mimo staveniště ve specializovaných továrnách, odkud jsou pak odváženy na staveniště a zabudovány do budoucí budovy. Tento postup výrazně zlepšuje rychlost výstavby, má pozitivní dopad i na náročnost výstavby a často ovlivňuje i výslednou cenu. Nevýhodou je, že objemnější prefabrikované dílce se na stavbu velmi těžko dopravují a k jejich přepravě na samotném staveništi je často zapotřebí jeřáb. Ačkoliv se zdá být používání větších prefabrikovaných dílců velmi výhodné, ve většině případů tomu tak není a většina stavebních děl vzniká přímo na místě tomu určeném. [5]

Unikátnost výrobků

Pro průmyslovou výrobu je typické to, že se v jedné fázi a na jednom místě vyrábí jeden produkt po dobu, než tento produkt nahradí jiný a ten se opět vyrábí na stálém místě za stálých podmínek. Ovšem ve stavebnictví tomu tak není. Pokud pomineme výjimku sídlišť a městských částí se stejně vypadajícími budovami, je každá budova originál. Tomuto problému by měla pomoci častější prefabrikace a pouze jednoduchá montáž předem dovezených dílců na stavenišťe, což by pomohlo jak automatizaci, tak i rychlosti výstavby. Automatizovat stavebnictví a častěji používat prefabrikáty bylo typické pro 60., 70. a 80. léta minulého století. Tento proces pomáhal v řešení bytové krize. Bylo to rychlé a levné, proto panelových domů vzniklo na našem území nespočet. [6]

Vliv vnějšího prostředí

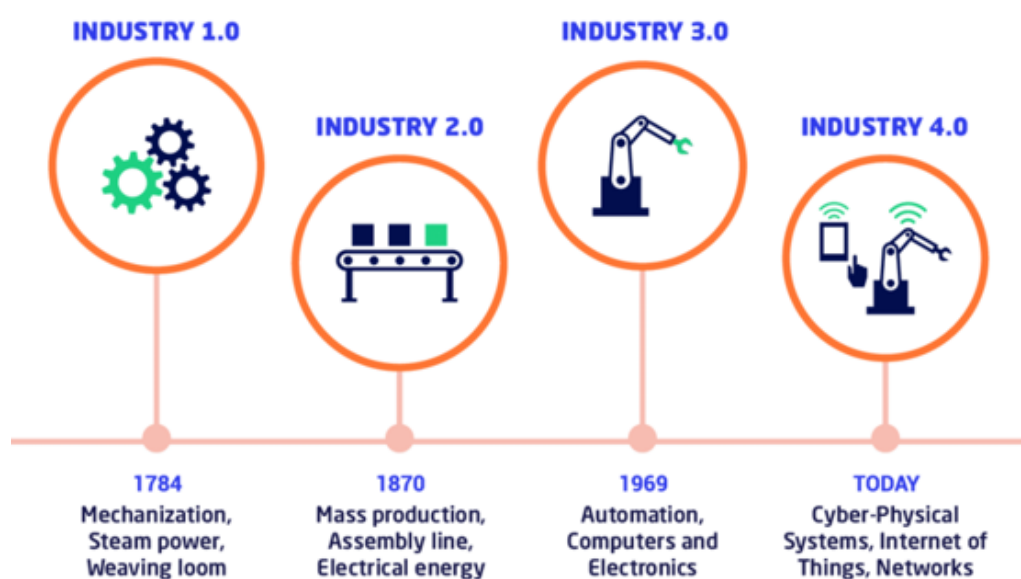
Jelikož stavba není tak jako průmyslová výroba schována pod střechu továrny, zabrzdí ji i vliv vnějšího prostředí. Nejvíce výstavbu ovlivňuje počasí, střídání ročních období, ale také špatné základové poměry.

Počasí a střídání ročních období mají velký vliv na výsledný harmonogram stavby. Načasování některých prací musí být upraveno a posunuto, tedy se prodlužuje proces výstavby. Zároveň některé stavební činnosti nejsou při nepřízní počasí v souladu s technologickými předpisy či technickými normami, což také ovlivňuje posouvání termínů dokončení. I základové poměry mohou výstavbu značně prodloužit, což s sebou nese další finanční ztráty. [1]

1.2 Průmysl 4.0

Průmysl 4.0 je výraz, který byl poprvé vyřčen v roce 2011 na významném průmyslovém veletrhu v Hannoveru a o dva roky později zde byla představena německá národní platforma Industrie 4.0. Jedná se v pořadí čtvrtý stupeň průmyslové revoluce, a navazuje na Průmysl 1.0, který souvisel s přivedením strojů poháněných párou, Průmysl 2.0, kdy došlo ke změnám v elektrifikaci a zapojení pásové výroby

a Průmysl 3.0, ve kterém se v tuto chvíli pohybujeme a ve kterém došlo k propojení informačních technologií a strojů. Vize Průmyslu 4.0 by měla přinést absolutní automatizaci výroby a plnou digitalizaci průběhu životnosti výrobku. Zároveň by mělo dojít k propojení všech strojů pomocí inteligentní sítě a tím umožnit komunikaci strojů mezi sebou. Průmysl 4.0 bude mít za následek výrazné omezení lidské práce z důvodu vyššího vytěžování strojů. Z toho plyne zvýšení efektivity práce, snížení časové prodlevy během svátků a v konečném důsledku dojde i ke snížení nákladů. [3]



Obr. č. 5 – Revoluce průmyslu

Zdroj: [4]

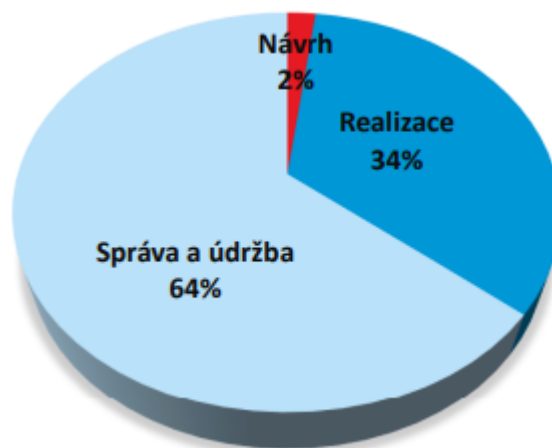
1.3 Stavebnictví 4.0

Stavebnictví 4.0 je součástí iniciativy Průmysl 4.0 implementovanou pro stavební průmysl, která je v současnosti ve vyspělých zemích velmi diskutovaným tématem. Jelikož je již známo, že stavebnictví je, co se týče automatizace a robotizace výroby, poměrně pozadu oproti strojnmu průmyslu, vyzdvihneme alespoň ty aspekty, které se stále posouvají a díky kterým je možné o počátku digitalizace hovořit.

Prvním procesem, který určitě zaznamenal velký posun především díky vývoji počítačové techniky je navrhování staveb. Za posledních pár desetiletí byl zaznamenán posun od rýsovací prken a rýsovacích potřeb k počítačům, díky kterým se tak výrazně usnadnil a zpřesnil návrh a příprava staveb. Prvním pokročilým nástrojem pro jednodušší navrhování byl CAD (Computer Aided Design), který je postupně nahrazován používáním sofistikovanější a pokročilejší BIM (Building Information Model) technologie, díky které je možnost do modelu stavby přidat důležité informace o fyzikálních, statických, tepelně technických, ekonomických i technologických vlastnostech objektů obsažených v projektovaném objektu a které jsou zásadní pro další vývoj stavby. Tato technologie při správné aplikaci umožňuje kromě jiného i komplexní multioborové posouzení projektu, eliminaci chyb a účinnou projektovou koordinaci v reálném čase. Díky těmto technologiím je drtivá většina budov dnes navrhována na počítačích, tedy je zpracovávána v digitální podobě. [7]

Značný progres pro stavební průmysl zaznamenalo již samotné zavedení CAD programů. To v praxi razantně omezilo až prakticky vytlačilo klasické ruční rýsování, avšak za velký úspěch se bude považovat až masivní používání BIM, díky kterému by mělo dojít k významné úspoře financí. S pomocí BIM by nemělo docházet k tak vysoké chybovosti, jako je tomu v současnosti a většina změn v projektu se bude rovnou zaznamenávat a promítat do dalších fází. BIM je samozřejmě velmi používaným nástrojem i během doby realizace stavby. Slouží jako obrovská zásobárna informací a modelů, podle kterých se po celou dobu výstavby řídíme.

Další fází, ve které by byla vize Stavebnictví 4.0 velmi užitečná a používaná je provoz již postavené stavby. Jak je vidno na grafu č. 1 právě správa a údržba stavebního objektu tvoří až dvě třetiny nákladů na objekt. Při použití BIM technologie již při návrhu stavby bude značně účinnější budoucí provoz. Ačkoliv se zdá být v první fázi zbytečné investovat do dražšího návrhu stavby, když je tu stále možnost využití klasičtější 2D dokumentace, v dlouhodobém měřítku je úspora peněz vysoká. [7]



Graf č. 1 – Rozdělení nákladů během životního cyklu stavby

Zdroj: [8]

Je nutné stanovit, že Stavebnictví 4.0 neznamená jen používání BIM a digitalizaci, ale hlavně koncepční změnu v myšlení a vnímání stavebnictví jako celku. Avšak BIM může být považován jako jedna z nejdůležitějších složek této změny a základní kámen pro budoucnost konceptu Stavebnictví 4.0. Dalšími úkoly této vize je integrovat následující oblasti:

- Výrobní kapacity pro výrobu a přepravu stavebních hmot a komponent
- Robotizovaná výstavba
- Legislativní procesy, např. k získání stavebního povolení
- Automatizace budov a jejich napojení na energetickou, dopravní a jinou infrastrukturu
- Procesy údržby budov

Bude nutné vytvářet agentové komunikační prostředí, tedy větší či menší sítě, které lze posléze propojovat či integrovat. [3]

Možným řešením plně automatizované výstavby je koncept ROD (Robot – Oriented Design). V případě užití ROD je návrh celého období výstavby připravován a přizpůsobován komplexní automatizaci a robotizaci. Je tedy kladen důraz na:

- automatizovanou nebo robotizovanou výrobu stavebních komponent a prefabrikaci

- využití konstrukčních robotů k výstavbě
- automatizaci procesů na staveništi
- automatizaci podpůrných technologií [9]

1.4 Digitalizace

Používání metody BIM je jedním z prvních důležitých kroků pro postupnou automatizaci stavebního průmyslu. Je to velmi široký pojem, který popisuje proces vytváření a správy digitálních informací o realizovaném stavebním výrobku jako je budova, most, dálnice či tunel. S postupem času se zvyšuje úroveň podrobnosti informačního modelu budovy a různé aspekty modelu se mohou vyvíjet různou rychlostí, mohou vznikat u různých členů projektového týmu a jejich vývoj může přejít od zaměstnavatele, ke konzultantům, k zhotoviteli a dodavatelům a v konečném důsledku zpět k zaměstnavateli. Je proto důležité, aby byla definována jedna míra podrobnosti (Level of Detail – LOD), která je vyžadována v každé fázi vývoje projektu a každým členem jednotlivých týmů. Tím je zajištěno nejen to, že se návrh vyvíjí dostatečně podrobně, ale také to, že jsou skutečně poskytnuty informace, které klient potřebuje k rozhodování o vývoji projektu a následnému efektivnímu fungování dokončeného projektu. [10]

Jelikož robot musí mít plně digitalizované vstupní podklady spojené s umístěním v prostoru, což by již mělo být možno pomocí BIM, je nutné věnovat více úsilí nalezení správné míry podrobnosti jednotlivých projektů. Vykreslení robota v reálném projektu funguje na principu digital twin, tedy digitálního dvojčete. Digitální dvojče umožní umístění virtuální kopie reálného fyzického dvojčete, konkrétně řešené stavby. Klíčovou výhodou digitálního dvojčete, které se jinak chová zcela jako jeho fyzická předloha, je to, že je na něm možné simulovat a optimalizovat veškeré činnosti, chování, stavy a operace. Digitální dvojče námi řešené stavby je pro práci se stavebními roboty digitálním vstupem, který je dále upravován. Avšak při modelování procesu je nutné dbát na detailnost modelu. BIM nevykresluje jednotlivé bloky zvlášť, ale vykreslí najednou celou stěnu, což by pro robotizaci mohlo být komplikované. Pokud budeme chtít používat roboty, musí mít přesně určený Level of

Detail na souřadnice cihly, kterou má vzít z přesně umístěné palety a položit ji přesně na místo, na které je vyžadováno s velmi velkou pečlivostí a smyslem pro detail. Nebude jednoduché zpracovat velké projekty do takových detailů. Nehledě na to, že výsledné projekty budou extrémně objemné díky veškerým informacím a detailům, které budou obsahovat.

V současnosti je digitalizace nejrozšířenější v oblasti návrhu staveb. Důvodem jsou výhody, které s sebou digitalizovaný projekt přináší: sdílené aktuální podklady, snazší kooperace všech zúčastněných stran, přístupný odkudkoliv. Podmínkou nástupu další průmyslové vlny, Stavebnictví 4.0, je posunout digitalizaci i do dalších fází výstavby. Klást důraz na další vývoj v digitalizaci plánování stavební výroby, digitalizaci stavební výroby a digitalizaci provozu a správy staveb. Tyto aspekty jsou nutností pro další vývoj robotizace a možnosti budoucího využívání robotů na staveništích. [11], [12]

1.5 Komplexní analýza stavebních činností a jejich automatizace

V tabulce č. 1 je vyobrazeno několik stavebních činností, které mají zásadní vliv na výstavbu objektu, ať už z hlediska časové náročnosti nebo z hlediska technologické náročnosti. U těchto činností je hodnoceno, zda se vyplatí dále postupovat ve výzkumu robotizace a automatizace. Rovněž je v tabulce popsáno, v jaké fázi robotizace a automatizace se právě daná stavební činnost nachází a predikce její budoucnosti.

Tabulka č. 1 – Potenciál stavebních prací a jejich automatizace

Stavební činnost	Časová náročnost činnosti	Současný stav provádění	Aktuální stav automatizace	Budoucnost v automatizaci
Betonáž	5 - 10%	Vysoká náročnost bednění, armování a vibrování	Roboti existují, velkou nevýhodou je, že nelze provádět převisy konstrukce, nutný pevný povrch, není zaveden do provozu	Velmi složitý proces pro zavedení automatizace
Rozvody vody	3 - 5%	Vysoká složitost, provádění v často stísněných prostorech	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Velmi složité, je prakticky nemožné sestavit robota, který by tuto činnost zvládal tak jako člověk
Rozvody plynu	3 - 5%	Vysoká složitost, provádění v často stísněných prostorech	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Velmi složité, je prakticky nemožné sestavit robota, který by tuto činnost zvládal tak jako člověk
Rozvody elektřiny	3 - 5%	Vysoká složitost, provádění v často stísněných prostorech	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Velmi složité, je prakticky nemožné sestavit robota, který by tuto činnost zvládal tak jako člověk
Rozvody kanalizace	5 - 7%	Vysoká složitost, provádění v často stísněných prostorech	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Velmi složité, je prakticky nemožné sestavit robota, který by tuto činnost zvládal tak jako člověk
Zdění	10 - 15%	Nízká náročnost, opakující se postup	Existuje několik prototypů zdících robotů, implementace do běžného provozu je velmi blízko	Zjednodušení a zrychlení procesu, potřeba méně lidské síly, velký potenciál
Betonové potěry/mazaniny	5 - 10%	Nízká náročnost	Existují poloautomatické nivelačky potěrů, problém je v extrémní velikosti stroje a nůstosti přítomnosti a pomoci člověka	Práce na velké ploše, robot potřebuje být na pevném povrchu
Osazování oken/dveří	5%	Vysoká náročnost provádění	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Velmi složité, je prakticky nemožné sestavit robota, který by tuto činnost zvládal tak jako člověk
Vnitřní omítky	3 - 5%	Střední náročnost	Existuje několik prototypů omítacích robotů, implementace do běžného provozu je velmi blízko	Potřeba méně lidské síly, vyšší přesnost provádění, velký potenciál
SDK příčky, předstěny	3%	Nízká náročnost	Robotizace a automatizace je v procesu výzkumu, avšak před implementací do procesu je ještě dlouhá cesta	Jednoduchý proces, ideální pro lidskou činnost, zatím nedává smysl náhrady robotem
Malby	3 - 5%	Nízká náročnost	Existuje několik prototypů robotů pro malby, implementace do běžného provozu je velmi blízko	Jednoduchý a často opakovaný proces, velký potenciál
Pokládka podlahy	5%	Střední náročnost	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Bylo by velmi náročné sestavit robota, který by zvládal činnost lépe než člověk
Obklady	2 - 3%	Nízká náročnost	Prototypy robotů pro obkládání existují, avšak nejsou implementovány do běžného provozu	Často opakovaný proces, nutnost drobného robota pro dobrou orientaci v malých místnostech
Montáž tepelné izolace	3 - 5%	Nízká náročnost	Existuje prototyp pro stříkanou tepelnou izolaci, pro kusovou zatím ne	Jednoduchý proces, práce s velkými díly, zatím nedává smysl náhrady robotem
Kontrolní činnost	3 - 5%	Nízká náročnost	Robotizace a automatizace zatím není ani v procesu výzkumu	Opakující se proces, především pro kontrolu rovinnosti poměrně velký potenciál

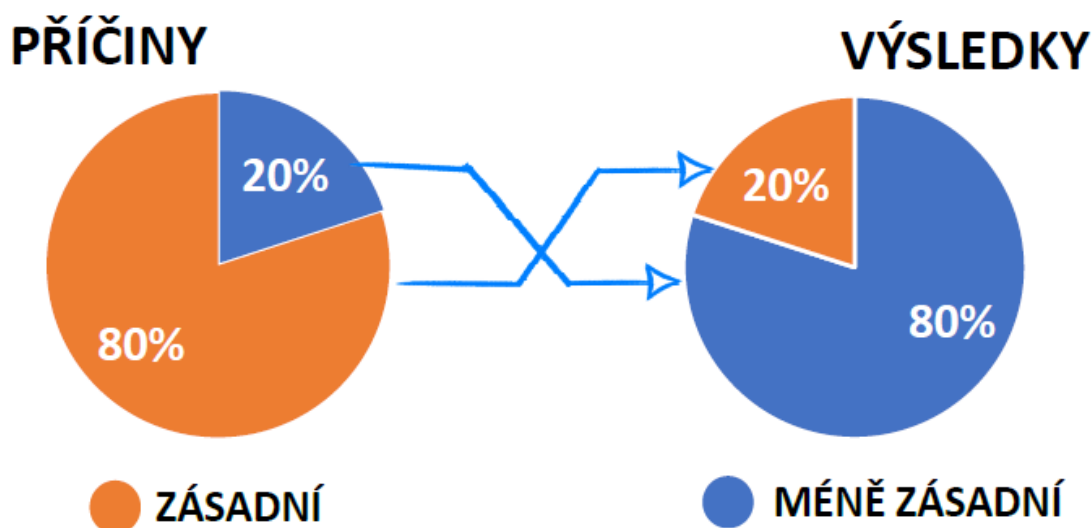
Tabulka č. 1 byla vytvořena na základě reálného projektu rodinného domu. Jedná se o dvouposchodový rodinný dům se zastavěnou plochou 128,75 m² a obestavěným prostorem 748,68 m³. Konstrukční systém tohoto domu je stěnový. Z dat Českého statistického úřadu plyne, že podíl podobných objektů tvoří až 15009/29008, což je rovno 51,72 % z celkového počtu domů vystavěných v České republice za rok 2021 (viz tabulka č. 2).

Tabulka č. 2 – Dokončené byty a domy v roce 2021

Dokončené byty a domy v roce 2021*	Celkem	Zděné
Počet bytů	10973	6077
Počet rodinných domů	18035	15009
Počet objektů celkem	29008	21086
Podíl zděných RD ku celkové výstavbě		51,74%

* dle údajů Českého statistického úřadu (7. 12. 2022)

Pro tuto práci byly vybrány pouze stavební činnosti s vyšší mírou časového zastoupení v celkové výstavbě projektu. Tato časová náročnost činnosti byla počítána jako podíl celkového času stráveného jednotlivými pracemi této činnosti podělenými celkovou dobou projektu. Je samozřejmé, že se v každém stavebním projektu liší zastoupení jednotlivých činností podle konstrukčního systému, typu budovy, použití jednotlivých materiálů a dalších proměnných hodnot. Avšak bylo nutné z něčeho vycházet, aby bylo možno vyřadit práce, u kterých se alespoň prozatím absolutně nevyplatí investovat čas do zkoumání automatizace, jelikož neberou tak velké procento času celého projektu. Bylo aplikováno Paretovo pravidlo, které říká, že 80 % výsledků pochází z 20 % příčin. Pro tento projekt nám Paretovo pravidlo říká, že pouhých 20 % stavebních činností tvoří 80 % náročnosti projektu. Tyto činnosti jsou zahrnuty do tabulky, jsou vyznačeny zeleným podbarvením a dále rozebírány v dalších fázích práce. [13]



Obr. č. 6 – Paretovo pravidlo

Zdroj: [13]; upraveno

V dalších buňkách tabulky je velmi stručně popsán současný stav provádění dané činnosti, zda je pro člověka náročná nebo nikoli. Čtvrtý sloupec se zaměřuje na aktuální stav automatizace. Pokud nějaký robot pro danou stavební činnost existuje, je zde nastíněno, kde jsou hlavní nedostatky této robotické technologie, popř. zda už je robot alespoň částečně implementován do provozu. Tento sloupec byl vyplněn na základě rešerše na internetu, rešerše stavebních časopisů a článků a prohledávání v databázi Úřadu průmyslového vlastnictví (viz [15]). Pátý sloupec je věnován budoucnosti jednotlivých procesů v automatizaci. Je zde popsáno, zda prozatím dává smysl se výzkumu automatizace věnovat, v čem by automatizace a robotizace pomohla, zda dává smysl tento proces nahrazovat nebo zda je člověk jednoduše nejlepší možnou pracovní silou a zhodnocení potenciálu nahrazení této stavební činnosti robotem.

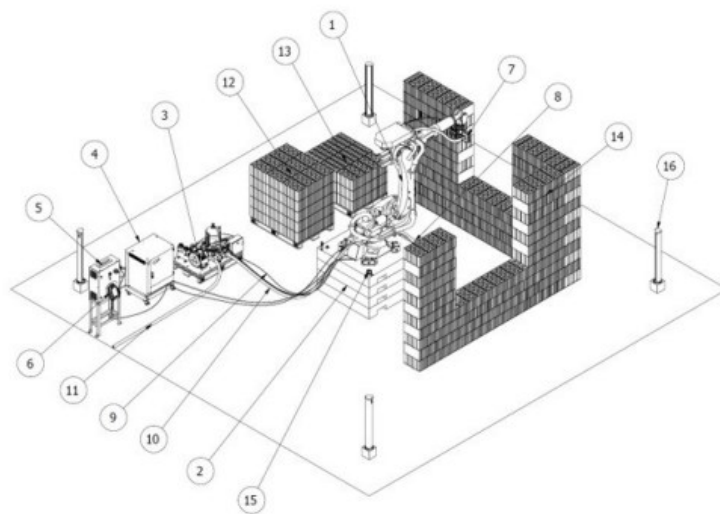
Z analýzy v tabulce č. 1 byly vyselektovány a vyznačeny zelenou barvou čtyři typy stavebních prací, které jsou, dle mé rešerše, vhodné pro zabývání se blízkou budoucností robotizace a automatizace. Požadavky na tyto čtyři stavební činnosti jsou sepsány v dalších bodech.

Roboti pro zdění

První pokusy o aplikaci robotických technologií ve stavebnictví se ve světě objevují stále častěji, ať už se jedná o dálkově ovládaná robotická zařízení, například pro inženýrské stavby nebo sbíjecí zařízení. Poloautonomní zdící roboti nejsou výjimkou a snaží se najít si místo, kde budou stále využitelnější. Bohužel stále nejsou implementovány do běžného provozu a potřebují ke své práci lidskou pomocnou sílu. Existuje větší množství zdících robotů, v této práci byly zmíněny a stručně popsány pouze dva vzhledem k náročnosti a velikosti diplomové práce.

Robotický zdící systém

První robotický zdící systém je vynález patentovaný Českým vysokým učení technickým v Praze. Pomocí něj byl uskutečněn projekt výstavby rodinného domu. Robotický zdící systém obsahuje robotickou paži se zařízením pro uchopení zdícího prvku a řídicí jednotku komunikačně propojenou s robotickou paží. Robotická paže dále obsahuje zařízení pro nanášení pojiva a systém je opatřen zásobníkem pojiva a alespoň jednou hadicí pro přívod pojiva od zásobníku pojiva k zařízení pro nanášení pojiva. Zařízení pro uchopení zdícího prvku je opatřeno alespoň jednou přísavkou spojenou s generátorem podtlaku. [16]



Obr. č. 7 – Robotický zdící systém

Zdroj: [16]

Hadrian X

Australská robotická společnost Fastbrick Robotics v roce 2015 představila prototyp zdícího robota Hadrian 105, který během testovacího období obstál, a tak se vývoj mohl posouvat dál. Díky investicím do vývoje mohl později vzniknout model zdícího robota Hadrian X, který by měl dokázat vyzdít rodinný dům za pouhých pár dní. Stavební robot Hadrian X je zabudován do nákladního auta. Robot je řízen sítí počítačů, kamer, servomotorů a laserových senzorů pro sledování polohy. Tento zdící robot díky své tuhé konstrukci dokáže dosáhnout ramenem až do vzdálenosti 30 metrů.



Obr. č. 8 – Hadrian X vedle vystavěného RD

Zdroj: [17]

Hadrian X pro svou práci potřebuje nejprve vytvořit 3D model objektu, dle kterého se vypočítá spotřeba materiálu. Celý model je pak nahrán do počítače robota, podle kterého se pak celý proces řídí a je tak schopen plně automatizovaně objekt vyzdít sám. Jedinou překážkou je, že robot potřebuje před začátkem a během zdění doplňovat palety s cihlami do zásobníku umístěného přímo v nákladním autě s robotem, tak jak je vidno na obr. č. 9. Uvnitř auta si pak dle potřeby cihly ořeže a dle potřeby zkrátí. Díky tomu se snižuje hluk a prašnost na staveništi.



Obr. č. 10 – Hadrian X, zásobování

Zdroj: [18]

Připravené cihly poté putují po výložníku umístěného na rameni ke koncové hlavě (viz obr. č. 10), kde je na ně aplikováno lepidlo na bázi polyuretanu. Po aplikaci lepidla jsou cihly pomocí laserového naváděcího systému a systému DST umístěny na požadované místo s přesností $\pm 0,5$ mm. Hadrian X používá pro zdění speciální zdící bloky optimalizované přímo pro robota. Tyto zdící bloky mohou mít rozměr až 500 x 250 x 250 mm a vážit 22 kg. Během zdění se primárně pohybuje pouze rameno s výložníkem, jen v případě velkých staveb se bude pohybovat i celé nákladní auto s robotickým systémem. [19]



Obr. č. 9 – Hadrian X, koncová hlava

Zdroj: [17]

Roboti pro omítání

Roboti pro omítání jsou také velkým tématem robotizace ve stavebnictví. Existuje několik robotů, kteří jsou schopni alespoň částečně nahradit lidskou práci, ať už to jsou projekty TUPO 9, OKIBO, omítač od firmy ACME Equipment, Morphaux nebo český projekt Omítkář of firem Modia a R.U.R.

OKIBO

OKIBO je izraelská firma, která vyvíjí mobilní, víceúčelové a autonomní roboty pro použití na staveništích. Prvním produktem firmy je robot pro omítání stěn a stropů, který bude využit ke zjednodušení a snížení nákladů provádění omítek, čímž se vyřeší obrovský nedostatek profesionálních pracovníků v tomto oboru. Tento projekt je již dotažen do komerční fáze a v blízké době by měl vstoupit na trh. Daný systém je nejpokročilejší a nejautonomnější z dostupných strojů na trhu. Robot je navržen pro drsné podmínky staveniště. Disponuje schopnostmi 3D skenování na přesnost 2-3 mm, počítačovým viděním, dosahem od podlahy ke stropu, autonomním pohybem na kolovém podvozku a agilním průmyslovým robotickým ramenem od firmy KUKA. Díky 3D skenování a počítačovému vidění bude robot schopen přesně určit prostor pro aplikaci, předem naplánovat pracovní dráhu a aplikovat materiál samostatně. Robotická ruka s velmi vysokou přesností vyměňuje aplikační pistoli za roztírací špachtli. V první fázi nanese pás omítací směsi na konstrukci, poté vymění pistoli za roztírací špachtli a špachtlí rozetře omítku do rovnoměrné perfektně rovné vrstvy. Před výměnou nástroje zpět na aplikační pistoli špachtli očistí od přebytečného materiálu. Robot je svým nástrojovým vybavením předurčen spíše k realizacím tenkovrstvých omítek na sádkartonové konstrukce či sádrových štuků. [20]

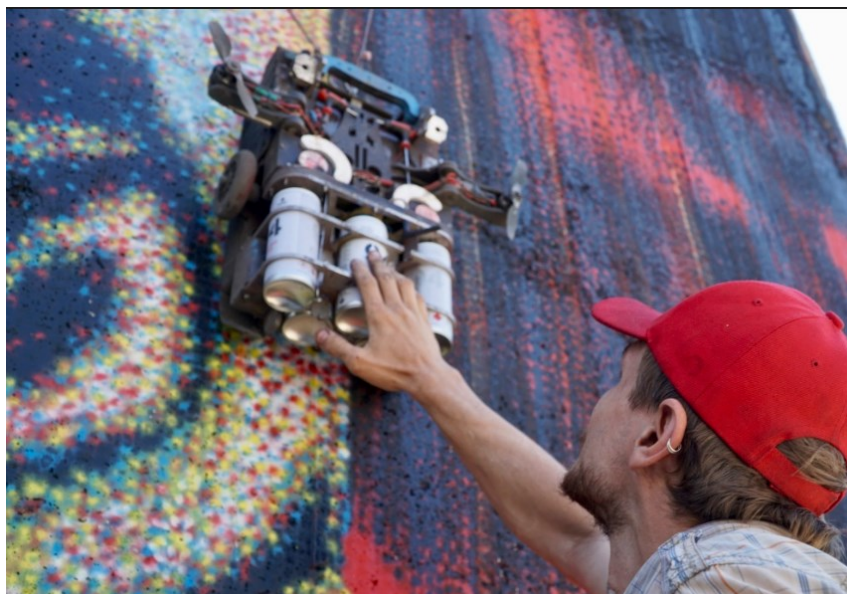


Obr. č. 11 – Omítací robot OKIBO

Zdroj: [21]

Roboti pro malby

Roboti pro malby jsou poměrně rozšířenými typy robotů určených pro výpomoc ve stavebnictví. Existuje několik prototypů robotů provádějících proces výmalby. Jsou řešeny na několika bázích. Existují roboti s pohyblivým ramenem, na kterém je stříkácí pistole, která stříká malbu na vybraný povrch. Dále existují šplhaví roboti, provádějící složitější obrazce, jedním z nich je Robot Muralist nebo typ pojízdného robota, který je stručně popsán níže, konkrétně robot pro malby na zdi MYRO. Samozřejmě, především kvůli velké podobnosti těchto procesů, spousta omítacích umí provádět i malby, např. výše popsáný OKIBO.



Obr. č. 12 – Robot pro malby Muralis

Zdroj: [21]

MYRO

MYRO je robot provádějící malby, který je projektem indické společnosti Eternal Robotics, která pracuje na vývoji a distribuci robotických produktů a automatizovaných řešení pro stavebnictví a lakování. MYRO je vnitřní lakovací robot, který je navržen tak, aby rychle, efektivně a bezpečně maloval holé prostory. I když není zcela autonomní, bere jednoduché příkazy z iPadu a dokáže provést pracovní příkaz na základě půdorysu. Při rozměrech přibližně 1,9 m x 0,7 m x 0,7 m a hmotnosti těsně pod 150 kg není MYRO zrovna domácí spotřebič. Jeho primárním cílovým trhem jsou však velké společnosti v oblasti stavebnictví, které provádí rozsáhlé stavby.

MYRO přebírá příkazy z aplikace založené na iPadu. V podstatě stačí jen sestavit půdorys, nastavit rozvrh práce a robot začne samostatně pracovat. Před začátkem práce si robot zkontroluje okolí pomocí kamer a senzorů a začne sprejovat prostor jednu stěnu po druhé. Postupuje tak, že nastříká jednu linii, posune se doprava nebo doleva a nastříká další linii a tak dále. Jeho výsuvný krk, na kterém je umístěna stříkácí pistole je schopný dosáhnou až výšky 3,1 m. Jakmile robot detekuje roh, sám se otočí a celý proces opakuje ve směru nové zdi. Z půdorysu

dokonce vytáhne okna, mezery, dveře a další plochy, které nejsou potřeba vybalovat a vynechá je. Při své nejvyšší rychlosti dokáže natírat povrchy rychlostí téměř 3,8 m²/min. [22]



Obr. č. 13 – Robot pro malby MYRO

Zdroj: [22]

Roboti pro obklady

I pro proces obkládání jsou vynalezeny roboti, kteří buď částečně nebo úplně zajišťují tuto činnost. Zastoupení není tak vysoké jako v prvních třech případech, přesto je v mé práci popsán jeden z robotů obkladačů.

Tento robot, vytvořený pro přemístění a uložení obkladů, je prací šestičlenného týmu technologů z Číny. Po dlouhé práci byl vyvinut prototyp robota, který je ověřován za simulačních podmínek a reálného provozu. Tento robot je vhodný spíše pro vnější obklady a izolace fasád především díky jeho velké velikosti. S takovými proporcemi je velice složité pohybovat se v menších objektech, a ještě

horší pohybovat se v malých místnostech, které jsou většinou nejčastěji obkládány. Z principu tohoto robota se dá vycházet i pro vnitřní obklady, avšak je nutné počítat se zvýšenou obratností a sníženou velikostí. [23]



Obr. č. 14 – Robot pro obklady

Zdroj: [23]

2 Současný stav provádění vybraných stavebních činností

2.1 Technologie zdění

Zdící materiály patří mezi nejpoužívanější prvky pro realizaci nosných i nenosných zdí v budovách. Každý typ zdícího materiálu má trochu jiné vlastnosti a je výhodnější v jiném směru než jiný materiál. Mezi nejčastější zástupce zdících materiálů patří keramické bloky, pórobetonové bloky a vápenopískové bloky.

Historie vyzdívacích prvků sahá až do starověku, kdy byly objeveny nejstarší pálené cihly v okolí řeky Jordán. Objev hlíny, sestavení pecí pro její vypálení a možnost hlínu upravit do tvaru kvádrů cihlu posunul na nejjednodušší prvek k výstavbě. Vývoj cihly se od starověku nijak nezastavil, právě naopak, začala se využívat ve větším měřítku a je užívána až dodnes. Největší zlom přišel v 19. století, kdy se cihlářství přetransformovalo z ruční výroby do výroby průmyslové a cihla se tak začala používat k výstavbě prakticky všech typů staveb. [25]

Dle stavebního řádu v roce 1886 byla nejnižší možná tloušťka obvodového zdiva stanovena na 450 mm, což vedlo cihláře k nastavení násobku nebo zlomku modulu 150 mm. Skladebný rozměr plné cihly byl tedy 300 mm x 150 mm x 75 mm, jmenovitý rozměr byl pak o 10 mm menší. S postupným vývojem stavebnictví se zvedaly i požadavky na zdící materiály. Začaly se více řešit požadavky nejen na pevnost či trvanlivost zdících prvků, ale také požadavky na tepelný odpor, akustickou neprůzvučnost, požární odolnost a rozměrovou přesnost. Skladebné rozměry děrovaných cihel uváděných do výroby v posledních letech jsou násobky nebo zlomky základního modulu 100 mm. Výrobní rozměry děrovaných cihel se odvozují od skladebných rozměrů s přihlédnutím k tloušťkám ložných a styčných spár. Výrobní rozměry jsou menší než skladebné rozměry i tehdy, když se zdící prvky lepí (tzv. nulové ložné spáry).

V návaznosti na zvýšené požadavky na estetiku, a především snížení tepelných mostů se častěji užívá technologie tzv. přesného zdění. U této technologie se u vysušených nebo vypálených cihelných tvarovek zabrušují jejich spodní a horní ložné plochy a díky tomu je možné se snížit tloušťku pojiva. Tradiční tloušťka ložných spár zděné konstrukce je 10 až 12 mm při použití obyčejné nebo lehké malty.

Pro přesné zdění je možné použít maltu pro zdění tenké spáry tloušťky 1 až 3 mm. Tenká vrstva malty či lepidla se nanáší buď na žebra vnitřní i obvodová v tloušťce 1 mm nebo celoplošně v tloušťce 3 mm pomocí nanášecího válce. Nejnověji se lepení provádí pomocí polyuretanové pěny nanášené pouze ve dvou pruzích v ložné spáře. [26]

Druhy zdiva:

- Pálené zdicí prvky
- Vápenopískové zdicí prvky
- Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem
- Pórobetonové tvárnice
- Zdicí prvky z umělého kamene
- Zdicí prvky z přírodního kamene [27]

Existuje více druhů zdiva a každý má trochu odlišný stavební postup. V této práci bude popsán pouze jeden postup jednoho z nejtypičtějších zástupců zdiva, konkrétně pracovní postup zdění z pórobetonových bloků.

Prvním krokem je bezchybné provedení hydroizolace. Poté vyměříme přesné rozměry půdorysu a provedeme kontrolu rovinnosti základové desky, která musí splňovat výškovou toleranci max. ± 25 mm. Jako první se pokládá tvárnice v nejvyšším rohu základové desky, pery k vnějšímu líci. Tvárnice je osazena na zakládací tepelněizolační maltu, která se nachází v celé ploše tvárnice v tloušťce min. 10 mm. Tloušťka malty se může měnit v návaznosti na úpravu rovinnosti, avšak minimální tloušťka musí zůstat. Položenou tvárnici poklepeme gumovou palicí pro lepší stabilitu. Pokračujeme všemi rohy budoucího objektu a poté zkontrolujeme jejich výšku, ideálně pomocí nivelačního přístroje nebo rotačního laseru.



Obr. č. 15 – Osazení prvního rohu

Zdroj: [28]

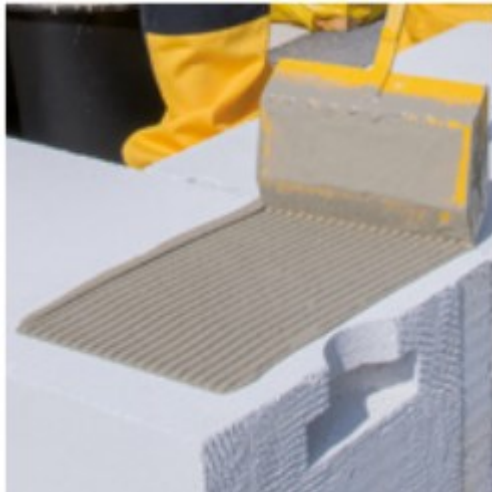


Obr. č. 16 – Kontrola výšky

Zdroj: [28]

Mezi rohové tvárnice se natáhne zednická šňůra, pomocí které se zakládá celá první řada. První řadu tvárníc nosného zdiva pokládáme na tepelněizolační základací maltu. Během této činnosti dochází ke kontrole rovinnosti vodováhou, případně latí minimální délky 1 m. Další řady se zdí vždy od rohů tak, jak tomu bylo i v případě první řady. Před nanesením vrstvy malty se povrch předchozí řady očistí od prachu a nečistot, poté se nanese malta a do maltového lože se pokládají jednotlivé bloky. Každá řada je zděna podle důkladně napnuté zednické šňůry. Přesné osazení tvárnice musí být neustále kontrolováno vodováhou a případné výškové nerovnosti mohou být zarovnány hoblíkem. Velkou výhodou pórobetonových bloků je, že není nutné držet délkové modulace. Tvárnice se vždy dají lehce seříznout na požadovaný rozměr.

Zdicí malta je nanášena pomocí zednické lžíce, s výškou zubu 5 mm. Malta je nanášena po celé ploše zdiva. Nanášíme rýhy hřebene rovnoběžně se stěnou. Pro stabilitu a správné fungování budoucí zdi je nutné dodržovat vazbu zdiva. Svislé přesahy tvárnice musí být minimálně 100 mm.



Obr. č. 18 – Nanášení maltového lože

Zdroj: [28]



Obr. č. 17 – Kontrola správné vazby

Zdroj: [28]

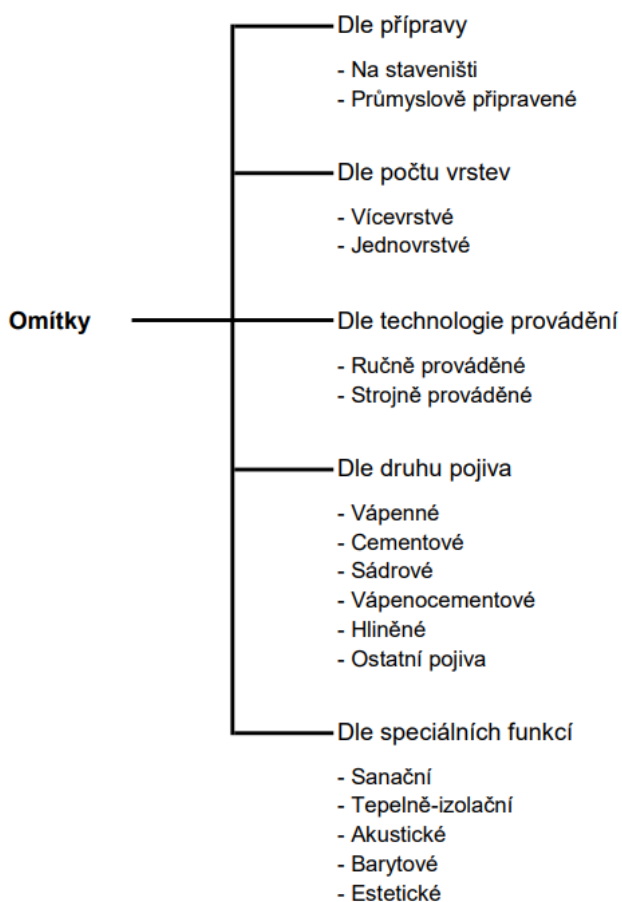
V případě použití hladkých tvárnic, které nemají pero a drážku, je nutné maltu nanášet i na svislou stěnu tvárnic (styčné plochy). Nanesení na svislou stěnu tvárnic je prováděno i u tvárnic pero drážka v napojení rohů a doplnění dořezů, tzn. vždy když není spoj pero drážka. Tvárnice klademe co nejtěsněji k sobě, aby vodorovným posouváním po maltě nedošlo k jejímu nahrnutí do svislé spáry a vzniku mezery bez malty. Maltu, která vyteče ze spáry není možné rozmazávat po zdivu, ale naopak ji seškrábeme zednickou lžící nebo ji po jejím vytvrzení zbrousíme či oklepeme. V případě budoucích otvorů je možné tvárnici jednoduše zaříznout na požadovanou délku, a tím vytvořit hladké ostění bez drážek a kapes. [28]

2.2 Technologie provádění omítek

Omítka je finální vrstva konstrukcí stěn, sloupů a stropů. Hlavní funkcí omítky je estetická, ale také zlepšuje vlastnosti omítaného povrchu. Maltová směs, která je základem omítky, je složena ze tří hlavních částí, konkrétně z plniva, pojiva a případně dalších přísad, které ovlivňují její vlastnosti. Mezi plniva řadíme písek, kamennou moučku či expandovaný perlit a mezi pojiva patří např. vápno, cement či sádra. Jednotlivé přísady pak ovlivňují vlastnosti jako je plasticita, pevnost, protipožární odolnost, tepelně izolační vlastnosti a další. Omítková směs je smíchána v předepsaném poměru s vodou a vzniká tekutá či polotekutá až kašovitá směs, jejíž

tuhnutí je zajištěno chemickou reakcí a vysycháním trvajícím několik dnů. Je důležité dbát na to, že provádění omítek je mokrý proces, tedy je potřeba tomu uzpůsobit staveniště, jelikož uvolňovaná voda může ovlivnit ostatní konstrukce.

Omítky můžeme dělit podle několika kritérií:



[29], [30]

V rámci zaměření budoucího robota řešeného v této práci bude popsána pouze technologie provádění vnitřních omítek. Vnitřní omítky jsou prováděny v 6. technologické etapě – omítky a potěry. Prvním krokem před započítím omítacích prací je ošetření podkladu. Podklad se ošetřuje v případech, kdy je nasákavost podkladu příliš vysoká nebo naopak příliš nízká, když se podklad drolí nebo je příliš hladký, když je požadována vyšší přilnavost omítky k podkladu nebo pokud podklad vykazuje růst organismů nebo výkvěty. Toto ošetření se provádí často cementovým postřikem, ten zabraňuje možnosti odsátí vody z omítky a umožňuje lepší soudržnost s podkladem. Pokud jsou omítky prováděny ručním způsobem, tak se v dalším kroku

osadí omítníky v omítané ploše na vzdálenost 1,2 m až 1,5 m a následuje proces omítání. Po dokončení strhávání omítky se vyčistí instalační otvory v omítnících a omítník se důkladně omyje a očistí.



Obr. č. 19 – Osazení omítníků

Zdroj: [31]



Obr. č. 20 – Strhávání omítky

Zdroj: [31]

Při strojní aplikaci omítek je realizace trochu rozdílná, pro znázornění bude popsán proces strojního provádění sádrových omítek. Povrchy stěn a stropů musí být před prováděním opatřeny penetrací, která zajišťuje lepší přilnavost omítek. Aplikují se s využitím omítací pistole, pomocí níž se omítka nanáší shora dolů v pásech cca po jednom metru. Omítková vrstva se srovná pomocí 2 m latě, popř. při vzniku značnějších nerovností dochází k doplnění nástřikem, po kterém následuje celkové srovnání omítky 2 m latí.



Obr. č. 22 – Nanášení omítky pomocí omítací pistole

Zdroj: [31]



Obr. č. 21 – Hrubé srovnání omítky pomocí 2 m latě

Zdroj: [31]

Po krátké technologické přestávce se povrch navlhčí rozprašující pistolí a následně hladí pomocí filcového hladítka na násadě. Finální úprava je pak prováděna pomocí ocelového hladítka. Vyhlazení probíhá v pruzích od jednoho rohu ke druhému bez přerušení. [31]



Obr. č. 23 – Hlazení pomocí filcového hladítka

Zdroj: [31]



Obr. č. 24 – Finální úprava omítky pomocí ocelového hladítka

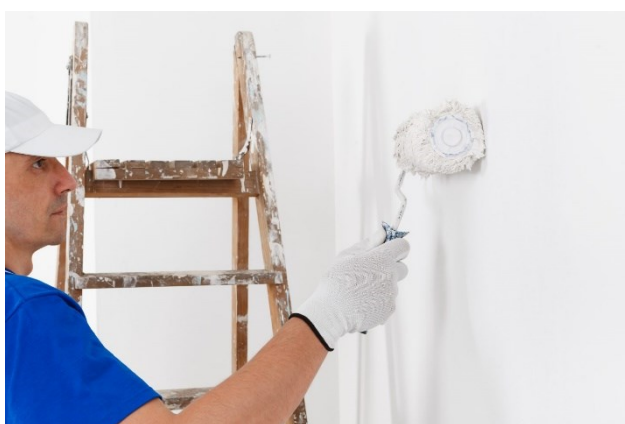
Zdroj: [31]

2.3 Technologie provádění maleb

Úprava vnitřních povrchů stavebních konstrukcí malováním plní z pravidla dvě základní funkce – estetickou a ochranou. Estetickou především díky vhodnému výběru barvy do různých typů místností dle jejich využití a tím vytváření příjemných podmínek pro pobyt člověka v interiéru budovy. Ochranná funkce maleb především působí proti působení škodlivých vlivů vnitřního klimatu v budovách. Malířské práce jsou tvořeny souborem dílčích procesů, konkrétně přípravných (úprava podkladu, příprava hmot a ev. strojního zařízení), pomocných (ev. stavba lešení, pomocných lávek, čištění) a hlavních (nanášení různých druhů maleb a malířských úprav). Malířské barvy jsou složeny ze tří základních surovin, plniv, pojiv a barviv. Zástupci plniv jsou většinou malířská hlínka, kaolín, plavená křída, pojiva jsou minerální nebo organická. Pojiva mají rozhodující vliv na jakost a trvanlivost malby.

Plynulý průběh malířských prací vyžaduje, aby objekt byl v potřebném stupni stavební dokončenosti a aby pracoviště malířů bylo řádně připraveno. Ve všech prostorách budovy, které se budou malovat, by měly být osazeny dveřní zárubně a dokončeny omítky, obklady a dlažby i s potřebným začištěním omítek, dokončeny veškeré rozvody a instalace, hotovy podlahy, osazeny truhlářské i zámečnické výrobky, a především musí být dokonale vyschlé a čisté omítky. Budova má být uzavřena a dobře větrána. Vnitřní prostory se vytápějí minimálně na +5 °C. Tento teplotní limit se udržuje po celou dobu provádění a vysychání malířských úprav.

Druh podkladu a jeho úprava mají zásadní vliv na výslednou jakost malby. Podkladem bývají nejčastěji omítky různého druhu a složení. Jelikož omítané povrchy většinou nejsou bezprostředně vhodné pro malování, často je vyžadována další úprava. Například vápenné omítky se po řádném zatvrdnutí a vyschnutí vybrousí pemzou a případně větší hrbolky se odstraní ocelovou stěrkou. Pak se opráší a natrou řídkým vápenným mlékem, aby se řádně vyplnily póry a trhlinky v omítce, sádrové omítky se upravují až když jsou úplně suché. Vybrousí se jemným skelným papírem a napouští se horkou fermeží. Pak se všechny trhlinky vyrovnají lakovým tmelem a udělá se druhý nátěr fermežovou barvou bílou, která chrání sádrovou omítku před zvětráním. Tyto úpravy se provádí individuálně pro každou povrchovou úpravu.



Obr. č. 25 – Ruční provádění maleb

Zdroj: [32]



Obr. č. 26 – Strojní provádění maleb

Zdroj: [33]

Malby stěn a stropů se obvykle provádí ve dvou vrstvách. Jednotlivé vrstvy malby se nanášejí ručně nebo mechanizovaně. Povětšinou se na stavbách malířské hmoty natírají štětkou a štětce, nanášejí válečkem či stříkají pistolí. První se provádí stropy, až po nich stěny. Nejvhodnější způsob se volí především podle druhu používaných malířských hmot a podle kvalitativních požadavků na malbu. Pracnější způsob, tedy nanášení barvy štětkou je trvanlivější, a to hlavně proto, že se při něm barva na povrchu omítky řádně roztírá a lépe se s omítkou spojuje. Naproti tomu mechanizované stříkání barvy svádí mnohdy k zanedbání řádného očištění povrchu, takže nastříkaná vrstva barvy nepřilne dokonale k povrchu omítky, snadněji se otírá a odlupuje. Při malování stěn štětkou se vždy postupuje od stropů k podlaze. Válečkování nahrazuje natírání barvy štětkou na jednoduchých a hladkých plochách stěn i stropů. Stříkáním se upravená malířská barva rovnoměrně rozprašuje na povrch omítky, a to buď ručním stříkáním pomocí tlakové nádoby a nanášecí trysky nebo mechanizovaně pomocí speciálního čerpadla, nízkotlakých stříkacích zařízení nebo vysokotlakých bezvzduchových stříkacích agregátů, které jsou určeny pro rozsáhlé malířské práce. Vysokotlaké stříkací zařízení dosahují teoretického množství nástřiku malby 2,0 až 4,0 l/min podle typu zařízení, což činí asi 12 až 24 m² jednovrstvé malby. [34]

2.4 Technologie provádění obkladů

Obklady jsou úpravy povrchů vnitřních a vnějších povrchů stěn obkladačkami, deskami nebo fóliemi. Dle použitého materiálu se dále dělí na obklady keramické, ze skla, z přírodního kamene, z plastů, dřevěné, kovové a z vláknocementového materiálu. Vnitřní obklad je nejčastěji využíván v koupelnách a kuchyních, případně v prostorech, kde hrozí časté zašpinění. Vnitřní obklady zlepšují hygienu prostorů, tepelný odpor stěn, zvukovou neprůzvučnost a také plní estetickou funkci. Vnější obklady plní zpravidla estetickou funkci, zlepšují odolnost stěn proti mechanickému poškození a prodlužují celkovou životnost povrchu. Jako vnější obklady se zpravidla používá keramika s tvrdým stěpem, kamenem a další. [35]

Mezi nejnütnější podmínky správně provedených obkladů patří vysoká kvalita jednotlivých obkladových materiálů, vhodně zvolené lepidlo a dokonale provedené spárování. Celý proces je zároveň značně ovlivňován kvalitou a stavem podkladu. Než se rozhodneme položit nový obklad, je nejprve nutné diagnostikovat podklad. [36]

Stavební připravenost před zahájením obkládacích prací musí splňovat dokončenost instalačních rozvodů, které často skrz obklady prochází, kompletnost předstěnových nosných systémů záchodů, bidetů, pisoárů a dalších a musí být provedeny omítky, mazaniny, osazeny zárubně a okna. Zároveň musí být ve všech obkládaných prostorách vyznačen váhorys, u vnějších obkladů vyznačena úroveň budoucího chodníku a vstupu. Obkládaný podklad musí vykazovat objemovou stálost, vyzrállost, rovnovážnou vlhkost, únosnost a pevnost podkladové vrstvy, rovinnost ± 2 mm na 2 m délky, podklad musí být čistý, eventuelně se musí ošetřit. Kromě připravenosti podkladu je nutné zkontrolovat také obklad samotný, zda není poškozen, jedná se o správné obkladačky, zda sedí barevné kombinace či rozměry.

Po důkladné kontrole začíná obkládání, existují tři metody: buttering, floating a floating a buttering. Buttering znamená metodu nanášení lepidla na zadní stěnu obkladu těsně před obkládáním, floating znamená metodu nanášení lepidla na podklad těsně před obkládáním a floating a buttering je, jak už z názvu vyplývá, kombinací těchto dvou metod. Tedy oboustranné nanášení lepidla, jak na podklad, tak i na obkladačku. [37]

Po rozmíchání lepidla se ponechá lepidlo odstát přibližně 5 až 15 minut a poté se znovu promíchá. Po důkladném změřením obkládaného prostoru začíná lepení. Začíná se od spodních řad směrem nahoru. Podle způsobu obkládání je nutné nanést lepidlo a rozetřít ho ozubenou stěrkou. Při obkládání interiéru musí být lepidlem pokryto minimálně 60 % plochy obkladačky, v exteriéru je nutno obkladačku opatřit lepícím tmelem celoplošně. Dlaždice jsou přikládány celou plochou na rovnoměrnou plochu lepidla a připevňovány sponami. Po umístění každé kachličky je dobré zkontrolovat vodováhou rovnost. Po dokončení obkladu přichází čas čištění. Dokud je lepidlo čerstvé, je i snadno odstranitelné pomocí vlhké houbičky. Je nutné obklad očistit důkladně, protože po zaschnutí lepidla je další čištění velice obtížné.

Po dokončení čistících prací dochází k technologické přestávce minimálně 24 hodin. Po této technologické přestávce začíná spárování. Spárovací tmel se nanáší gumovou stěrkou na obklad se snahou zanést ji do všech spár. [38]



Obr. č. 28 – Proces obkládání metodou floating

Zdroj: [39]

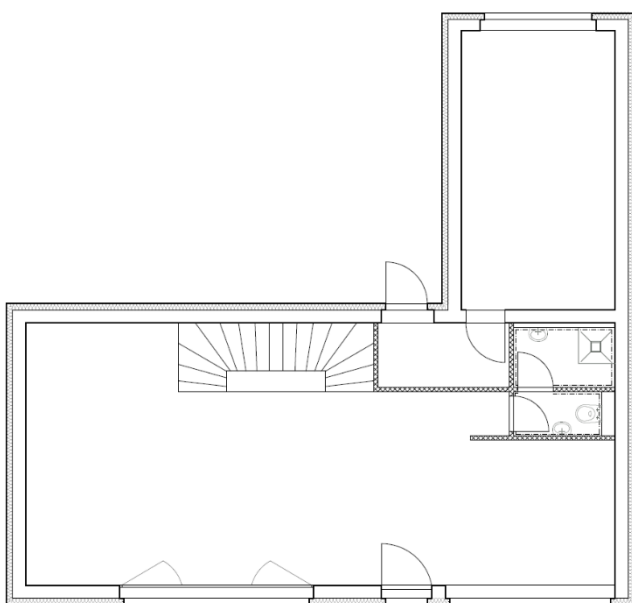


Obr. č. 27 – Obkladové dlaždice připevněné sponami

Zdroj: [38]

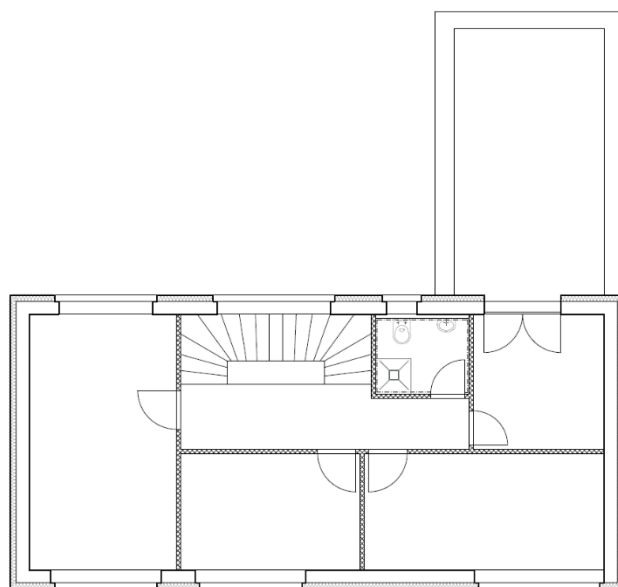
3 Aplikace na praktickém příkladu

Vybrané stavební práce budou aplikovány na příkladu typického rodinného domu, který má stěnový konstrukční systém a dvě podlaží. Zastavěná plocha domu činí 128,75 m² a obestavěný prostor je 748,68 m³. První nadzemní podlaží je o 29,4 m² větší, jelikož je jeho součástí garáž, jejíž strop tvoří ve druhém nadzemím podlaží terasu. V 1.NP se nachází prostorný obývací pokoj, který tvoří jednu velkou místnost společně se vstupní halou a kuchyní. V 1.NP nechybí ani WC a koupelna a předsíň, která spojuje vedlejší vstup do domu, vstup do garáže a obytnou část. Posledním prvkem v prvním podlaží je schodiště do druhého nadzemního patra. Schodiště vede do chodby, ze které se dá přímo vejít do ložnice, tří pokojů a do koupelny. Z jednoho z pokojů vedou dveře na již zmíněnou terasu.



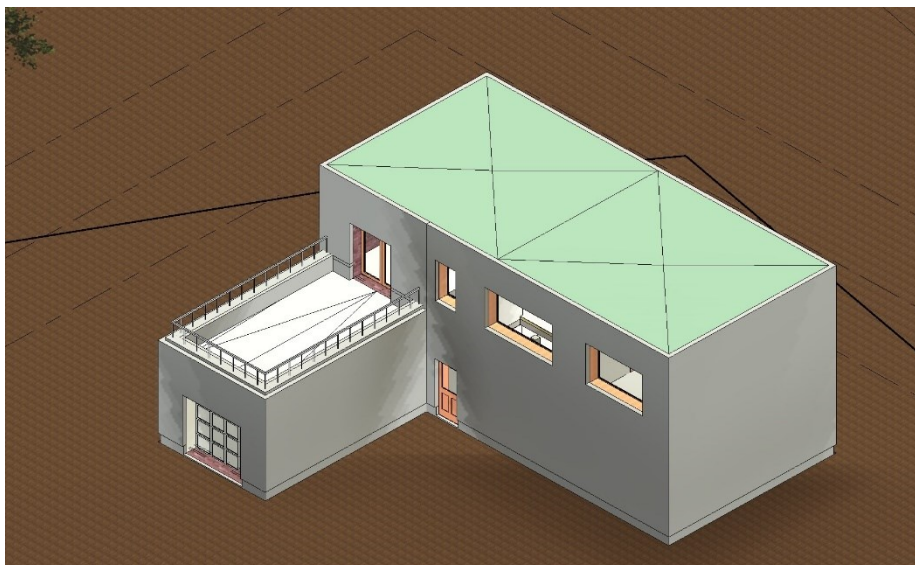
Obr. č. 29 – Půdorys prvního patra řešeného rodinného domu

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 30 – Půdorys druhého patra řešeného rodinného domu

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 31 – Vizualizace řešeného rodinného domu

Zdroj: vlastní výroba

Pro řešený dům byl vypočítán výkaz výměr, ve kterém jsou zahrnuty položky, které budou potřebné pro další fáze této práce. Tento výkaz výměr je přiložen jako tabulka č. 3.

Tabulka č. 3 – Výkaz výměr řešeného domu

Výkaz výměr vybraného rodinného domu			
Pol. č.	Popis položky	M.j.	Množství
1	Svislé konstrukce		
	Zdivo tl. 300 mm	m ²	192,81
	Zdivo tl. 100 mm	m ²	91,83
2	Povrchové úpravy		
	Vnitřní omítky (pouze stěny)	m ²	379,24
	Malby (stěny i stropy)	m ²	520,55
	Obklady	m ²	31,21

3.1 Analýza ručního a robotického procesu zdění

3.1.1 Ruční způsob provádění

Řešený rodinný dům je vystavěn z obvodového zdiva o celkové ploše 192,81 m². Příčkové zdivo je zastoupeno v ploše 91,83 m². Z těchto dat vyplývá, že četa dvou zedníků by tento dům vystavěla v celkovém čase 124,8 hodin (viz tabulka č. 4). Hodnoty pro normovou pracnost jsou brány z databáze činností Contec [40] a dny jsou vztahovány na osmihodinovou pracovní dobu.

Tabulka č. 4 – Výpočet doby trvání zdění člověkem

	Měrná jednotka	Množství [m.j.]	Norma času [Nh.mj. ⁻¹]	Pracnost normová [Nh]	Počet pracovníků	Doba trvání dílčího stavebního procesu [hod]	Doba trvání dílčího stavebního procesu [dny]
Obvodové zdivo	m ²	192,81	0,98	188,954	2	94,5	11,8
Příčky	m ²	91,83	0,66	60,61	2	30,3	3,8
Celkem:						124,8	15,6

3.1.2 Robotický způsob provádění

Zdění nosných i nenosných stěn prováděných lidskou pracovní silou je porovnáváno s Autonomním robotickým stavebním systémem, který byl navržen a spravován velkou mírou na Fakultě stavební ČVUT, konkrétně na Katedře technologií staveb. Základem pro tento robotický systém je robot KUKA KR 120 R3900 ultra K, jehož základní parametry jsou sepsány v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5 – Technická data zdícího robota

Technická data zdícího robota KR 120 R3900 ultra K	
Maximální dosah	3901 mm
Jmenovité užitečné zatížení	120 kg
Jmenovité celkové zatížení	170 kg
Maximální zatížení na konci ramene	50 kg
Počet os	6
Velikost podstavce	830 mm x 830 mm
Výška robota	1940 mm - 3740 mm
Hmotnost robota	1221 kg

Celý proces robotického zdění začíná modelováním BIM projektu, ve kterém jsou definovány veškeré parametry budoucího vyzdívaného objektu, mezi které patří objem zdiva, zastavěná plocha objektu, doba výstavby či údaje o zahájení. Obsahuje také informace o modelu, tedy o jakého robota se jedná a co za výstavbový materiál a lepidlo bude použito. Ke každému použitému materiálu jsou zaznamenány základní informace, konkrétně rozměry, hmotnost, ale i velikost a hmotnost balení. Paleta musí být uspořádána na přesně definovaném místě, aby z ní mohl robot bez problémů odebírat cihlu za cihlou a dále zdít. Po definování všech informací k objektu a jednotlivým materiálům začíná samotný proces zdění. Ten funguje na neustále opakujícím se cyklu, kdy robotické rameno uchopí cihlu, kterou přesune do kalibračního zařízení, čímž je umožněno to, že každá cihla bude držena a položena stejným způsobem. Následuje přesun na místo určení, kde je cihla položena do lepidla. Po vyzdění jedné řady se nanáší lepidlo na celou řadu a poté cyklus pokračuje do vystavění celého patra.



Obr. č. 32 – Proces zdění pomocí zdícího robota

Zdroj: [41]

Norma času zdění robota byla počítána na základě časového snímku pracovního cyklu robota, který jsem měl pro tuto práci k dispozici. Pracovní cyklus robotické ruky byl rozdělen na jednotlivé fáze, u kterých byla změřena průměrná doba trvání daného cyklu v sekundách a výsledné časy byly zapsány do tabulky č. 6.

Tabulka č. 6 – Výpočet jednoho cyklu zdícího robota

Pořadí	Označení	Popis fáze	Doba trvání
1	t_1	Uchycení cihly na zásobovací paletě	13,32 s
2	t_2	Zásobovací paleta -> kalibrační zařízení	21,72 s
3	t_3	Uchycení cihly v kalibračním zařízení	10,22 s
4	t_4	Kalibrační zařízení -> místo umístění	30,11 s
5	t_5	Přesné umístění cihly	8,03 s
6	t_6	Návrat do výchozí pozice	27,01 s
Celkem:			110,41 s

Je nutné zmínit, že robotické rameno nebylo, v rámci bezpečnosti a nízkých zkušeností týmu s daným strojem, spuštěno na maximální rychlost. Po dokončení každé řady je nutné nanést maltu či lepidlo. V našem případě nanášíme lepidlo, jehož průměrná doba nanášení na jednu řadu zdiva trvá přibližně 75 s.

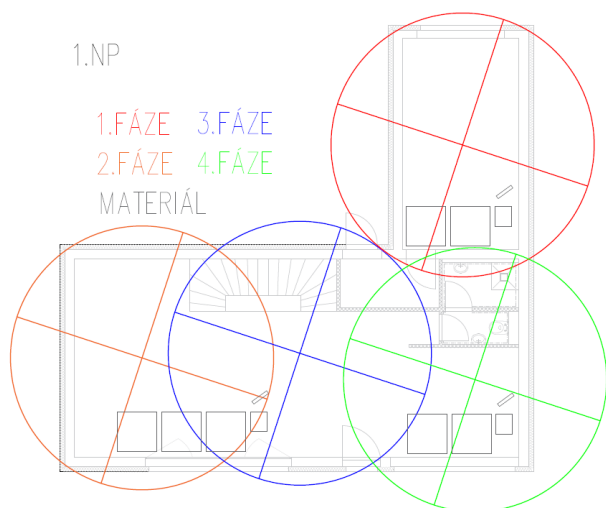
Při velikosti bloku 600 mm x 300 mm x 250 mm (Ytong Standard 300) je plocha bloku 0,6 m x 0,25 m = 0,15 m², a tedy počet bloků, které se vejdou na 1 m² je 6,67 (1/0,15). Normová pracnost zdění je počítána dle rovnice:

$$\frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6) * 6,67}{3600} = 0,082 \text{ hod/m}^2$$

Na výšku jednoho vyzdívaného podlaží 2,75 m je potřeba 11 řad lepidla, tedy k celkovému času zdění musíme připočít ještě dvaadvacetkrát nanesení lepidla. Dále je nutné připočít další časové údaje, které jsou spojeny s robotickým zděním, jako je čas na přesun a čištění robota. Při dosahu robotického ramene 3,9 m, je nutné pro námi používaného robota, který je statický, vybrat 7 přesných pozic, ze kterých bude vybraný rodinný dům vyzdívat. Čtyři pozice pro první nadzemní podlaží a tři pozice pro druhé nadzemní podlaží. Je samozřejmé, že se společně s robotem bude přesouvat i materiál, kterým je robot zásobován a další potřebné látky pro zdění. Tento přesun bude vykonáván jeřábem. Informace o počtu míst, na kterých bude statický robot umístěn jsou zakresleny v obrázcích níže. Počet přesunů robota hraje velkou roli při celkovém času, za který bude robot schopný objekt vyzdít, jelikož každý přesun robota z místa na jiné místo trvá přibližně 50 minut. Postup jednotlivých prací zdícího robota a doby, za které jednotlivé úkony vykoná jsou shrnuty v tabulce č. 7.

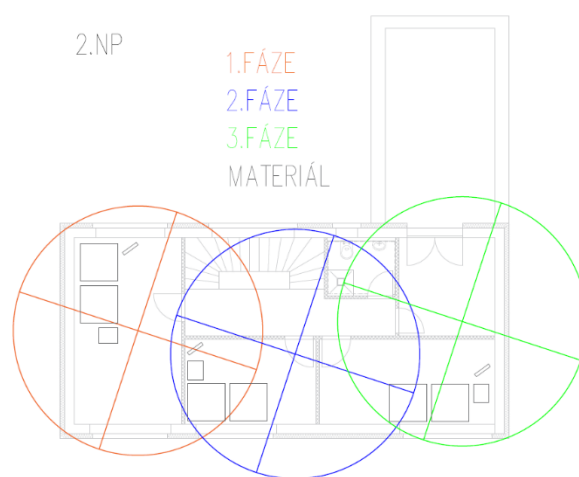
Tabulka č. 7 – Proces zdění robotem a doba výstavby

Pořadí	Pracovní činnost	Doba provádění [hod]
1	Příprava staveniště a přeprava robota	3,00
2	Montáž, kalibrace, demontáž a přesun robota (celkem 7x)	7,00
3	Zdění obvodového zdiva	80,97
4	Nanášení lepidla na ložné spáry obv. zdiva	0,50
5	Ruční kotvení příček do nosného zdiva	6,00
6	Zdění příčkového zdiva	18,37
7	Nanášení lepidla na ložné spáry příč. zdiva	0,99
8	Vyčištění a odvoz robota	2,00
Celkem:		118,82



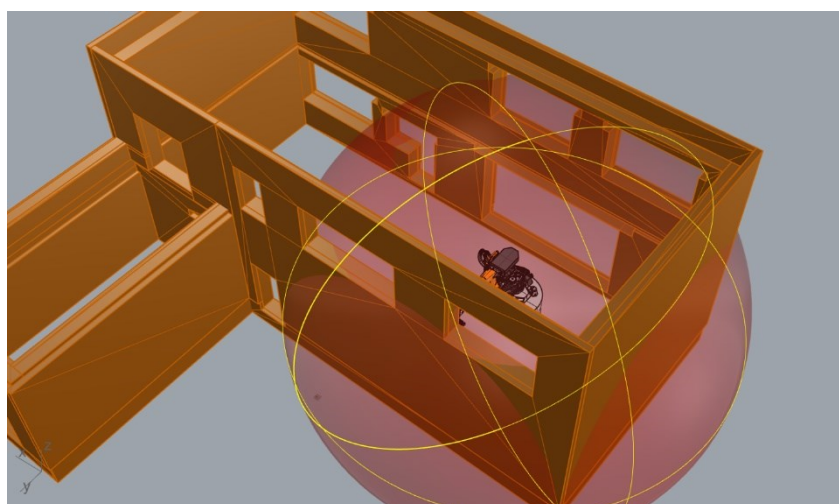
Obr. č. 34 – Pozice zdícího robota 1.NP

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 33 – Pozice zdícího robota 2.NP

Zdroj: vlastní výroba

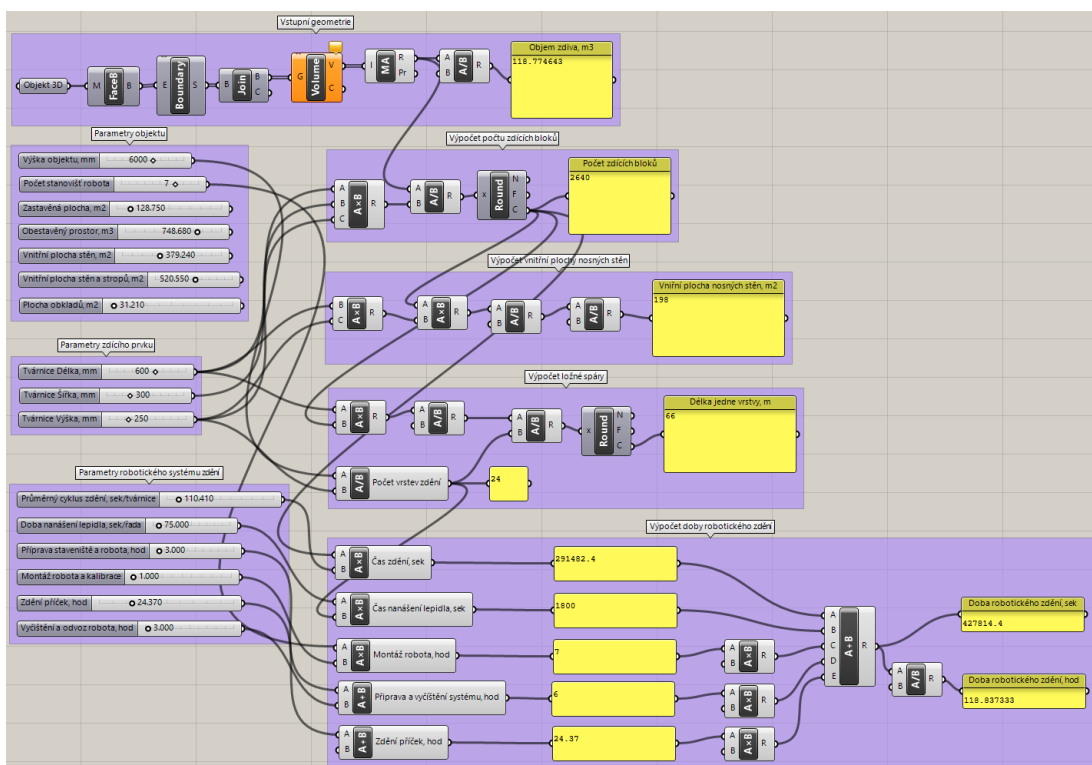


Obr. č. 35 – Dosah robota ve 3D zobrazení

Zdroj: vlastní výroba

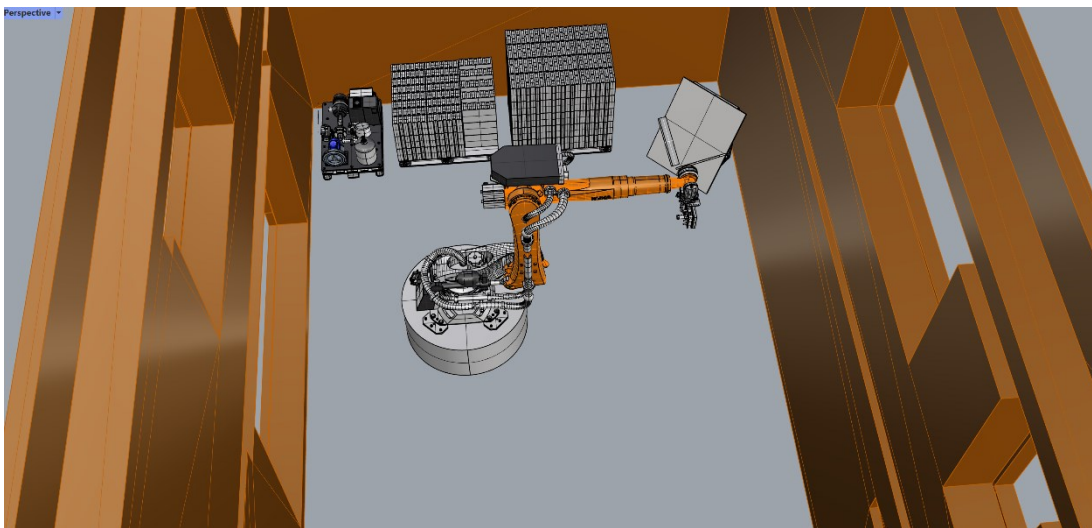
Veškeré časy, které jsou uváděny v předchozích tabulkách, byly měřeny v souvislosti s projektem TAČR, ve kterém byla vyvíjena nová technologie výstavby hrubé stavby pomocí Autonomního robotického stavebního systému. Z tohoto projektu bylo získáno velké množství informací, které byly využívány pro tuto práci. Především byla provedena důkladná analýza foto a video dokumentů, které byly získány přímo na místě robotické výstavby. Také bylo pracováno s časosběrem, který byl pořizován během výstavby.

Pro verifikaci správnosti výpočtů a měření byl vytvořen virtuální model zdícího robota v programech Rhinoceros a Grasshoper. Po zadání základních údajů, jako jsou např. rozměry objektu, počet pozic robota, rozměry zdícího prvku či časy strávené přípravou a úklidem staveniště byla dle těchto informací vypočtena celková doba robotického zdění. Při porovnání reálného měření časů měřených na staveništi a výpočtů času virtuálního modelu robota vyšly velmi podobné výsledky. Postup výpočtu výsledného času je zobrazen na obr. č. 36.



Obr. č. 36 – Výpočet zdění robotem pomocí výpočetního modelu

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 37 – Virtuální model zdícího robota

Zdroj: vlastní výroba

Při porovnání výsledných časů pro ruční zdění vybraného objektu a robotického zdění stejného objektu můžeme vidět, že zdění robotem a zdění četou o dvou zednících je svou rychlostí provádění velice podobný.

Požadavky pro nejefektivnější využití robotické technologie zdění

- Pro jeho přepravu je nutný jeřáb
- Velmi vysoká hmotnost (1,2 t) a tím i velké bodové zatížení – je potřeba udělat statické posouzení stropní konstrukce a případné opatření
- Minimální dosah 3,9 m, poté by byla vysoká náročnost zdění vyšších řad zdiva a časté přesuny robota
- Minimální hmotnost zatížení na konci ramene 25 kg, avšak čím více, tím větší výhoda oproti člověku – možnost zdění z velkoformátových bloků a tím zvýšení rychlosti zdění
- Nutnost upevnění druhé hlavice pro nanášení lepidla
- Možnost připojení se na třífázové vedení pro odběr elektřiny 400 V
- Četa minimálně dvou pracovníků – obsluha robota a pomocný dělník

3.2 Analýza ručního a robotického procesu omítání

3.2.1 Ruční způsob provádění

Proces omítání bude počítán prakticky stejně jako tomu bylo v případě zdění. Porovnávána bude četa dvou omítačů, kteří omítky provádí strojním způsobem s normou času 0,24 Nh/m² s robotem zvaným „Omítkář“. Celková plocha omítaných prostorů činí 379,24 m² a celkový čas omítání je 45,5 hodin.

Tabulka č. 8 – Výpočet doby trvání omítání člověkem

	Měrná jednotka	Množství [m.j.]	Norma času [Nh.mj. ⁻¹]	Pracnost normová [Nh]	Počet pracovníků	Doba trvání dílčího stavebního procesu [hod]	Doba trvání dílčího stavebního procesu [dny]
Omítání stěn	m ²	379,24	0,24	91,02	2	45,5	5,7
Celkem:						45,5	5,7

3.2.2 Robotický způsob provádění

Strojní způsob provádění omítek je porovnáván s robotickým nanášením, které je zajištěno pomocí robota „Omítkář“, což je český projekt firem Modia a R.U.R. Czech.

Proces omítání začíná tím, že je robot dopraven ke zdi pomocí dálkového ovládání. Do ovládacího tabletu se zapíše vstupní údaje, mezi které patří výška záběru, tloušťka omítky, šířka omítané plochy a mód omítání (přesná svislost či kopírování povrchu). Robot si poté naskenuje omítaný povrch a zjistí nejbližší bod od kterého bude počítat tloušťku omítky. Technické parametry tohoto robota lze najít v tabulce č. 9.

Tabulka č. 9 – Technická data omítacího robota

Technická data omítacího robota Omítkář	
Maximální dosah do výšky	3000 mm
Maximální šířka jednoho záběru	600 mm
Počet nanášecích trysek	12
Velikost podstavce	1220 mm x 780 mm
Hmotnost robota	450 kg

Nanášení probíhá ve dvou záběrech pomocí 60 cm širokého railu s dvanácti tryskami. Záběr vždy začíná pohybem od spodu nahoru a poté se vrací do spodní polohy. Tento cyklus trvá pro 2,6 m vysokou stěnu přibližně 78 s. Následné stírání již probíhá jedním záběrem celým 120 cm širokým nástavcem s lištami a trvá také přibližně 78 s. Přejetí do polohy pro druhý pás omítání trvá 10 s.



Obr. č. 38 – Nanášení malty pomocí robota "Omítkář"

Zdroj: [42]

Celý cyklus, začínající nanesením prvního pruhu omítky a končící návratem do stejné polohy na vedlejším pruhu, je zaznamenán v tabulce č. 10.

Tabulka č. 10 – Výpočet jednoho cyklu omítacího robota

Pořadí	Označení	Popis fáze	Doba trvání
1	t_1	Nástřik prvního pásu	78,00 s
2	t_2	Nástřik druhého pásu	78,00 s
3	t_3	Stírání a vyrovnání omítky	78,00 s
4	t_4	Přejezd robota na další omítaný pás	10,00 s
Celkem:			244,00 s

Z tabulky č. 10 je možné vyčíst, že omítání pruhu širokého 1,2 m a vysokého 2,6 m bude trvat 244 s. Při přepočtu na 1 m² omítané plochy vyjde výsledný čas 78,3 s, což náleží době 0,02175 hod. Časová norma stroje Omítkáře je tedy vyčíslena na 0,02175 hod/m².

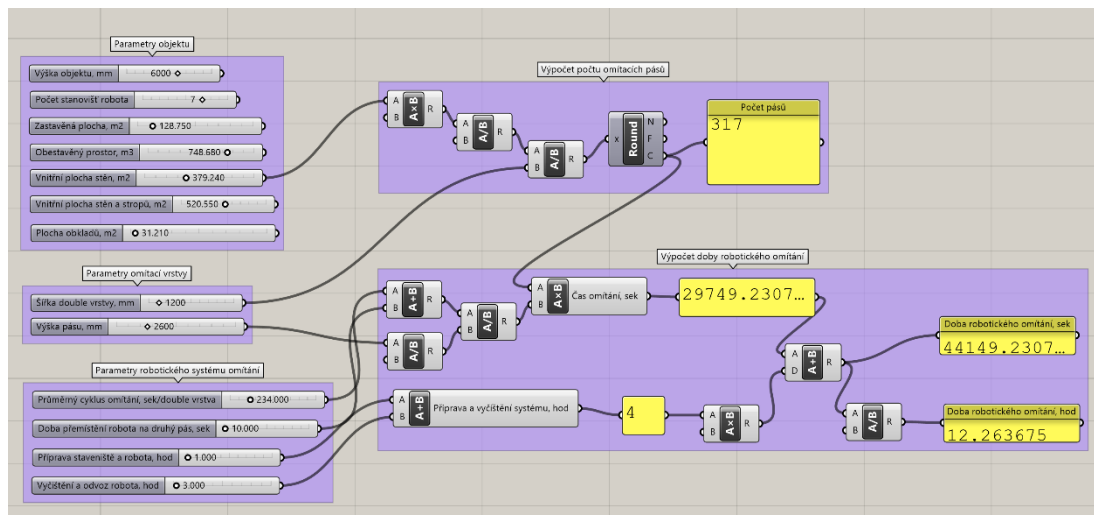
Omítanou plochu počítaného domu, konkrétně 379,24 m², bude robot provádět $379,24 \text{ m}^2 \times 0,02175 \text{ hod/m}^2 = 8,25 \text{ hod}$. Pokud přičteme časy na přípravu staveniště a přepravu robota a dobu, kterou zabere čištění robota a úklid staveniště po omítacím procesu, dostaneme se na celkový čas 12,25 hodin.

Tabulka č. 11 – Proces omítání robotem a doba výstavby

Pořadí	Pracovní činnost	Doba provádění [hod]
1	Příprava staveniště a přeprava robota	1,00
2	Omítání vč. přesunu robota do další polohy	8,25
3	Čištění robota	3,00
Celkem:		12,25

Časy, za které provádí robot „Omítkář“ celý proces byly ještě kontrolovány na virtuálním modelu, který byl opět vytvořen v programech Rhinoceros a Grasshoper. Po zadání údajů, které jsou nezbytné, jako jsou např. šířka a výška omítaného pásu, doba přemístění robota či parametry objektu, byla dle těchto informací vypočtena celková doba robotického omítání. Při následném porovnání obou způsobů měření a výpočtů doby realizace omítek robotickou technologií došlo

k velmi podobnému výsledku, což ověřuje správnost výpočtů. Postup výpočtu výsledného času omítání virtuálního robota je zobrazen na obr. č. 39.

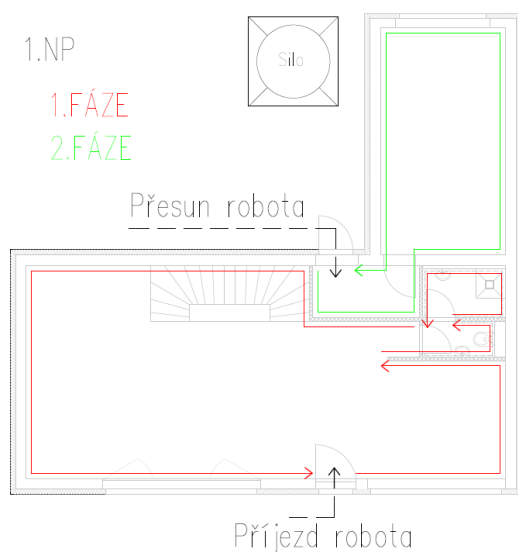


Obr. č. 39 – Výpočet omítání robotem pomocí výpočetního modelu

Zdroj: vlastní výroba

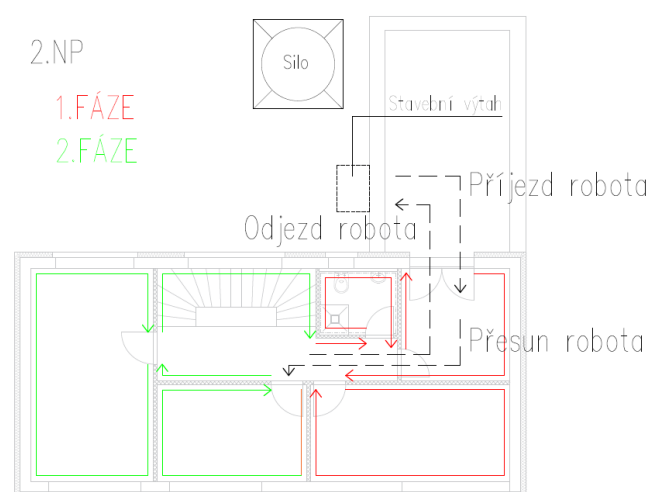
Před zahájením omítacích prací je požadováno kompletní dokončení hrubé stavby, dokončené a vyzrálé svíslé nosné konstrukce a příčky, hotové podkladní vrstvy podlah, zastropení podlaží, včetně zastřešení stavby, provedeny veškeré instalace včetně jejich odzkoušení, osazení ocelových zárubní dveří a rámců oken bez křidel. Dále je kontrolována pevnost a rovnost zdiva a stropu. Je také velmi dbáno na úklid, převážně míst, kterými robot bude projíždět. Po převzetí staveniště a kontrole podkladu dojde k jeho penetraci, osazení rohových profilů a zakrytí oken. Po provedení omítacích prací robota je nutné zavést do procesu dvě technologické pauzy, první dvoudenní, kdy je potřeba zamezit větrání, pro náběh pevnosti omítky. Druhou přibližně sedmidenní, kdy už je nutné objekt provětrávat.

Pro robota, který provádí omítky je nutné přesně naplánovat trasy, kterými se bude robot pohybovat, ty jsou vyznačeny v obrázcích níže. První bude zahájeno omítání prvního podlaží, poté dojde k přesunu do druhého nadzemního podlaží. Suchá omítková směs je dopravena na staveniště a uložena v transportním silu m-tec o kapacitě 18 m³.



Obr. č. 41 – Pohyb omítacího robota 1.NP

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 40 – Pohyb omítacího robota 2.NP

Zdroj: vlastní výroba

Z porovnání lze vyčíst, že robotické omítání může být daleko rychlejší než ruční či strojní omítání. Velkým problémem je vysoká složitost omítání stropů a složitějších a členitějších detailů, kterými jsou např. oblasti kolem oken a dveří. Robot Omítkař nebude nejlepším možným pracovníkem pro omítání vnitřních prostorů rodinných a bytových domů, avšak velmi dobře využitelný by mohl být pro větší prostory, které zvládne omítat autonomně s velkou rychlostí a pečlivostí. [42]

Požadavky pro nejefektivnější využití robotické technologie omítání

- Nutný stavební výtah s nosností min. 500 kg, popř. jeřáb
- Nutnost průjezdu všech dveřních otvorů (max. šířka 800 mm)
- Co nejširší pás pro omítání, avšak zároveň nesnižovat obratnost
- Velká přesnost při vertikálním pohybu pro zajištění přesné tloušťky omítky
- Možnost připojení se na třífázové vedení pro odběr elektřiny 400 V

3.3 Analýza ručního a robotického provádění maleb

3.3.1 Ruční způsob provádění

Pro zhotovení maleb byla zvolena opět četa dvou malířů. Dle již zmíněné databáze Contec [40] je norma času vyčíslena na 0,09 Nh/m². Celkový čas provádění všech malovaných ploch je 23,4 hod.

Tabulka č. 12 – Výpočet doby trvání provádění maleb člověkem

	Měrná jednotka	Množství [m.j.]	Norma času [Nh.mj. ⁻¹]	Pracnost normová [Nh]	Počet pracovníků	Doba trvání dílčího stavebního procesu [hod]	Doba trvání dílčího stavebního procesu [dny]
Stěny	m ²	343,94	0,09	30,95	2	15,5	1,9
Stropy	m ²	176,61	0,09	15,89	2	7,9	1,0
Celkem:						23,4	2,9

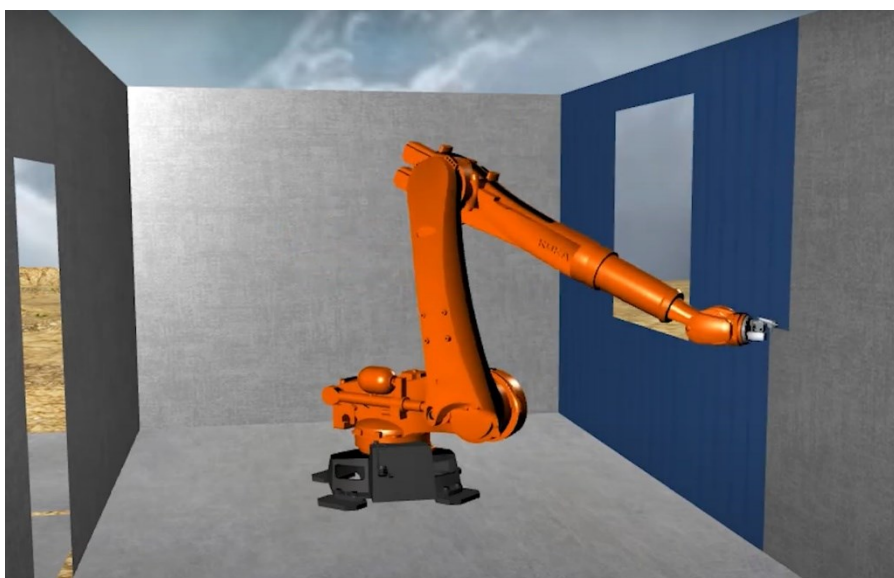
3.3.2 Robotický způsob provádění

Robot využitý pro výmalbu vzorového rodinného domu je stejně jako u zdění od společnosti KUKA, konkrétně KUKA KR 20 R3100 se speciální úpravou v podobě prodlouženého ramene o 1 m. Proces výmaleb začíná, stejně jako u zdíciho procesu, BIM modelováním objektu, kde jsou uloženy informace o použitých natíracích hmotách, plochách, které budou malovány a barvách, které budou použity. Dále je nutné poskytnout informace o robotu a trysce, která bude k malování použita. Nejdůležitější technické informace jsou shrnuty do tabulky č. 13.

Tabulka č. 13 – Technická data robota provádějícího malby

Technická data robota provádějícího malby KUKA KR 20 R3100	
Maximální dosah	3101 mm + spec. úprava 1000 mm
Průměr trysky	3,5 mm
Šířka jednoho záběru	250 mm
Rychlost malování	200 mm/s
Maximální zatížení na konci ramene	30 kg
Počet os	6
Velikost podstavce	603 mm x 480 mm
Výška robota	1860 mm - 4500 mm
Hmotnost robota	549 kg

Neméně důležité je i zvolení os pruhů maleb, které obsahuje směr, ve kterém bude nástřik veden, souřadnice počátečního a konečného bodu, délka a plocha výmalby a čas, za který dokáže robot malbu provést. Stěny budou malovány shora dolů a zpět zdola nahoru a stropy ze strany na stranu, ale vždy ve stejném směru.



Obr. č. 42 – Nanášení jednotlivých pruhů pomocí robota

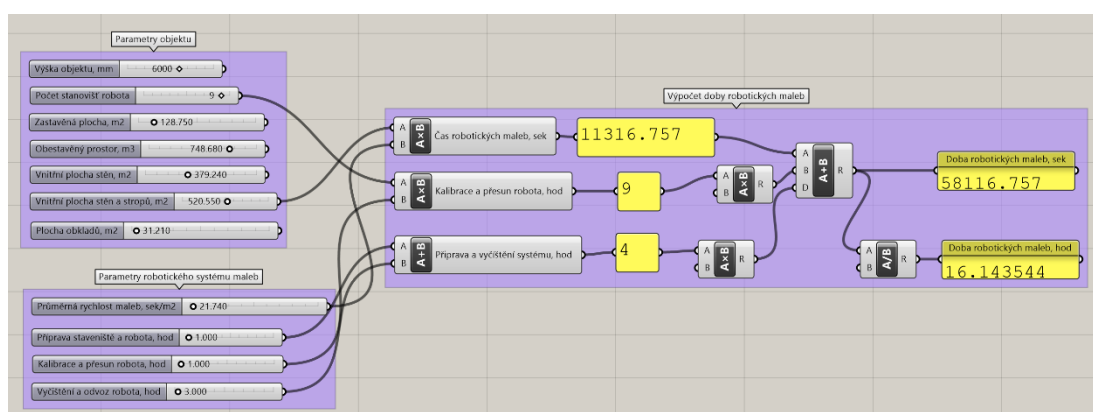
Zdroj: [43]

Pokud budeme počítat s rychlostí pohybu ramene 200 mm/s, tedy 0,2 m/s, což je tradiční rychlost tohoto malujícího robota, se šířkou jednoho záběru 250 mm a překrytím 30 mm, není náročné stanovit, že za jednu sekundu robot vymaluje 0,046 m². Z toho vyplývá, že 1 m² bude robot v jedné vrstvě vymalovávat 21,74 s. Celkový čas stříkání malby na stěnu celého vybraného domu o ploše konstrukcí opatřených malbou 520,55 m² je 11317 s, což činí 3,14 hodin.

Tabulka č. 14 – Proces provádění maleb robotem a doba provádění

Pořadí	Pracovní činnost	Doba provádění [hod]
1	Příprava staveniště a přeprava robota	1,00
2	Montáž, kalibrace, demontáž a přesun robota (celkem 7x)	9,00
3	Nanášení malby na konstrukce	3,14
4	Vyčištění a odvoz robota	3,00
Celkem:		16,14

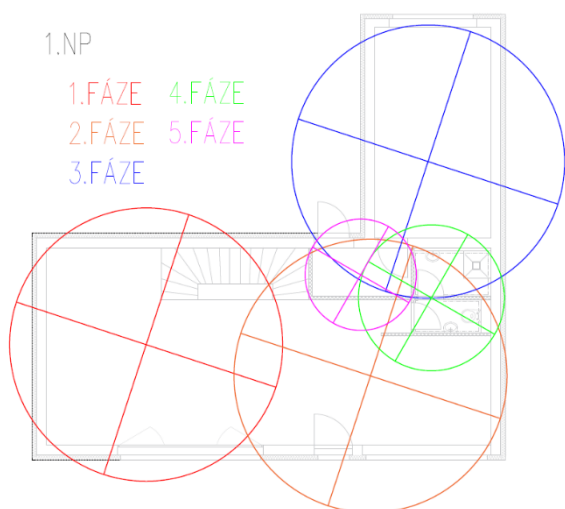
Při připočtení časů, které jsou spjaty s přípravou staveniště pro robota, jeho montáží a kalibrací a čištěním dojdeme k celkovému času 16,14 hodiny na vymalování předlohou rodinného domu. Proces měření časového snímku byl kontrolován pomocí virtuálního modelu robota zajišťujícího malby. Po zadání základní parametrů stavěného objektu a parametrů robotického systému maleb byla zjištěna naprosto stejná doba provádění jako při prvním výpočtu, což potvrzuje správnost výsledků.



Obr. č. 43 – Výpočet provádění maleb robotem pomocí výpočetního modelu

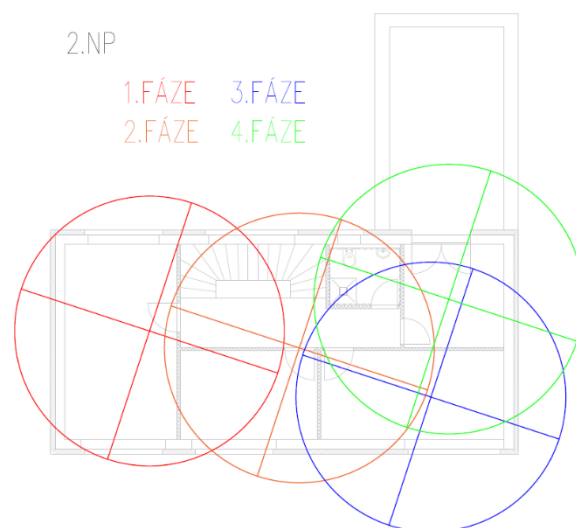
Zdroj: vlastní výroba

Velkou nevýhodou této robotické technologie je, že je robot statický. Jelikož se v době realizace maleb již v domě nacházejí příčky, je nutné, aby i přes velký dosah robota bylo vybráno velké množství míst, na které je robot umístěn, v případě tohoto domu 9. Vybraná statická umístění jsou zakreslena v obrázcích níže. Vzhledem k poměrně nízké hmotnosti robota není nutný jeřáb ani stavební výtah, což však přesuny zjednodušuje.



Obr. č. 45 – Pozice robota provádějícího malby 1.NP

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 44 – Pozice robota provádějícího malby 2.NP

Zdroj: vlastní výroba

Při porovnání tabulek č. 12 a č. 14 je snadno zjistitelné, že pro provádění maleb je rychlejší využít robotickou sílu. V typickém dvouposchoďovém rodinném domě ušetří robot přibližně sedm hodin, avšak robotické provádění maleb má i několik nedostatků. Pravděpodobně největším problémem zkoumaného robota je jeho nepohyblivost. Při jeho posazení na pojízdný podvozek by se celková rychlost zvýšila a robot by byl daleko využitelnější.

Požadavky pro nejefektivnější využití robotické technologie maleb

- I přes poměrně velký dosah časté přesuny robota z místa na místo kalibrace
- Po přesunu robota na kolový/pásový podvozek a tím zajištěný přesun by se daleko zvýšila efektivita práce

- Nutnost připevnění na externí zásobu barvy
- Možnost připojení se na třífázové vedení pro odběr elektřiny 400 V
- Četa minimálně dvou pracovníků – obsluha robota a pomocný dělník

3.4 Analýza ručního a robotického provádění obkladů

3.4.1 Ruční způsob provádění

Provádění obkladů je poměrně náročná práce, která vyžaduje především preciznost a detailnost. Zdálo by se, že nebude existovat žádný jiný pracovník, který by tuto práci prováděl lépe než člověk, na druhou stranu se jedná o neustále opakující se činnost, kterou by určitě robot zvládl také. Četa dvou pracovníků bude obklad o ploše 31,21 m² pro dvě koupelny a WC ve vzorovém rodinném domě dělat necelých 14 hodin.

Tabulka č. 15 – Výpočet doby trvání provádění obkladů člověkem

	Měrná jednotka	Množství [m.j.]	Norma času [Nh.mj. ⁻¹]	Pracnost normová [Nh]	Počet pracovníků	Doba trvání díličního stavebního procesu [hod]	Doba trvání díličního stavebního procesu [dny]
Obklady na WC a koupelnách	m ²	31,21	0,89	27,78	2	13,9	1,7
Celkem:						13,9	1,7

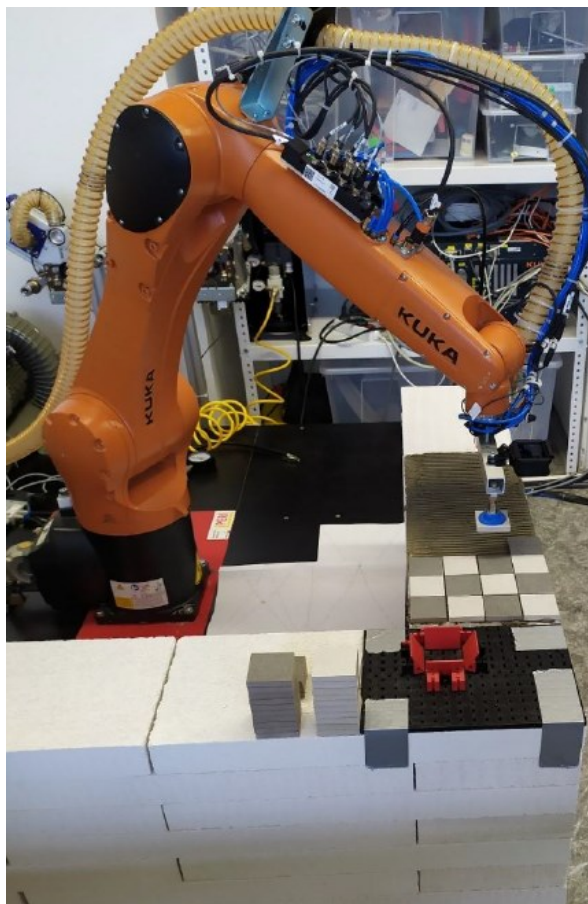
3.4.2 Robotický způsob provádění

Pro obklady bude využíván robot KUKA Agilus KR10 R1100 sixx. U robota, který provádí obklady je nutné myslet především na jeho obratnost a drobnost. Není podmínkou, aby měl velkou nosnost na konci ramene, ale výhodou je spíše jeho drobnost a schopnost pohybu ve stísněných prostorech. Technické parametry robota KUKA Agilus KR10 R1100 sixx jsou popsány v tabulce č. 16.

Tabulka č. 16 – Technická data robota provádějícího obklady

Technická data robota provádějícího obklady KUKA KR 10 R1100 sixx	
Maximální dosah	1101 mm
Počet os	6
Velikost podstavce	320 mm x 320 mm
Výška robota	960 mm - 1475 mm
Hmotnost robota	55 kg

Robotická instalace obkladů se bude držet metody vkládání obkladových dlaždic do lepidla, které je nanášeno na podklad těsně před obkládáním, tedy metody floating. V úvodu je nutné ručně natáhnout lepidlo na podklad, což je prakticky jediné období robotického obkládání, kde hraje hlavní roli člověk. U ostatních činností je hlavním pracovníkem robot KUKA Agilus KR10 R1100 sixx. V první fázi neustále opakujícího se cyklu robotického obkládání rameno pomocí přísavky přichytí obkladačku, kterou přesune do rektifikačního boxu, kde dojde ke srovnání dlaždice. Po zkalibrování do přesné pozice bude obkladačka znovu uchopena a přesunuta na stěnu do lepidla na místo jejího určení.



Obr. č. 46 – Proces obkládání robotem

Zdroj: [44]

Celý neustále opakující se proces, včetně doby trvání jednotlivých za sebou jdoucích fází, je zaznamenán v tabulce č. 17.

Tabulka č. 17 – Výpočet jednoho cyklu robota provádějícího obklady

Pořadí	Označení	Popis fáze	Doba trvání
1	t_1	Uchycení obkladačky na zásobovací paletě	1,86 s
2	t_2	Zásobovací paleta -> kalibrační zařízení	5,20 s
3	t_3	Uchycení obkladačky v kalibračním zařízení	1,86 s
4	t_4	Kalibrační zařízení -> místo umístění	8,31 s
5	t_5	Přesné umístění obkladačky do lepidla	4,86 s
6	t_6	Návrat do výchozí pozice	7,22 s
Celkem:			29,31 s

Jednotlivé časy byly změřeny z videa práce daného robota. Je však nutné zmínit, že stejně jako u zdícího robota nebyl ani robot provádějící obklady spuštěn na plný výkon. Na druhou stranu bylo manipulováno s dlaždicemi na velmi krátkých úsecích, což naopak pozitivně ovlivňovalo rychlost, za kterou dokázal průměrnou dlaždici přesunout a položit. [44]

Samozřejmě stejně jako u práce člověka má velký vliv na výsledný čas obkládání velikost obkladových dlaždic. Pokud budeme brát v potaz obklady o rozměrech 20 cm x 20 cm, tak na 1 m² obkládané plochy bude potřeba 25 kusů dlaždice. Dle již jednou použité rovnice vypočteme dobu, za kterou bude obložen jeden čtvereční metr.

$$\frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6) * 25}{3600} = 0,204 \text{ hod/m}^2$$

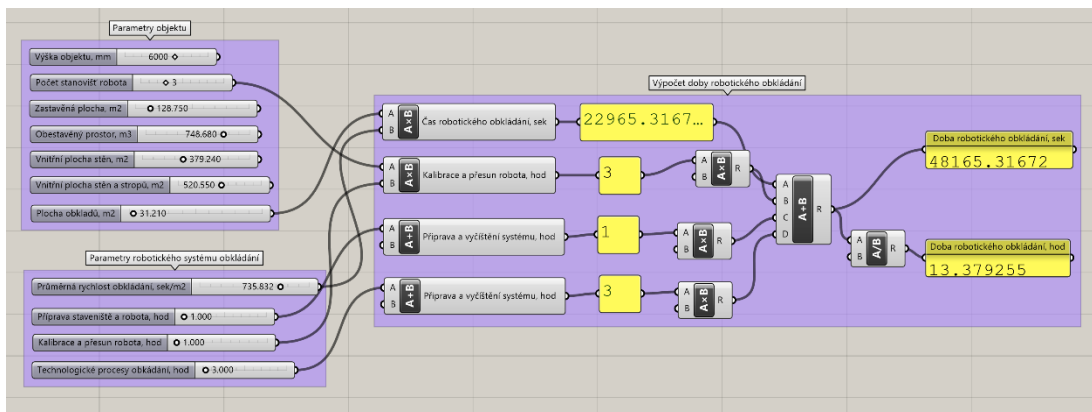
V souvislosti s tím zjišťujeme, že čistý čas vkládání dlaždic do připraveného lepidla o ploše 31,21 m² bude trvat přibližně 6,37 hodin.

V tabulce č. 18 je soupis všech prací, které jsou nutné provést při využití robotického systému obkládání včetně celkové doby provádění.

Tabulka č. 18 – Proces obkládání robotem a doba provádění

Pořadí	Pracovní činnost	Doba provádění [hod]
1	Příprava staveniště a přeprava robota	1,00
2	Montáž, kalibrace, demontáž a přesun robota (celkem 3x)	3,00
3	Nanášení lepidla na obkládaný povrch	1,00
4	Obkládání robotem	6,37
5	Očištění kahliček	0,50
	Technologická přestávka 24 hodin	
6	Spárování	1,50
Celkem:		13,37

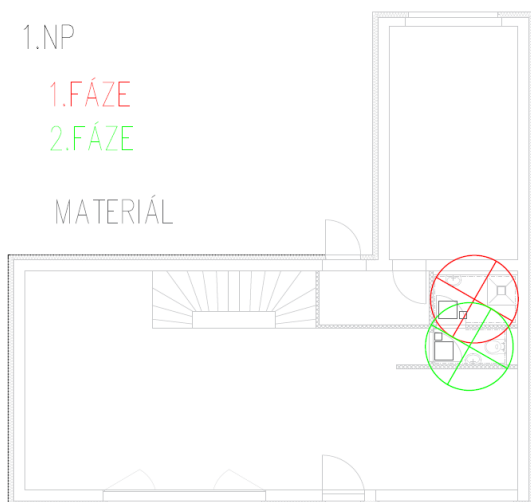
Stejně jako u předchozích třech robotických technologií bylo i provádění obkladů verifikováno pomocí virtuálního modelu tohoto procesu. Tak jako u předchozích činností bylo ověřeno, že byl výpočet správný, protože se výsledky prakticky shodují.



Obr. č. 47 – Výpočet provádění obkladů robotem pomocí výpočetního modelu

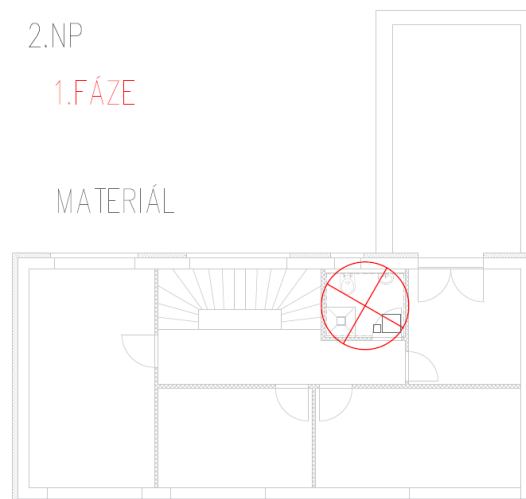
Zdroj: vlastní výroba

Robot zajišťující obklady bude, stejně jako tomu bylo u zdíčího robota, statický, tedy je předem nutné určit pozice, ze kterých bude schopný obložit největší plochu. Pro případ příkladového rodinného domu jsou vybrány tři pozice, tedy v každé místnosti s obklady jedna, dvě v prvním nadzemním podlaží a jedna v druhém. Jako první se bude obkládat 1.NP, později 2.NP. Pozice robotů v jednotlivých místnostech jsou vyznačeny v půdorysech níže. Vzhledem poměrně k nízké hmotnosti (50 kg) robota není potřeba zajištění stavebního výtahu ani jeřábu.



Obr. č. 48 – Pozice robota provádějícího obklady 1.NP

Zdroj: vlastní výroba



Obr. č. 49 – Pozice robota provádějícího obklady 2.NP

Zdroj: vlastní výroba

Při porovnání tabulek č. 15 a 18 zjistíme, že doba vykonávání činnosti obkládání prostorů dvou koupelen a WC ve vzorovém domě je velice podobná, pokud je vykonávána lidskou pracovní silou a robotickou pracovní silou.

Požadavky pro nejefektivnější využití robotické technologie obkládání

- Minimální dosah 1 m, avšak dosah ne příliš velký, kvůli pohybu ve stísněných prostorech
- Nutnost průjezdu všech dveřních otvorů (max. šířka 800 mm)
- Vysoká obratnost
- Vysoká pečlivost a přesnost (kontrola rovinnosti ± 3 mm na 2 m)

4 Multikriteriální vyhodnocení

Pro dosažení nejobektivnějších výsledků a nejneustranější vyhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých technologií provádění stavebních činností bude použita multikriteriální analýza (MCA).

Multikriteriální analýza se zabývá hodnocením možných alternativ podle několika kritérií, přičemž alternativa hodnocená podle jednoho kritéria zpravidla nebývá nejlépe hodnocená podle kritéria jiného. Dále se řeší hodnocení konfliktů mezi vzájemně protikladnými kritérii. Jedná se o metodu, která se snaží co nejobektivněji shrnout a utřídit informace. Vícekriteriální rozhodování vzniká všude tam, kde rozhodovatel hodnotí důsledky své volby dle několika kritérií. [45]

Saatyho metoda

Saatyho metoda je metoda kvantového párového porovnání, která slouží k vyhodnocení vah kritérií, pokud je hodnotí pouze jedna osoba. Jedná se o metodu kvantitativního párového porovnání kritérií. Pro ohodnocení párových porovnání je užívána devítibodová stupnice, kde je možnost používat i mezistupně (hodnoty 2, 4, 6, 8):

- 1 – rovnocenná kritéria i a j
- 3 – slabě preferované kritérium i před j
- 5 - silně preferované kritérium i před j
- 7 – velmi silně preferované kritérium i před j
- 9 - absolutně preferované kritérium i před j

Hodnotitel porovná každou dvojici kritérií a velikosti preferencí i -tého kritéria vzhledem k j -tému kritériu zapíše do Saatyho matice $S = (s_{ij})$:

Vzorec č. 1 – Saatyho matice

$$S = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ 1/s_{12} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/s_{1k} & 1/s_{12} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Jsou-li i -té a j -té kritérium rovnocenná, platí $s_{ij} = 1$, pokud se preferuje i -té kritérium slabě před j -tým, je $s_{ij} = 3$, preferuje-li se silně i -té kritérium před j -tým, je $s_{ij} = 5$, při velmi silné preferenci i -tého kritéria před j -tým, potom platí $s_{ij} = 7$, při preferenci absolutní platí $s_{ij} = 9$. Je-li preferováno j -té kritérium před i -tým, zapíší se do Saatyho matice převrácené hodnoty (tedy např.: $s_{ij} = 1/3$ při slabé preferenci, $s_{ij} = 1/5$ při silné preferenci atd.)

Matice je čtvercová řádu $n \times n$, reciproká, tj. platí, že $s_{ij} = 1/s_{ji}$, a vyjadřuje odhad podílů vah i -tého a j -tého kritéria. Na diagonále Saatyho matice jsou vždy hodnoty jedna (každé kritérium je samo k sobě rovnocenné). Prvky této matice nejsou vždy úplně konzistentní. Saaty navrhl několik početně velmi jednoduchých způsobů výpočtů, pomocí kterých se dají odhadnout váhy. V největším je užíván postup výpočtu vah jako normalizovaného geometrického průměru řádků Saatyho matice (metoda logaritmických nejmenších čtverců). Hodnoty b_i jsou dále počítány jako geometrický průměr řádků Saatyho matice.

Vzorec č. 2 – Geometrický průměr řádků Saatyho matice

$$b_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n s_{ij}}$$

Váhy se dále vypočtou normalizací hodnot b_i dle vzorce:

Vzorec č. 3 – Normalizace hodnot b_i

$$v_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}$$

Případy, kdy je Saatyho matice nekonzistentní jsou velmi časté. A to především u rozsáhlejších úloh. Nekonzistence je majoritně způsobena chybou při zadávání odhadů poměrů vah a také nedostatečným provedením kontroly svých odhadů. V případě nekonzistentnosti je nutné překvantifikovat Saatyho matici tak, aby splňovala požadavek konzistence. Tímto interaktivním způsobem lze dospět k velmi solidním a objektivním výsledkům. [46]

Pro tuto práci si vystačíme s vahou hodnocení v rozmezí od 1 bodu do 6 bodů, přičemž 1 bod je nejméně a 6 bodů je nejvíce. Dále bude zpracováno porovnání, které určuje šestibodová stupnice dle Saatyho, kdy jsou jednotlivá kritéria hodnocena přesně opačně. Čím vyšší stupeň od 1 do 6, tím nižší preference na dané kritérium. Pro porovnání všech čtyř technologií volím u každé technologie stejný stupeň, aby výsledky byly v závěru co nejlépe porovnatelné. Jednotlivé stupně jsou přiřazeny v tabulce č. 19. Z tohoto hodnocení poté vychází geometrický průměr a výsledná váha kritéria, což jsou hodnoty, které jsou potřeba pro celkové závěrečné vyhodnocení. To je poté vypočteno jako suma jednotlivých součinů kritéria a jeho váhy.

Tabulka č. 19 – Saatyho matice pro hodnocení kritérií

	Rychlost výstavby	Ekonomická analýza	Ostatní faktory	Potenciál technologie	Geometrický průměr	Váha kritéria
Rychlost výstavby	1	1/2	1/6	1/5	0,3589	0,0714
Ekonomická analýza	2	1	1/3	2/5	0,7168	0,1426
Ostatní faktory	6	3	1	6/5	2,1558	0,4288
Potenciál technologie	5	5/2	5/6	1	1,7965	0,3573
Celkem:					5,0281	1,0000

Největší důraz v této analýze je kladen na rychlost výstavby. Rychlost výstavby je jedním z důvodů ovlivnění výsledné ceny, proto je na ni kladen větší důraz než na výši nákladů na dané technologie. Výše nákladů je v těsném závěsu za rychlostí výstavby, avšak tato dvě kritéria jsou hodnocena lepšími stupni než ta dvě poslední. Ve zbylých dvou kategoriích mě více zajímá potenciál dané technologie a až na závěr ostatní faktory ovlivňující danou technologii. Důvod je prostý, pokud by robotické technologie měly v budoucnu absolutně nahradit náročnou práci lidí, je nutné, aby veškeré problémy a kritická místa, které jsou zařazeny právě v kategorii ostatních

faktorů, byly odstraněny, anebo bylo nalezeno řešení, jak danou práci vykonávat i přes tyto problematické body.

4.1 Vyhodnocení procesu zdění

Rychlost provádění

Rychlost výstavby byla důkladně rozebrána již ve třetí kapitole této práce. Zvolený robotický systém při zdění dvoupodlažního rodinného domu o ploše nosného a příčkového zdiva 284,64 m² je o přibližně 6 hodin rychlejší než četa dvou dělníků. V úvahu musíme vzít fakt, že při nízkých zkušenostech s robotickým zdícím systémem nešlo vše tak hladce, jako tomu může být při dalších pokusech.

Zároveň jako výhodu robotické technologie beru fakt, že do budoucna se naskytá možnost zdít stěny z větších a těžších bloků, než je tomu do teď. Vzhledem k vysokému možnému zatížení na konci ramene by robot neměl mít problém zdít z větších bloků, a to by měla být velká výhoda oproti člověku, pro kterého bude nemyslitelné manipulovat s velkorozměrovými cihlami. Tato skutečnost by samozřejmě rapidně zvýšila rychlost výstavby a snížila spotřebu malty či lepidla. Nevýhodou této technologie je to, že by se tyto velké bloky musely začít vyrábět a díky ne příliš vysokému odběru by mohla být jejich cena vysoká.

Ekonomická analýza

Porovnání ceny robotické technologie a ručního zdění je přiložena v tabulce č. 20.

Tabulka č. 20 – Ekonomické porovnání robotického a ručního zdění

	Robotické zdění	Ruční zdění
Pořizovací náklady systému	2 900 000 Kč	0 Kč
Složení pracovní čety	1x obsluha robota, 1x pomocný dělník	2x zedník
Roční časový fond 2021	2016 hod	2016 hod
Počet typických domů vypracovaných za rok 2021	16,97	16,15
Max. zpracované množství za rok	4 829 m ²	4 598 m ²
Náklady za rok (1 systém/1 četa)		
Odpisy HM	290 000 Kč	0 Kč
Licenční náklady	200 000 Kč	0 Kč
Spotřeba materiálu	9 050 045 Kč	8 616 397 Kč
Spotřeba energie	72 049 Kč	0 Kč
Provozní náklady	428 183 Kč	131 248 Kč
Mzdy vč. odvodů	1 063 130 Kč	1 249 920 Kč
Celkové roční náklady	11 103 406 Kč	9 997 565 Kč
Celkové náklady na 1 m² stěny	2 299 Kč	2 174 Kč

Při vyzdívání stále stejných, a ne příliš velkých domů, je ekonomicky výhodnější použití čety dvou zedníků. Avšak při použití robotů na větší stavby a na cyklus, který je delší než jeden rok, budou náklady na tuto technologii rozložené, a tedy se stane robotická technologie využitelnější a cenově dostupnější. Zároveň je vhodné pracovat s myšlenkou rozšíření pracovní doby. Myslím si, že není vyloučené používat robota ve směnách, např. ranní a odpolední, tedy po dobu 16 hodin. Žádný dělník není schopný fyzicky pracovat delší dobu než 10 hodin denně, ale člověk, který pouze dohlíží na práci robota by mohl. Zároveň se dá předpovídat, že jeden operátor bude schopný řídit více robotů než pouze jednoho. Ideálem by se mohlo stát, že operátor sedí v kanceláři a dohlíží na práci více robotů. Myslím si, že by neměl být problém hlídat práci až pěti robotů, čímž by se opět snížili celkové náklady na složení pracovní čety na náklady na jednoho člověka pracujícího jako obsluha a pět pomocných dělníků. Všemi výše vypsány variantami by se dalo docílit rozložení celkových nákladů a tendence využívání robotů by se rapidně zvyšovala.

Ostatní faktory ovlivňující analýzu

Prvním faktorem, který trochu brzdí robotickou technologii je potřeba jeřábu při přesunech, ať už k pohybu horizontálnímu, tak i k pohybu do jiných pater. Na druhou stranu výhodou robotické technologie by mohla být absence lešení, které není k vyzdívání vyšších řad zdiva potřeba. Dalším negativním faktorem je samozřejmě extrémní hmotnost robota, která způsobuje nadměrné bodové zatížení stropní desky. Častější poruchovost robotického systému v porovnání s lidskou činností je také velkou nevýhodou. Na druhou stranu při stále větším nedostatku pracovníků ve stavebnictví a poměrně rychle rostoucím platům se pro robotické technologie otevírá více cest k proniknutí do běžného využívání. Posledním důležitým faktorem je, u stavebnictví tradičně, počasí. Stavební roboti nejsou schopni vykonávat stoprocentní výkony v teplotách pod +5 °C. Avšak tento faktor bych nebral jako výhodu, ani jako nevýhodu, jelikož lidé také nejsou schopni dlouhodobě pracovat v takto nepříznivých podmínkách.

Saatyho vyhodnocení

V tabulce č. 21 jsou jednotlivým kritériím přidávány body. Kritéria rychlosti výstavby a ceny jsou hodnocena kvantitativně, jelikož je možné tyto technologie nějakým způsobem měřit, zatímco ostatní faktory, které jsou vypsány výše a potenciál dané technologie jsou hodnoceny kvalitativně a jsou ovlivněny mým názorem a rešerší, která byla dlouhodobě prováděna. Výsledné hodnocení bylo vypočteno jako suma jednotlivých součinů kritéria a jeho váhy.

Tabulka č. 21 – Porovnání technologií zdění

	Rychlost výstavby	Ekonomická analýza	Ostatní faktory	Potenciál technologie	Výsledné hodnocení
Hledisko	Kvantitativní	Kvantitativní	Kvalitativní	Kvalitativní	
Ruční způsob provádění	3	4	5	1	3,2855
Robotický způsob provádění	4	3	2	4	2,9999
Váha kritéria	0,0714	0,1426	0,4288	0,3573	

Absolutní hodnocení všech čtyř technologií je provedeno v závěru práce.

4.2 Vyhodnocení procesu omítání

Rychlost provádění

Ze třetí kapitoly této práce víme, že strojní způsob omítání řešeného rodinného domu, které prováděla četa dvou pracovníků, bude trvat 45,5 hodin. Naproti tomu při využití robotické technologie zkrátíme tuto dobu na 12,25 hodin. Rozdíl je to markantní, ale je nutné přiznat, že je počítáno pouze s plochou, u které víme výšku. Nejsou započítány různé ohyby omítané konstrukce, ostění a podobné detaily, které robotické technologii způsobují problémy.

Ekonomická analýza

Porovnání ceny robotické technologie a strojního omítání dvoučlennou četou je přiložena v tabulce č. 23.

Tabulka č. 22 – Ekonomické porovnání robotického a strojního omítání

	Robotické omítání	Strojní omítání
Složení pracovní čety	1x obsluha robota	2x omítkář
Roční časový fond 2021	2016 hod	2016 hod
Počet typických domů omítnutých za rok 2021	164,57	44,31
Max. zpracované množství za rok	62 412 m ²	12 612 m ²
Náklady za rok (1 systém/1 četa)		
Náklady na technologii	5 929 147 Kč	239 400 Kč
Licenční náklady	200 000 Kč	0 Kč
Spotřeba materiálů	2 793 002 Kč	564 388 Kč
Mzdy vč. odvodů	705 600 Kč	1 249 920 Kč
Celkové roční náklady	9 627 749 Kč	2 053 708 Kč
Celkové náklady na 1 m² stěny	154 Kč	163 Kč

Do nákladů na technologii pro robotické omítání jsou započítány náklady na pronájem včetně transportu, náklady na čištění robota, jeho pojištění a náklady na energie. V nákladech na technologii strojního omítání jsou náklady na pronájem omítacího zařízení, pronájem sila, náklady na zařízení daného staveniště, náklady na čištění a energie.

Stejně jako u cenové analýzy robotického zdění si myslím, že jeden operátor by mohl řídit více robotů najednou, což by sice neřešilo počet zaměstnanců, kteří

by museli být přítomni u provádění dané činnosti, ale vzhledem k tomu, že by se plat operátora mohl změnit v plat za pomocného dělníka, který by pouze byl k ruce, mohly by se rapidně snížit náklady na mzdy.

Ostatní faktory ovlivňující analýzu

Jak bylo již v práci zmíněno, největší nevýhodou robotické technologie provádění omítek je problém s omítáním stropních konstrukcí. Je předpokládáno, že po omítnutí stěn v místnosti pomocí robota bude muset nastoupit člověk a strop omítnout. Zároveň si robot není schopný poradit se složitějšími detaily v podobě velkého množství rohů, které jsou často za sebou či ostění. Z tohoto důvodu prozatím nedává příliš velký smysl používat roboty pro vykonávání omítek v rodinných domech a menších bytových domech, ale myslím si, že jsou tyto systémy připraveny na zavedení procesu pro větší bytové domy, kanceláře či haly.

Námi zkoumaný robot je zároveň schopný projet jakýmkoliv standartním dveřním otvorem, což umožňuje prakticky úplnou nezávislost na člověku. Pro přesuny robota ve vertikálním směru je sice potřebný stavební výtah či normální výtah, avšak, když se zaměříme na větší stavby, jak je psáno výše, tak můžeme s výtahem v této fázi výstavby počítat. Velkou výhodou robotické technologie je zároveň možnost nastavení si módu omítání, zda chceme přesnou svislost, či kopírování povrchu a možnost nastavení si tloušťky omítky, kterou robot s vysokou přesností drží.

Saatyho vyhodnocení

U Saatyho vyhodnocení pro omítání, které je přiloženo v tabulce č. 24, zvítězila poměrně jednoznačně robotická technologie. Je to především zásluhou velmi rychlého provádění a velkého potenciálu této technologie do budoucna. Zároveň robotický způsob provádění neztratil příliš mnoho bodů v kritériu ekonomické analýzy.

Tabulka č. 23 – Porovnání technologií omítání

	Rychlost provádění	Ekonomická analýza	Ostatní faktory	Potenciál technologie	Výsledné hodnocení
Hledisko	Kvantitativní	Kvantitativní	Kvalitativní	Kvalitativní	
Ruční způsob provádění	1	3	4	1	2,5714
Robotický způsob provádění	5	4	3	5	3,9999
Váha kritéria	0,0714	0,1426	0,4288	0,3573	

Absolutní hodnocení všech čtyř technologií je provedeno v závěru práce.

4.3 Vyhodnocení procesu maleb

Rychlost provádění

Čas, za který vymaluje předlokový rodinný dům o velikosti malovaných ploch 520,55 m² četa dvou malířů činí 23,4 hodin. Robotická technologie tu samou činnost zvládne za 16,14 hodin. Zrychlení tohoto procesu je tedy přibližně o 45 %, což je velmi výrazný rozdíl především pro rozsáhlé stavby. Pokud bychom přihlíželi pouze na toto hledisko, zdají se být roboti ideálním vykonavatelem maleb.

Ekonomická analýza

Ekonomické porovnání robotické technologie a ručního provádění maleb dvoučlennou četou je přiloženo v tabulce č. 24.

Tabulka č. 24 – Ekonomické porovnání robotické a ruční výmalby

	Robotická výmalba	Ruční výmalby
Složení pracovní čety	1x obsluha robota	2x malíř
Roční časový fond 2021	2016 hod	2016 hod
Počet typických domů omítnutých za rok 2021	124,91	86,15
Max. zpracované množství za rok	65 020 m ²	24 523 m ²
Náklady za rok (1 systém/1 četa)		
Náklady na technologii	4 876 528 Kč	215 385 Kč
Licenční náklady	200 000 Kč	0 Kč
Spotřeba materiálu	170 489 Kč	64 301 Kč
Mzdy vč. odvodů	705 600 Kč	1 249 920 Kč
Celkové roční náklady	5 952 617 Kč	1 529 606 Kč
Celkové náklady na 1 m² malby	92 Kč	62 Kč

Při pohledu na tabulku č. 24 lze snadno vyčíst, že proces výmalby je rapidně finančně náročnější, pokud je prováděn robotem. Pokud by byly v analýze řešeny pouze ekonomické faktory, nedávalo by žádný smysl používat pro malby jinou technologii než čtyř malířů. Na druhou stranu je proces maleb poměrně nenáročná činnost, kterou zvládne většina nekvalifikovaných pracovníků. Tedy je nutné se zamyslet, zda by při nedostatku pracovníků nedávalo větší smysl použít potřebné dělníky na jinou a složitější práci, kterou robot nezvládne tak hravě, jako malby. Zároveň, stejně jako u zdění i omítání, je dobré se zamyslet nad problematikou řízení více robotů jedním člověkem a tím náklady snižovat a také na možnost práce robota 24 hodin denně včetně svátků. Zároveň jako výhodu robotických prací beru i nemožnost nemoci či zranění, které omezují lidskou činnost. Avšak robotů se týká poruchovost, při které je možné, že bude odstaven na delší časový úsek či bude muset být zaplacená nákladná oprava.

Ostatní faktory ovlivňující analýzu

Nejvíce ovlivňujícím faktorem, který nehraje v prospěch robotické technologii je fakt, že robot je statický. Jen v ukázkovém domě, který je poměrně malý, bylo nutné přesouvat robota sedmkrát. Nemluvě o tom, že může existovat zakázka výmalby budovy, která bude rozdělena do několika malých místností. Poté bude

znamenat, že každá místnost bude muset mít svou polohu robota. Tento problém by vyřešilo postavení robota na kolový či pásový podvozek a naprogramovat ho tak, že by byl schopný pohybu po místnostech a malby zároveň. Díky jeho robotickému rameni s šesti osami pohybu je schopný vymalovat stěny, strop i složité detaily. Zároveň pokud bychom pracovali s vizí pojízdného robota je důležité myslet na fakt, že je potřeba připevnit zásobník s barvou na robota, aby nedošlo při přesunech k převrhnutí a rozlití barvy.

Mezi výhody robotické technologie patří přesné stříkání barvy v rovných pruzích a v přesných vrstvách. Zároveň je výhodné, že vybraný typ robota není nijak těžký, tedy není potřebné provádět statický výpočet pro bodové zatížení desky. Robot by se zároveň měl vejít do výtahu, který se nachází ve větších budovách, takže s jeho vertikální přepravou rovněž problém není. Případně lze pro jeho přepravu vypůjčit stavební výtah.

Saatyho vyhodnocení

Saatyho vyhodnocení pro proces výmaleb je přiloženo v tabulce č. 25. S nepatrným rozdílem v této analýze vyhrála robotická technologie před ručním způsobem provádění. Nejdůležitějším faktorem, který nejvýrazněji posunul robotický způsob provádění před ruční způsob provádění je rychlost provádění, která je výrazně lépe hodnocená.

Tabulka č. 25 – Porovnání technologií provádění maleb

	Rychlost provádění	Ekonomická analýza	Ostatní faktory	Potenciál technologie	Výsledné hodnocení
Hledisko	Kvantitativní	Kvantitativní	Kvalitativní	Kvalitativní	
Ruční způsob provádění	2	4	4	1	2,7853
Robotický způsob provádění	5	2	2	4	2,9288
Váha kritéria	0,0714	0,1426	0,4288	0,3573	

Absolutní hodnocení všech čtyř technologií je provedeno v závěru práce.

4.4 Vyhodnocení procesu obkladů

Rychlost provádění

Proces obkládání mírně vybočuje ze skupiny vybraných stavebních činností, a to především svou rozlohou. U zdění, provádění omítek a maleb se jedná o činnosti, které pracují s velkou rozlohou, z čehož plyne, že se rozdíl v rychlosti provádění projeví ve velkém měřítku. Obklady ve dvou koupelnách a na jednom WC bude četa dvou obkladačů dělat 13,9 hodin a robotická technologie tento proces zvládne za 13,37 hodin. Jak je na první pohled vidět, časy jsou velmi podobné.

Ekonomická analýza

Ekonomická analýza robotické technologie a ručního provádění obkládání dvoučlennou četou je přiložena v tabulce č. 26.

Tabulka č. 26 – Ekonomické porovnání robotického a ručního obkládání

	Robotické obkládání	Ruční obkládání
Složení pracovní čety	1x obsluha robota, 1x nanášec lepidla	2x obkladač
Roční časový fond 2021	2016 hod	2016 hod
Počet typických domů omítnutých za rok 2021	145,04	150,79
Max. zpracované množství za rok	4 527 m ²	4 706 m ²
Náklady za rok (1 systém/1 četa)		
Náklady na technologii	267 068 Kč	301 571 Kč
Licenční náklady	200 000 Kč	0 Kč
Spotřeba materiálu	1 461 902 Kč	1 519 853 Kč
Mzdy vč. odvodů	1 068 480 Kč	1 048 320 Kč
Celkové roční náklady	2 997 450 Kč	2 869 744 Kč
Celkové náklady na 1 m² stěny	662 Kč	610 Kč

Z ekonomického srovnání je viditelné, že ruční obkládání je finančně méně náročné než zaměstnání robotické technologie. Na 1 m² obkladu je rozdíl 52 Kč, což není tak rapidní rozdíl, jelikož plocha obkladu většinou není tak velká. V typickém domě, který používáme pro hodnocení této práce je rozdíl v cenách 1 623 Kč. To je důvod, proč bude v Saatyho analýze přiděleno naprosto stejné hodnocení pro obě technologie.

Ostatní faktory ovlivňující analýzu

Největší omezení při využívání robotické technologie provádění obkladů čítá především potřeba velmi vysoké obratnosti robota. Ten se musí dobře orientovat a bez problémů pohybovat v často stísněných prostorech a zároveň mít dostatečný dosah, aby nebyly nutné časté přesuny, ke kterým je potřebný zkušený personál a velmi zdržují celý proces obkládání. Dalším problémem je využití člověka pro nanášení lepidla. Aby byl robot konkurenceschopný měl by umět nanést i lepidlo, buď na obkládanou plochu nebo na obklad, bez pomoci člověka. Dokud tuto asistenční práci bude provádět i nadále člověk, tak si myslím, že robot na trhu neuspěje. Dále je možné, že robot bude mít problém se složitějšími částmi konstrukcí, jako je obkládání kolem zařizovacích předmětů nebo kolem vývodů instalací.

Na druhou stranu je pravděpodobné, že robotická technologie bude přesnější než člověk, díky stále stejným pohybům a dodržováním přesných souřadnic. Robot zkoumaný v této práci má ideální velikost pro manipulaci v prostoru. Má dosah 1,1 m a vejde se do dveřních otvorů. To je podmínka, kterou je také nutné splnit.

Saatyho vyhodnocení

U vyhodnocení Saatyho metodou v tabulce č. 27 s mírným předstihem zvítězil ruční způsob provádění obkladů. Je to především díky potřebě pomoci nanesení lepidla člověkem, tento fakt strhává značný počet bodů robotické technologii v kategorii ostatních faktorů.

Tabulka č. 27 – Porovnání technologií provádění obkladů

	Rychlost provádění	Ekonomická analýza	Ostatní faktory	Potenciál technologie	Výsledné hodnocení
Hledisko	Kvantitativní	Kvantitativní	Kvalitativní	Kvalitativní	
Ruční způsob provádění	3	3	5	1	3,1429
Robotický způsob provádění	3	3	2	4	2,9285
Váha kritéria	0,0714	0,1426	0,4288	0,3573	

Absolutní hodnocení všech čtyř technologií je provedeno v závěru práce.

Závěr

Závěr této práce bude věnován především výslednému vyhodnocení zjištěných výsledků a naznačení, jakým směrem by se vývoj robotických technologií měl ubírat. V počátku práce byly stručně popsány důvody, proč není robotizace a digitalizace ve stavebnictví rozšířená v takovém rozsahu, jako je tomu v jiných odvětvích průmyslu. Poté byla sestavena komplexní analýza stavebních činností prováděných ve stavebním procesu a byly vybrány ty činnosti, u kterých dává smysl se v blízké budoucnosti zabývat robotizací a automatizací. Výsledkem této analýzy byly čtyři procesy, pro něž byl zpracován popis provádění v současnosti a zároveň nastínění budoucnosti této technologie. Dále bylo pomocí Saatyho metody provedeno multikriteriální vyhodnocení čtyř předem vybraných procesů, konkrétně zdění, omítání, provádění výmaleb a provádění obkladů. Výsledky prováděné analýzy se nachází v tabulce č. 28.

Tabulka č. 28 – Celkové výsledky Saatyho metody

Stavební činnost	Hledisko	Výsledné hodnocení	Výsledná metoda
Zdění	Ruční způsob provádění	3,2855	Ruční
	Robotický způsob provádění	2,9999	
Omítání	Ruční způsob provádění	2,5714	Robot
	Robotický způsob provádění	3,9999	
Malby	Ruční způsob provádění	2,7853	Robot
	Robotický způsob provádění	2,9288	
Obklady	Ruční způsob provádění	3,1429	Ruční
	Robotický způsob provádění	2,9285	

Ze čtyř vybraných stavebních činností v Saatyho vyhodnocení nejlépe obstálo robotické omítání. S tímto výsledkem nemohu nesouhlasit, jelikož je robotické omítání znatelně rychlejší než strojní omítání pomocí čtyř dvou pracovníků. Je sice dražší, avšak s tím je nutné počítat a je možné, že v průběhu dalších let se cenový rozdíl mezi technologiemi bude snižovat díky zdražování lidských pracovních sil a pokroku výzkumu technologií. Jedinou nevýhodou, která se potýká s robotickým omítáním je nedokonalost omítání složitějších detailů, ostění a stropů. Avšak pokud bychom chtěli omítat velkoprostorové místnosti, haly, letiště a další podobné stavby

je robotické omítání vhodným zajištěním vykonání procesu omítek. Robotická technologie vyniká tím, že robot umí být velmi přesný a samostatný.

Druhým a posledním ze čtyř procesů, ve kterém obstála robotická technologie lépe než provádění práce člověkem, jsou malby. U vyhodnocení maleb v tabulce č. 25 můžeme vidět, že rozdíl není tak markantní jako u omítek. Podobně jako u omítek nejlepší skóre přineslo kritérium rychlosti provádění, ale to bylo naopak částečně vyrovnáváno ekonomickou analýzou obou způsobů provádění. Velkou nevýhodou zkoumaného robota je jeho statické umístění v prostoru. Právě kvůli tomu zatím není úplně konkurenceschopný omítacímu robotu, popř. ručnímu provádění maleb. I přesto je zde velký potenciál a možnost postavit robota na pojízdný podvozek a využít všechny jeho vlastnosti naplno.

Dostáváme se do druhé poloviny hodnocení, pro kterou zbyly dva stavební procesy, u kterých se, dle analýzy použité v této práci, stále více vyplatí ruční technologie provádění. U obou činností jsou výsledky velmi těsné. Důvodů, proč zdění neuspělo v analýze tak dobře jako omítání či provádění maleb, je několik. Jednak rychlost provádění obou dříve zmíněných procesů byla rapidně vyšší, než je tomu u zdění, u kterého byla rychlost výstavby robotickou technologií pouze o přibližně 6 hodin rychlejší než u ručního provádění, což připadá urychlení o pouhých necelých 5 %. Velká hmotnost robota, na což navazuje i potřeba statického posouzení desky a její případné dodatečné vyztužení je dalším nezanedbatelným negativem robotického vyzdívání. V neposlední řadě je jím i nutná potřeba jeřábu k poměrně častým přesunům. Robot zkoumaný v této práci není schopný vlastního horizontálního pohybu, takže i pokud nepotřebujeme robota přesunout do dalšího nadzemního podlaží, je nutné použít jeřáb, což opět robotické vyzdívání prodraží. Na druhou stranu není zapotřebí lešení. Velkou výhodou do budoucna by, mimo již zmíněného šetření lidské práce a možnosti řízení více robotů z jednoho místa, mohlo být vyzdívání z nadrozměrných zdících prvků. Robotické rameno má na svém konci vysokou únosnost, tedy dává velký smysl vyzdívát domy z daleko větších a těžších tvárnic, než je možné v případě lidské práce. Tento fakt by rapidně urychlil a zjednodušil pracovní proces a robotické technologie ve výstavbě by byly ještě konkurenceschopnější.

Závěrečnou stavební činností, která byla hodnocena je provádění obkladů. Myslím si, že zajištění tohoto pracovního procesu robotickou technologií dává nejmenší smysl především díky poměrně krátké době provádění. Jelikož obkládání není tak časově náročné a není zastoupeno v takovém množství jako při prvních třech stavebních činnostech, je velmi těžké být právě těmto činnostem konkurencí. Navíc robot pro obkládání zkoumaný v této práci měl prakticky stejné výsledky jako ruční provádění obkladů v rychlosti provádění a v ekonomické analýze. Jedinou velkou výhodou, kterou by se robot mohl dostat na lepší příčky je jeho přesnost. Robotická technologie umí lepit obklady s vysokou přesností a spolehlivostí.

Myslím si, že robotické technologie jsou velkou budoucností stavebního průmyslu a v následujících letech budou moci šetřit lidské síly při náročných pracovních úkolech. Prakticky u všech čtyř zkoumaných technologiích dává robotizace v budoucnosti velký smysl, avšak je nutné vylepšit již zmíněné nedostatky a napomoci tak vývoji robota, který bude provádět svou práci s minimálním zásahem člověka. V jednotlivých analýzách nebyla tolik zmíněna poruchovost robotů, avšak i s tou je nutné počítat. Všechny stroje jsou poruchové a může se stát, že bude nutné vydat nemalé náklady na jejich opravu, při které nebudou nějakou dobu vykonávat svou činnost. Na druhou stranu, když je dělník nemocný či zraněný, také musíme počkat na jeho uzdravení, ať trvá kratší nebo delší dobu.

Použitá literatura

Použité elektronické dokumenty

- [1] KOVÁŘÍK, Michal. Prezentace "Robotické technologie ve stavebnictví". Speciální technologie (122SPTE). Katedra technologie staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2017 [cit. 2022-10-02].
- [2] JARSKÝ, Čeněk. Příprava a realizace staveb: multimediální učebnice [online]. Praha, 2004 [cit. 2022-10-19]. Dostupné z: <http://technologie.fsv.cvut.cz/aitom/podklady/online-priprava-demo/index.html>
- [4] USMANOV, Vjačeslav. Prezentace "Modelování výrobního stavebního procesu". Příprava a řízení projektů, využití výpočetní techniky (122PPVT). Katedra technologie staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2021 [cit. 2022-10-02].
- [6] Historický vývoj výstavby panelových domů. Panelové domy [online]. 2010 [cit. 2022-10-02]. Dostupné z: <http://panelovedomy.ekowatt.cz/stavebni-opatreni/57-historicky-vyvoj-vystavby-panelovych-domu.html>
- [7] KOVÁŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví. EARCH.cz [online]. 2018 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/technologie-3d-tisku-v-architekture-a-stavebnictvi>
- [8] Koncepce zavádění metody BIM v České republice. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. Září 2017, 49 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/bim/2017/10/Koncepce-zavadeni-metody-BIM-v-CR.pdf>
- [10] Level of detail for BIM. Designing buildings [online]. 15. 3. 2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Level_of_detail_for_BIM

- [11] KOVÁŘÍK, Michal. Prezentace "Trendy evropského stavebnictví: Digitalizace procesů ve stavebnictví". CIIRC ČVUT, TopExpo. [cit. 2022-10-23].
- [12] Digital Twin: už jste někdy potkali digitální dvojče?. IoTPORT [online]. 6. 4. 2020 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/digital-twin-uz-iste-nekdy-potkali-digitalni-dvoice>
- [13] SHRUTI, Dwivedi. 80/20 Rule| Pareto Principle | How does it help Product Managers?. Medium [online]. 10. 2. 2020 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://shrutiproductmanager.medium.com/80-20-rule-pareto-principle-how-does-it-help-product-managers-653a2cde69707>
- [14] LOBO, Luis. Pareto Principle: 80/20 Rule For Productivity — To Maximize Results. Medium [online]. 29. 9. 2021 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: <https://medium.com/@Thelouis/pareto-principle-80-20-rule-for-productivity-7d933f4fc11d>
- [15] Rešeršní databáze: Vyhledávací formulář patentů a užitných vzorů. Úřad průmyslového vlastnictví [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/webapp/!resdb.pta.frm>
- [16] USMANOV, Vjačeslav, Rostislav ŠULC a Illetško JAN. Robotický zdicí systém. Česká republika. Uděleno 27. 7. 2022.
- [17] 3D tisk nebo robotická stavba domu? Po 6000 letech se stavební technologie mění. Bydlení 12 [online]. 11. 10. 2019 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.bydleni12.cz/3d-tisk-nebo-roboticka-stavba-domu-po-6000-letech-se-stavebni-technologie-meni/>
- [18] JURČA, Martin. Stavební robot Hadrian X dokáže položit až 1000 cihel za hodinu. E15 [online]. 6. 8. 2017 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/magazin/stavebni-robot-hadrian-x-dokaze-polozit-az-1000-cihel-za-hodinu-1335604>
- [20] OKIBO Robotics: Autonomous robots for the application of wet materials in construction sites. Cemex ventures [online]. [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://www.cemexventures.com/projects/okibo-robotics/>

- [21] Robot Muralist. *Robot Muralist* [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.robotmuralist.com/>
- [22] GOLIATH AUTOMATION & ROBOTICS. Wall Painting Robots are the Future of Home Remodeling – MYRO. Goliath Automation & Robotics [online]. 24. 1. 2022 [cit. 2022-11-06]. Dostupné z: <https://automationroboticsarduino.com/blogs/uintelligence/wall-painting-robots-are-the-future-of-home-remodeling>
- [23] The world's first mobile intelligent paint robot: For interior painting in the construction industry. MYRO [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://myro.bot/>
- [24] YANG, Dong, Yongbin LI, Tiejun LI, Tian ZHANG, Ming HAN a Han YAN. The system design of external cladding installation robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2020, 17(6) [cit. 2022-10-25]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.1177/1729881420969062
- [25] HEJHÁLEK, Jan. Historie cihly od neolytu přes Babylon až po současnost. *Stavebnictví 3000* [online].e 23. 7. 2021 [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/historie-cihly>
- [28] Stavební postup Ytong. Xella [online]. 2020 [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: https://storefrontapi.commerce.xella.com/medias/sys_master/root/h2b/h4d/8817672880158/pracovni-postupy-www-09/pracovni-postupy-www-09.pdf?_ga=2.15104054.1212755848.1664633268-1408975670.1664633268
- [31] ŠULC, Rostislav. Prezentace "Dokončovací práce, Technologie povrchových úprav – vnitřní omítky". *Technologie staveb 02 (122TES2)*. Katedra technologie staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2020 [cit. 2022-11-01].
- [32] CERHOVÁ, Veronika. Jak připravit stěny před malováním. *Chatař chalupář* [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/jak-pripravit-steny-pred-malovanim/>

- [33] FLACHS, Ladislav. Malba Flachs. Malba Flachs [online]. [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.malba-flachs.cz/>
- [34] MOTYČKA, Vít. Procesy vnitřní a dokončovací – malby. In: Technologie stavebních prací II [online]. VUT v Brně, Fakulta stavební, 2005, 2005, s. 17 [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: <https://adoc.pub/queue/technologie-stavebnich-praci-iif86d02b90f159c2ae4dc1e2937c81d7583396.html#>
- [36] Diagnostika podkladu – pokládka obkladů a dlažeb. Estav.cz [online]. 28. 5. 2015 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/1658.diagnostika-podkladu-pokladka-obkladu-a-dlazeb>
- [37] ŠULC, Rostislav. Prezentace "Dokončovací práce, Technologie povrchových úprav – obklady". Technologie staveb 02 (122TES2). Katedra technologie staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2020 [cit. 2022-10-28].
- [38] Jak správně postupovat při lepení obkladu. Levelys [online]. 6. 8. 2020 [cit. 2022-10-28]. Dostupné z: <https://levelys.cz/blog/jak-spravne-postupovat-pri-lepeni-obkladu/>
- [39] Obkládání koupelny krok za krokem. Český Kutil [online]. 9. 2. 2021 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-10368-obkladani-koupelny-krok-za-krokem>
- [40] Technologické informace. Katedra technologie staveb – K122 [online]. [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <http://technologie.fsv.cvut.cz/vyuka/podklady-k-vyuce-education/technologicke-informace>
- [41] Robot Zedník / Robotický zdicí systém. YouTube [online]. 29. 11. 2021 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=466fj790X-M&ab_channel=RSPLaborato%C5%99proRobotizaciStavebn%C3%ADchProces%C5%AF

- [43] ARMS (SW pro robotické malby). YouTube [online]. 3. 5. 2020 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=1JVGZhMYh38&ab_channel=RSPLaborato%C5%99proRobotizaciStavebn%C3%ADchProces%C5%AF
- [45] HALUZA, Miroslav a Jan MACHÁČEK. Využití multikriteriální analýzy (MCA) pro hodnocení inteligentních elektroinstalací. *Tzbinfo* [online]. 14. 7. 2011 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/inteligentni-budovy/7651-vyuziti-multikriterialni-analyzy-mca-pro-hodnoceni-inteligentnich-elektroinstalaci>

Použitá tištěná literatura

- [3] MAŘÍK, Vladimír. Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [5] ZEWEDE, Kitaw. Analysis and Design of Precast - Cast in Situ Concrete Composite Bridges. Addis Ababa, 2005. Diplomová práce. School of Graduate Studies, Addis Ababa University.
- [9] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. Robot-oriented design: design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. Cambridge handbooks in construction robotics. ISBN 978-1-107-07638-9.
- [19] ILLETŠKO, Jan. Modelování technologických procesů za účelem robotického zdění. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Vjačeslav Usmanov, Ph.D.
- [26] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6007-1.

- [27] ČSN EN 1996-1-1+A1: Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro vyztužené a nevyztužené zděné konstrukce. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [29] BLAHA, Martin. Omítky. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0898-1.
- [30] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK a Rudolf FRIDRICH. Omítky. Brno: ERA group, 2004. Stavíme. ISBN 80-736-6004-0.
- [35] HÁJEK, Václav. Pozemní stavitelství pro 1. ročník SPŠ stavebních. 5., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-859-2081-6.
- [42] PODZIMEK, Antonín. Provádění omítek za pomoci robotického systému. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Kovářík.
- [44] RIENESSL, Patrik. Provádění dlažeb za pomocí robotického systému. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Vjačeslav Usmanov, Ph.D.
- [46] ŠUBRT, Tomáš. Ekonomicko-matematické metody. 3. upravené a rozšířené vydání. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2019. ISBN 978-80-7380-762-7.

Seznam zkratek

BIM	Building Information Model
CAD	Computer Aided Design
CZ	Česká republika (Czech republic)
Ev.	Eventuelně
LOD	Level of Detail
MCA	Multikriteriální analýza (Multicriteria analysis)
Např.	Například
Popř.	Popřípadě
Tzn	To znamená

Seznam obrázků

Obr. č. 1 – Stavební výroba	12
Obr. č. 2 – Průmyslová výroba.....	13
Obr. č. 3 – Tovární výroba	14
Obr. č. 4 – Staveništní výroba.....	15
Obr. č. 5 – Revoluce průmyslu.....	17
Obr. č. 6 – Paretovo pravidlo.....	24
Obr. č. 7 – Robotický zdící systém	25
Obr. č. 8 – Hadrian X vedle vystavěného RD	26
Obr. č. 9 – Hadrian X, koncová hlava.....	27
Obr. č. 10 – Hadrian X, zásobování.....	27
Obr. č. 11 – Omítací robot OKIBO	29
Obr. č. 12 – Robot pro malby Muralis	30

Obr. č. 13 – Robot pro malby MYRO	31
Obr. č. 14 – Robot pro obklady	32
Obr. č. 15 – Osazení prvního rohu.....	35
Obr. č. 16 – Kontrola výšky.....	35
Obr. č. 17 – Kontrola správné vazby.....	36
Obr. č. 18 – Nanášení maltového lože.....	36
Obr. č. 19 – Osazení omítníků	38
Obr. č. 20 – Strhávání omítky	38
Obr. č. 21 – Hrubé srovnání omítky pomocí 2 m latě	38
Obr. č. 22 – Nanášení omítky pomocí omítací pistole	38
Obr. č. 23 – Hlazení pomocí filcového hladítka.....	39
Obr. č. 24 – Finální úprava omítky pomocí ocelového hladítka.....	39
Obr. č. 25 – Ruční provádění maleb	40
Obr. č. 26 – Strojní provádění maleb	40
Obr. č. 27 – Obkladové dlaždice připevněné sponami.....	43
Obr. č. 28 – Proces obkládání metodou floating.....	43
Obr. č. 29 – Půdorys prvního patra řešeného rodinného domu.....	44
Obr. č. 30 – Půdorys druhého patra řešeného rodinného domu.....	44
Obr. č. 31 – Vizualizace řešeného rodinného domu	45
Obr. č. 32 – Proces zdění pomocí zdícího robota.....	48
Obr. č. 33 – Pozice zdícího robota 2.NP	50
Obr. č. 34 – Pozice zdícího robota 1.NP	50
Obr. č. 35 – Dosah robota ve 3D zobrazení.....	50
Obr. č. 36 – Výpočet zdění robotem pomocí výpočetního modelu	51
Obr. č. 37 – Virtuální model zdícího robota	52

Obr. č. 38 – Nanášení malty pomocí robota "Omítkař"	54
Obr. č. 39 – Výpočet omítání robotem pomocí výpočetního modelu	56
Obr. č. 40 – Pohyb omítacího robota 2.NP	57
Obr. č. 41 – Pohyb omítacího robota 1.NP	57
Obr. č. 42 – Nanášení jednotlivých pruhů pomocí robota	59
Obr. č. 43 – Výpočet provádění maleb robotem pomocí výpočetního modelu	60
Obr. č. 44 – Pozice robota provádějícího malby 2.NP	61
Obr. č. 45 – Pozice robota provádějícího malby 1.NP	61
Obr. č. 46 – Proces obkládání robotem	64
Obr. č. 47 – Výpočet provádění obkladů robotem pomocí výpočetního modelu	66
Obr. č. 48 – Pozice robota provádějícího obklady 1.NP	67
Obr. č. 49 – Pozice robota provádějícího obklady 2.NP	67

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Potenciál stavebních prací a jejich automatizace	22
Tabulka č. 2 – Dokončené byty a domy v roce 2021.....	23
Tabulka č. 3 – Výkaz výměr řešeného domu.....	45
Tabulka č. 4 – Výpočet doby trvání zdění člověkem	46
Tabulka č. 5 – Technická data zdícího robota	47
Tabulka č. 6 – Výpočet jednoho cyklu zdícího robota.....	48
Tabulka č. 7 – Proces zdění robotem a doba výstavby	49
Tabulka č. 8 – Výpočet doby trvání omítání člověkem	53
Tabulka č. 9 – Technická data omítacího robota.....	54
Tabulka č. 10 – Výpočet jednoho cyklu omítacího robota	55
Tabulka č. 11 – Proces omítání robotem a doba výstavby.....	55
Tabulka č. 12 – Výpočet doby trvání provádění maleb člověkem	58
Tabulka č. 13 – Technická data robota provádějícího malby.....	59
Tabulka č. 14 – Proces provádění maleb robotem a doba provádění	60
Tabulka č. 15 – Výpočet doby trvání provádění obkladů člověkem	62
Tabulka č. 16 – Technická data robota provádějícího obklady	63
Tabulka č. 17 – Výpočet jednoho cyklu robota provádějícího obklady	64
Tabulka č. 18 – Proces obkládání robotem a doba provádění.....	65
Tabulka č. 19 – Saatyho matice pro hodnocení kritérií.....	70
Tabulka č. 20 – Ekonomické porovnání robotického a ručního zdění	72
Tabulka č. 21 – Porovnání technologií zdění.....	73
Tabulka č. 22 – Ekonomické porovnání robotického a strojního omítání	74
Tabulka č. 23 – Porovnání technologií omítání	76
Tabulka č. 24 – Ekonomické porovnání robotické a ruční výmalby	77

Tabulka č. 25 – Porovnání technologií provádění maleb	78
Tabulka č. 26 – Ekonomické porovnání robotického a ručního obkládání ...	79
Tabulka č. 27 – Porovnání technologií provádění obkladů	80
Tabulka č. 28 – Celkové výsledky Saatyho metody	81

Seznam grafů

Graf č. 1 – Rozdělení nákladů během životního cyklu stavby	19
--	----

Seznam vzorců

Vzorec č. 1 – Saatyho matice.....	69
Vzorec č. 2 – Geometrický průměr řádků Saatyho matice.....	69
Vzorec č. 3 – Normalizace hodnot b_j	69