



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONSTRUKCE A APLIKACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VHODNÝCH PRO POUŽITÍ VE STAVEBNICTVÍ, V KONTEXTU ZÁSAD PRŮMYSL 4.0

CONSTRUCTION AND APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS SUITABLE FOR USE IN THE CIVIL
ENGINEERING CONSTRUCTION INDUSTRY, IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 PRINCIPLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Karel Procházka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
Akademický rok:	2024/25

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

Konstrukce a aplikace průmyslových robotů vhodných pro použití ve stavebnictví, v kontextu zásad Průmysl 4.0

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podrobný popis současného stavu v oblasti konstrukce a aplikace průmyslových robotů, včetně popisu podsystémů (pohony, řídicí systém, senzory, koncové efektory a jiné technologické hlavice), které jsou vhodné pro využití ve stavebnictví. Součástí BP je i uvedení příkladů, které lze v současnosti nalézt z praxe nebo z výzkumu a vývoje nových stavebních technologií. Nezbytnou součástí je i možnost aplikace průmyslových robotů ve stavebnictví v rámci zásad Průmyslu 4.0.

Cíle bakalářské práce:

Systémový rozbor řešené problematiky robotizace stavebních procesů s průmyslovými roboty (PR).

Rešerše známých řešení konstrukce a aplikace (tj. stávajících, praxí ověřených) pro stavební procesy.

Rešerše vhodných stavebních technologií pro použití v rámci robotizace stavebních činností (3D tisk, polymerbetony, zdění z prefabrikátů a podobně).

Trendy v oblasti nových, pokrokových způsobů v oblasti konstrukce a aplikace PR ve stavebnictví.

Začlenění PR ve stavebnictví v rámci zásad Průmyslu 4.0.

Vlastní závěry a/nebo doporučení pro další rozvoj řešené problematiky.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů VI. Čtvrté vydání. Praha: MM publishing, s. r. o., 2018. ISBN- 978-80-606310-8-3.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.).
Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady
vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEEng.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí a aplikací průmyslových robotů ve stavebnictví, a to v kontextu současných technologických trendů a principů Průmyslu 4.0. Cílem práce je provést systematickou analýzu možností nasazení robotických systémů do vybraných stavebních činností, konkrétně v oblastech 3D tisku betonových konstrukcí, robotického zdění, pokládky a vázání výztuže a vrtacích operací. Práce zahrnuje popis konstrukčních řešení průmyslových robotů, jejich podsystémů a koncových efektorů vhodných pro stavební procesy, včetně přehledu používaných technologií, materiálů (např. polymerbeton, geopolymery) a aktuálních trendů v oblasti automatizace, digitálního modelování a senzoriky. Dále se zaměřuje na možnosti integrace robotiky s metodami digitálního řízení výstavby (BIM, digitální dvojče, 4D/5D modelování) a uvádí doporučení pro další rozvoj v této oblasti – jak v globálním, tak i v tuzemském kontextu. Součástí práce je rovněž prezentace vlastních poznatků z Mezinárodního strojírenského veletrhu 2024 a návrhy řešení reagující na aktuální potřeby stavební praxe, včetně nedostatku pracovní síly a nízké produktivity výstavby.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the design and application of industrial robots in the construction industry, in the context of current technological trends and the principles of Industry 4.0. The aim of the thesis is to provide a systematic analysis of the potential deployment of robotic systems in selected construction activities, specifically in the areas of 3D concrete printing, robotic masonry, reinforcement placement and tying, and drilling operations. The thesis includes a description of the structural components of industrial robots, their subsystems and end-effectors suitable for construction processes, along with an overview of applicable technologies, materials (e.g., polymer concrete, geopolymers), and current trends in automation, digital modelling, and sensing technologies. It further explores the integration of robotics with digital construction management tools such as BIM, digital twins, and 4D/5D modelling, and provides recommendations for future development in both global and national contexts. The thesis also presents personal findings from the International Engineering Fair 2024 and proposes solutions responding to the current needs of construction practice, including labor shortages and low productivity in building processes.

KLÍČOVÁ SLOVA

Konstrukce a aplikace stavebních průmyslových robotů, robotické stavební technologie, robotizace a digitalizace ve stavebnictví, Průmysl 4.0

KEYWORDS

Construction industrial robots construction and application, robotic construction technologies, robotization and digitalization in construction industry, Industry 4.0

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Karel. *Konstrukce a aplikace průmyslových robotů vhodných pro použití ve stavebnictví, v kontextu zásad Průmysl 4.0*. Online, bakalářská práce. Radek KNOFLÍČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166121>. [cit. 2025-03-25].

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Radku Knoflíčkovi za odborné vedení, ochotu, jeho cenné rady, zpětnou vazbu a čas věnovaný mé bakalářské práci. Dále chci také poděkovat mé rodině a přátelům za jejich plnou podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Radka Knoflíčka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 14.5.2025

.....

Procházka Karel

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY ROBOTIZACE STAVEBNÍCH PROCESŮ S PRŮMYSLOVÝMI ROBOTY	19
2.1	Struktura průmyslových robotů pro stavebnictví.....	23
2.1.1	Subsystém machineware (MW).....	23
2.1.2	Subsystém hardware (HW).....	35
2.1.3	Subsystém software (SW)	37
2.1.4	Subsystém brainware (BW).....	41
2.2	Vlivy prostředí na provoz průmyslových robotů	42
2.2.1	Klimatické a environmentální vlivy	42
2.2.2	Mechanické a dynamické vlivy	43
2.2.3	Elektromagnetické rušení	44
2.3	Životní cyklus průmyslových robotů ve stavebnictví.....	45
2.3.1	Návrh a vývoj	45
2.3.2	Implementace a uvedení do provozu	46
2.3.3	Provoz a údržba	46
2.3.4	Modernizace a přizpůsobení novým technologiím.....	47
2.3.5	Recyklace a ekologická likvidace.....	48
2.4	Ekonomické aspekty životního cyklu robotů.....	49
2.5	Bezpečnostní a legislativní aspekty provozu	50
3	ŘEŠERŠE ZNÁMÝCH ŘEŠENÍ KONSTRUKCE A APLIKACE PRO STAVEBNÍ PROCESY	53
3.1	Hadrian X®.....	53
3.1.1	Inteligentní ovládací systém	53
3.1.2	Systém plnění robotu a příprava tvárnice	53
3.1.3	Dynamic Stabilisation Technology™.....	54
3.2	Next-Gen Hadrian X®	54
3.2.1	Hlavní vylepšení oproti modelu Hadrian X®.....	55
3.3	WLTR	55
3.3.1	Technické parametry	56
3.3.2	Manipulační a přepravní vlastnosti robotu	58
3.3.3	Cihly a pojiva využívaná pro robotické zdění	58
3.3.4	Sekvence pracovního cyklu robotu.....	60
3.3.5	Vhodné konstrukční situace.....	61
3.3.6	Perspektivy a technologické výzvy	61
3.4	BOD2	61
3.4.1	Konstrukce, přednosti a technické specifikace	62
3.4.2	Oblasti využití.....	63
3.4.3	Materiály.....	65
3.4.4	Systém dopravy materiálu	66
3.4.5	Porovnání portálové 3D tiskárny a řešení s robotickým ramenem.....	67
3.5	BOD3	67
3.5.1	Hlavní vylepšení oproti modelu BOD2	68
3.5.2	Význam pro rozvoj stavební robotizace	69
3.6	Modulární tiskové řešení společnosti XtreeE	69
3.6.1	Technické parametry	69

3.6.2	Tiskové hlavy	69
3.6.3	Základna robotu.....	70
3.6.4	Používané materiály a pojiva	71
3.6.5	Sekvence pracovního cyklu.....	71
3.6.6	Software	71
3.6.7	Vhodné konstrukční aplikace	72
3.6.8	Perspektivy a technologické výzvy	72
3.7	IRONBOT	72
3.7.1	Konstrukce a princip činnosti.....	73
3.7.2	Omezení a specifika využití	74
3.8	TYBOT	74
3.8.1	Konstrukce a princip činnosti.....	75
3.8.2	Omezení a specifika využití	77
3.9	JAIBOT	77
3.9.1	Konstrukční řešení a hlavní subsystémy	78
3.9.2	Pracovní proces a způsob ovládání	78
3.9.3	Přínosy nasazení systému.....	78
3.9.4	Limity a podmínky efektivního nasazení	78
4	REŠERŠE VHODNÝCH STAVEBNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO POUŽITÍ V RÁMCI ROBOTIZACE STAVEBNÍCH ČINNOSTÍ	80
4.1	Robotické zdění	80
4.1.1	Princip technologie.....	80
4.1.2	Výhody technologie	81
4.1.3	Typické oblasti použití	81
4.1.4	Omezení technologie.....	81
4.1.5	Perspektivy dalšího vývoje.....	82
4.2	3D tisk stavebních konstrukcí	82
4.2.1	Princip technologie.....	82
4.2.2	Způsoby nanášení materiálu.....	83
4.2.3	Rozšíření a význam jednotlivých technologií	84
4.2.4	Přínosy, výzvy a možné směry dalšího rozvoje	85
4.3	Pokládka výztužných prutů	85
4.3.1	Princip technologie.....	86
4.3.2	Výhody technologie	86
4.3.3	Oblasti využití	87
4.4	Vázání výztužných prutů	87
4.4.1	Princip technologie.....	87
4.4.2	Výhody technologie	88
4.4.3	Oblasti využití	89
4.5	Robotické vrtání	89
4.5.1	Princip technologie.....	89
4.5.2	Výhody technologie	90
4.5.3	Oblasti využití	90
5	TRENDY V OBLASTI NOVÝCH, POKROKOVÝCH ZPŮSOBŮ V OBLASTI KONSTRUKCE A APLIKACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE STAVEBNICTVÍ.....	92
5.1	Rozšíření robotických aplikací v dokončovacích a specializovaných stavebních operacích.....	92
5.2	BIM jako nástroj integrace	92

5.3	Autonomní navigace, strojové vidění a vnímání prostředí	93
5.4	Umělá inteligence v adaptivním řízení a plánování.....	93
5.5	Decentralizované a kolaborativní robotické systémy	94
5.6	Shrnutí.....	94
6	ZAČLENĚNÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE STAVEBNICTVÍ V RÁMCI ZÁSAD PRŮMYSLU 4.0.....	96
6.1	Významné technologie průmyslových robotů v rámci Průmyslu 4.0.....	96
6.1.1	Pokročilá sensorika a autonomní navigace	96
6.1.2	Umělá inteligence a adaptivní řízení	96
6.1.3	Digitální dvojčata a simulace stavebních operací.....	96
6.1.4	Automatizované manipulační a montážní systémy	96
6.2	Výhody integrace průmyslových robotů do stavebnictví	96
6.3	Výzvy a překážky při implementaci průmyslových robotů.....	97
6.3.1	Vysoké pořizovací náklady	98
6.3.2	Integrace robotů do dynamického prostředí stavenišť.....	98
6.3.3	Požadavky na odbornost a kvalifikaci při implementaci robotických řešení ..	98
6.3.4	Psychologická bariéra a konzervativní přístup k technologickým inovacím ..	98
6.3.5	Regulační a legislativní překážky	98
6.3.6	Digitální propast a nerovnoměrná dostupnost technologií	98
6.3.7	Kybernetická rizika a zranitelnost digitálních systémů	98
6.3.8	Nestabilní dodávky elektrické energie jako limitující faktor automatizace	99
6.3.9	Regionální a globální politicko-ekonomické překážky	99
6.3.10	Omezení související s internetem věcí (IoT) ve stavebnictví.....	99
7	VLASTNÍ POZNATKY A NOVINKY NA MEZINÁRODNÍM STROJÍRENSKÉM VELETRHU 2024.....	100
7.1	FANUC (Japonsko)	100
7.2	YASKAWA (Japonsko)	107
7.3	ABB (Švýcarsko/Švédsko)	107
7.4	KUKA (Německo).....	109
7.5	MITSUBISHI (Japonsko)	111
7.6	STÄUBLI (Švýcarsko)	112
7.7	COMAU (Itálie).....	114
7.8	PANASONIC (Japonsko).....	115
7.9	DOOSAN ROBOTICS (Jižní Korea)	116
7.10	DOBOT (Čína)	117
7.11	CLOOS (Německo)	118
7.12	UNIVERSAL ROBOTS (Dánsko)	119
7.13	CROBOTP (Čína).....	120
7.14	FRUITCORE ROBOTICS (Německo)	120
7.15	IGM (Rakousko)	121
7.16	SCHNEIDER ELECTRIC (Francie)	122
7.17	IGUS (Německo)	122
7.18	AUBO (Čína).....	123
7.19	SOFTBANKROBOTICS (Japonsko)	123
7.20	RENISHAW (Velká Británie)	124
8	VLASTNÍ ZÁVĚRY A/NEBO DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ ROZVOJ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	125
8.1	Obecná doporučení pro globální rozvoj.....	125
8.2	Doporučení pro Českou republiku	126

9	ZÁVĚR.....	127
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	129
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	135
11.1	Seznam tabulek.....	136
11.2	Seznam obrázků.....	137

1 ÚVOD

Stavební výroba se dlouhodobě vyznačuje vysokým podílem ruční práce, nízkým stupněm digitalizace a omezenou mírou automatizace ve srovnání s ostatními průmyslovými odvětvími. Tento stav však začíná být z dlouhodobého hlediska neudržitelný – a to jak z pohledu nedostatku kvalifikované pracovní síly, tak i vzhledem k rostoucím požadavkům na kvalitu, přesnost, rychlost výstavby, bezpečnost práce a environmentální zátěž. V této souvislosti je stále častěji diskutováno nasazení průmyslových robotických systémů také do procesů spojených s výstavbou pozemních a inženýrských staveb.

Zatímco v automobilovém, elektrotechnickém nebo strojírenském průmyslu je robotizace běžně zavedeným výrobním standardem, ve stavebnictví se jedná stále o oblast s výrazným inovačním potenciálem, která však čelí řadě specifických překážek. Hlavními limitujícími faktory jsou zejména vysoká variabilita stavebního prostředí, nízká úroveň standardizace pracovních operací, chybějící legislativní a normativní rámec, a v neposlední řadě i pomalá adaptace nových technologií ze strany tradičně orientovaných stavebních podniků. Přesto je možné již dnes identifikovat první aplikace robotických technologií v oblasti výstavby – ať už se jedná o 3D tisk betonových konstrukcí, robotické zdění, automatizované vázání výztuže, nebo robotické vrtání a montážní činnosti. Tyto příklady představují důležité kroky směrem k budoucí transformaci celého oboru.

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí a aplikací průmyslových robotů vhodných pro nasazení ve stavební výrobě. Cílem je podat systematický přehled současného stavu, představit konkrétní technologická řešení a analyzovat možnosti jejich využití v praxi. Důraz je kladen na popsání konstrukčních principů robotických systémů, subsystémů (včetně pohonů, řídicích jednotek, senzoriky a koncových efektorů), a na způsoby jejich uplatnění při realizaci stavebních činností. Práce se zároveň věnuje i možnostem využití pokročilých materiálů vhodných pro robotizované aplikace, jako jsou polymerbetony či směsi pro aditivní výrobu, a trendům v oblasti digitálního řízení stavebních procesů, zejména s využitím metodiky BIM, principu digitálního dvojčete nebo senzorických systémů.

Zvláštní pozornost je věnována začlenění průmyslových robotů v kontextu zásad Průmyslu 4.0 – tedy s důrazem na propojení automatizace, autonomních systémů, umělé inteligence a datově řízené výstavby. Výstupem práce jsou nejen odborné závěry, ale i doporučení pro další rozvoj této problematiky, a to jak z pohledu technického vývoje, tak i implementace do podmínek českého stavebního prostředí, které se dnes potýká například s nedostatkem pracovních sil a dlouhodobou neefektivitou výstavby.

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY ROBOTIZACE STAVEBNÍCH PROCESŮ S PRŮMYSLOVÝMI ROBOTY

Robotizace stavebních procesů představuje významný trend v moderním stavebnictví, který umožňuje vyšší přesnost, produktivitu a bezpečnost stavebních operací. Díky nejnovějším technologickým pokrokům jsou stavební roboty schopny provádět složité úkoly s vyšší efektivitou než tradiční pracovní síla, čímž se snižuje chybovost a zvyšuje kvalita výsledné práce. Přestože robotizace představuje klíčové téma výzkumu v oblasti stavebnictví, stále chybí dostatečné analytické studie mapující její rozvoj a budoucí trendy.

V posledních letech prošel stavební sektor zásadní proměnou díky rostoucí integraci pokročilých robotických systémů. Tyto systémy využívají sofistikované senzory, akční členy a inteligentní algoritmy, které jim umožňují pohybovat se ve složitých prostředích, manipulovat s těžkými materiály a provádět náročné úkoly s minimální potřebou lidského zásahu. Vývoj vysoce autonomních stavebních robotů otevírá cestu ke zvýšení bezpečnosti práce na staveništích, neboť jejich nasazení snižuje riziko pracovních úrazů a eliminuje nutnost lidské přítomnosti v nebezpečných podmínkách.

Z ekonomického hlediska přitahují stavební roboty pozornost investorů a stavebních firem díky svému potenciálu výrazně zvýšit produktivitu a současně snížit náklady na pracovní sílu. Efektivnější využívání materiálů a optimalizace stavebních procesů vede ke zkrácení doby realizace projektů a snižuje provozní náklady. S rostoucí mírou integrace robotických technologií se očekává změna tradičních stavebních postupů, zlepšení koordinace pracovních procesů a posílení konkurenceschopnosti celého odvětví.

V kontextu bezpečnosti práce představují robotické systémy zásadní inovaci. Zatímco lidská pracovní síla vyžaduje rozsáhlá bezpečnostní opatření, roboty mohou operovat v extrémních podmínkách, například na rizikových staveništích nebo v těžko dostupných oblastech. Tím se nejen minimalizují náklady na bezpečnostní opatření, ale také se zvyšuje efektivita práce v prostředích, kde je lidská přítomnost problematická.

Kromě přímých provozních výhod přispívá robotizace stavebnictví i k udržitelnému rozvoji. Díky vyšší přesnosti prováděných operací dochází k omezení materiálového odpadu, což významně snižuje ekologickou stopu stavebních projektů. Využití stavebních robotů tak zapadá do rostoucího důrazu na udržitelné a ekologicky šetrné stavební postupy, které se stávají nedílnou součástí moderního stavebnictví [\[1\]](#).

„Průmyslový robot je autonomně fungující stroj – automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí apod.), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí.“ [\[2\]](#).

Z výše uvedené definice podle prof. P. N. Beljanina vyplývá, že průmyslové roboty (dále už jen PR) nejsou pouhými automatizovanými nástroji, ale musí být schopny samostatně

vykonávat pracovní operace, vnímat okolní prostředí, analyzovat situace a přizpůsobovat se měnícím podmínkám [2].

V oblasti stavebnictví nacházejí PR uplatnění především v následujících oblastech:

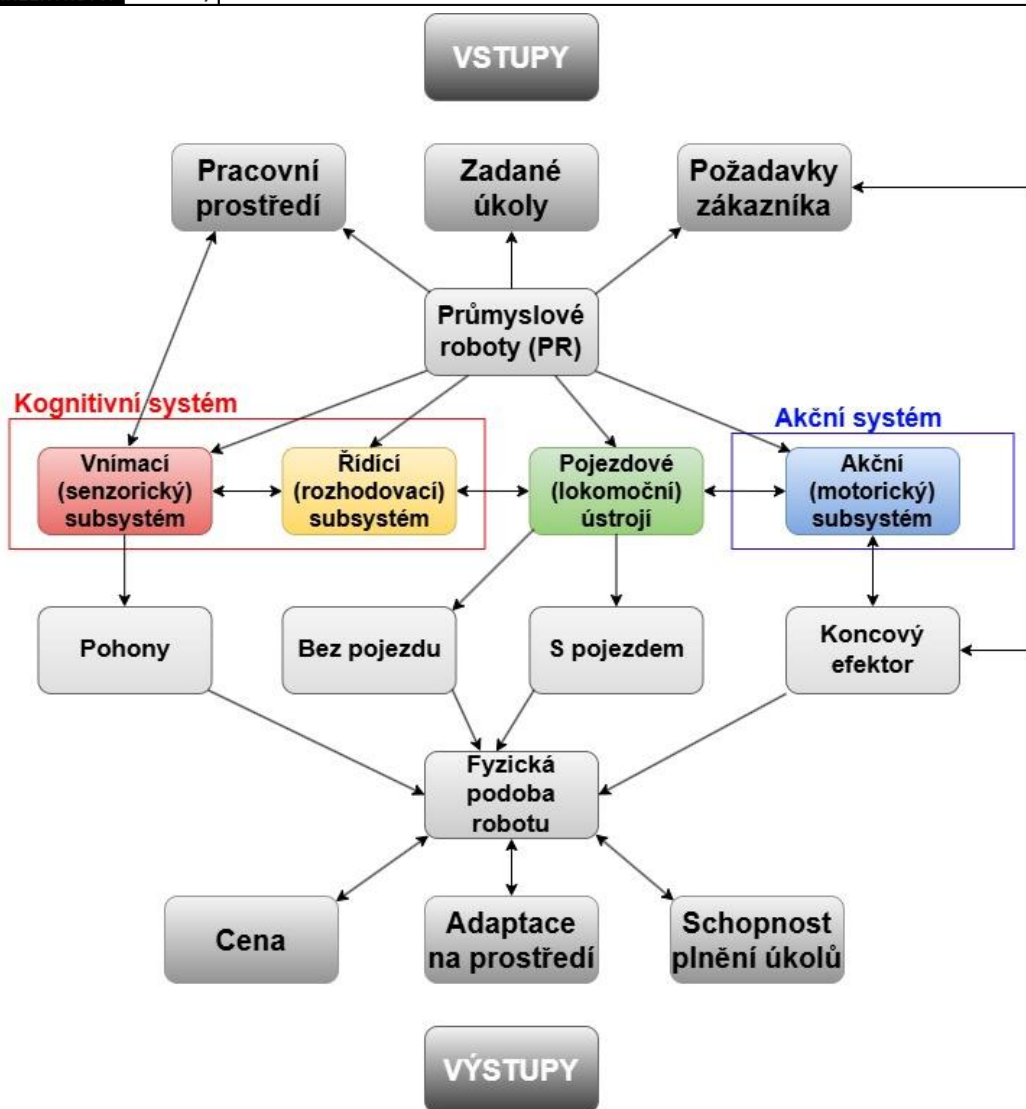
- 3D tisk betonových či maltových konstrukcí – tato technologie umožňuje automatizovanou výstavbu obytných budov vrstvu po vrstvě s vysokou přesností a minimálním odpadem [3].
- Automatizované zdění z cihel s extrémní přesností – pokládka stavebních bloků a nanášení stavebního lepidla s vysokou přesností a rychlostí [1].
- Automatizovaná manipulace s materiály – přesné přemísťování těžkých prefabrikovaných prvků na staveništi [3].

Systémy moderní robotizace jsou nedílnou součástí konceptu Průmyslu 4.0, který zahrnuje propojení robotických systémů s digitálními modely stavby (BIM), senzory pro internet věcí (IoT) a pokročilými algoritmy umělé inteligence. Díky těmto technologiím roboty autonomně reagují na proměnlivé podmínky staveniště, což jim umožňuje efektivní koordinaci s ostatními stavebními procesy [1], [4].

Tato kapitola se zaměřuje na systémový rozbor problematiky robotizace stavebních procesů, přičemž zásadní aspekty budou:

- Mechanická struktura PR a jejich klíčové komponenty,
- Vlivy prostředí na provoz průmyslových robotických systémů,
- Životní cyklus stavebních PR,
- Ekonomické aspekty implementace PR ve stavebnictví,
- Legislativní omezení a bezpečnostní normy související s průmyslovou robotizací stavebních prací.

Nasazení robotických systémů ve stavebnictví přináší významné technologické i ekonomické přínosy, avšak zároveň klade nové nároky na adaptaci pracovních postupů, infrastruktury i regulační rámec. Podrobná analýza těchto aspektů umožní identifikovat stěžejní výzvy a perspektivy dalšího rozvoje robotizace v sektoru stavebnictví [1].



Obr. 1) Systémový rozbor PR (Autor: Karel Procházka)

PR představují integrovaný kybernetický systém skládající se tří subsystémů:

- Vnímací (senzorický) subsystém
- Řídící a rozhodovací subsystém
- Akční (motorický) subsystém

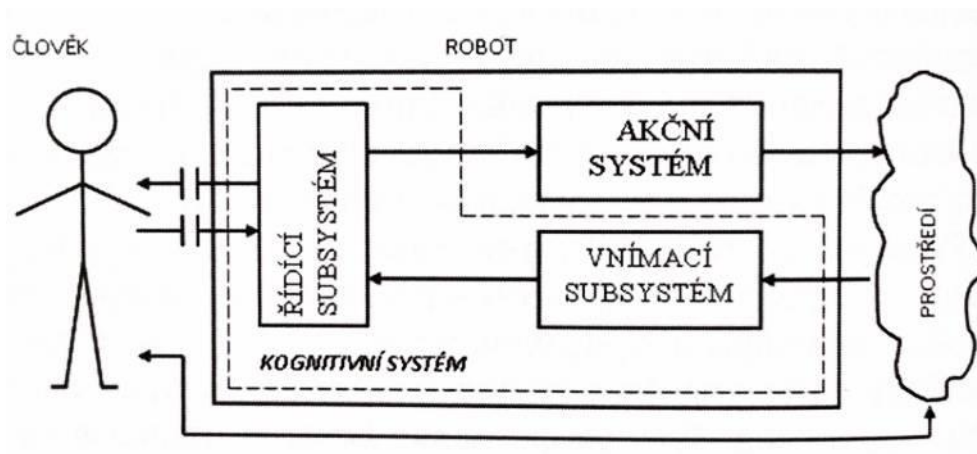
Vnímací subsystém je tvořen senzory pro:

- Vnitřní informaci
- Vnější informaci z pracovního prostředí

Řídící a rozhodovací subsystém tvoří „mozek“ robotu a skládá se ze zařízení pro:

- Vytvoření programu
- Reprodukci programu
- Zapamatování programu
- Vykonání programu

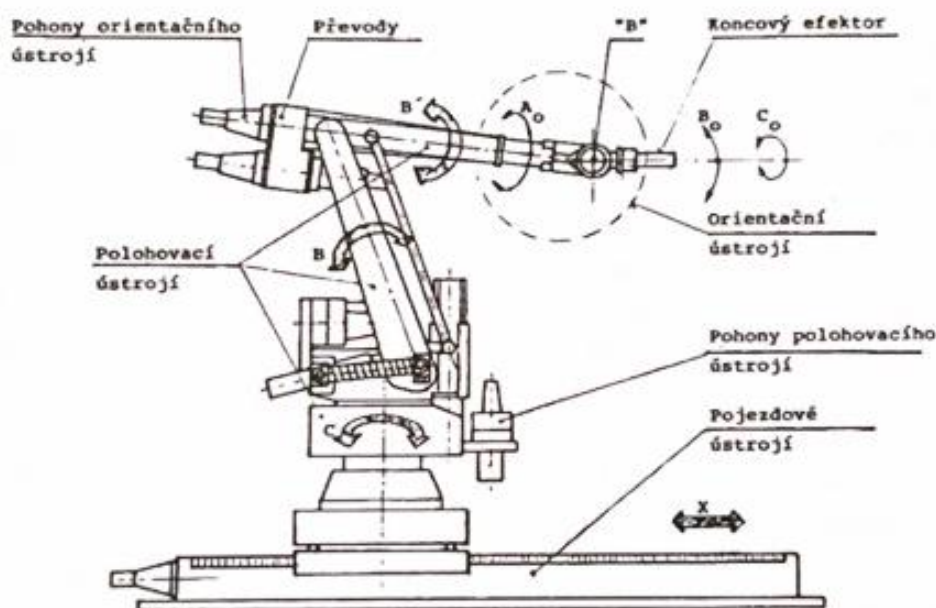
Vnímací a řídicí subsystémy společně tvoří tzv. kognitivní systém [2].



Obr. 2) Systémové pojetí PR [2]

Z konstrukčního hlediska se rozděluje na:

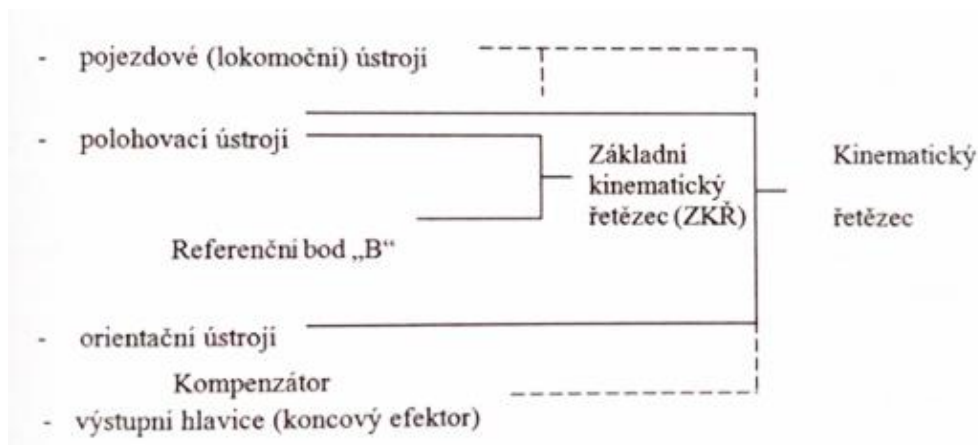
- Pojezdové (lokomoční) ústrojí
- Polohovací ústrojí
- Orientační ústrojí
- Koncové efekty (výstupní hlavice) [2].



Obr. 3) Rozdělení akčního systému PR umístěného na přidavném translačním pojezdovém ústrojí, translační pohyby ve směru os X, Y, Z a rotace A, B, C kolem těchto os [2]

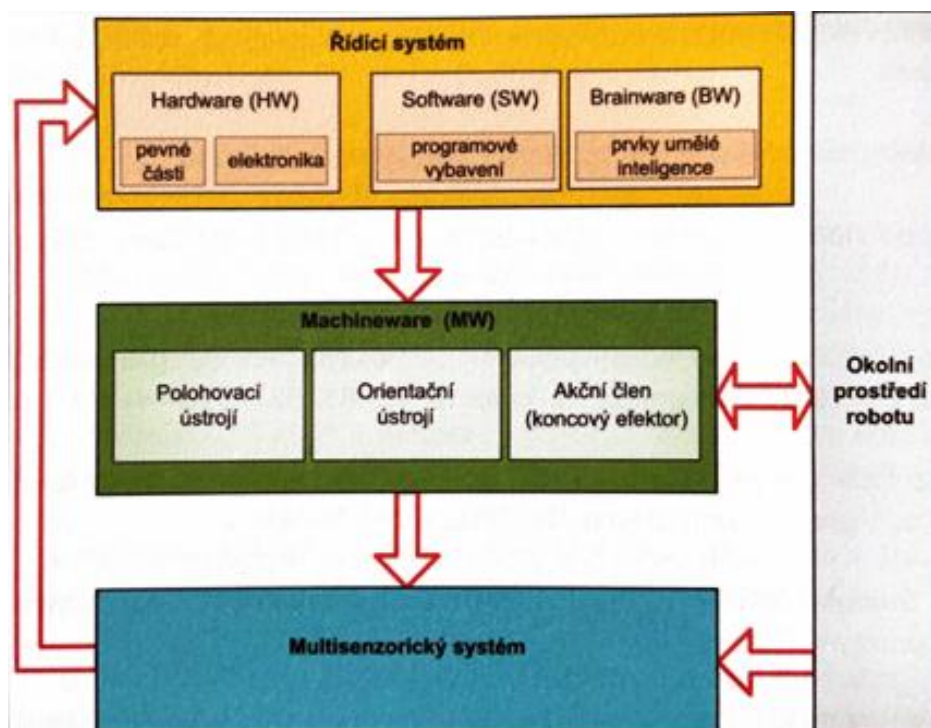
Mezi polohovacím a orientačním ústrojím je definován referenční bod označený jako „B“. Tento bod představuje společně s polohovacím ústrojím základní kinematický řetězec (ZKŘ), který v některých případech může částečně zasahovat i do pojezdového mechanismu robotu. Kinematický řetězec (KŘ) jako celek sestává ze základního kinematického řetězce a navazujícího orientačního ústrojí. Mezi orientačním ústrojím a výstupní hlavici bývá obvykle zařazen kompenzační mechanismus, jehož úkolem je eliminace kumulovaných odchylek

polohy a zajištění požadované přesnosti a opakovatelnosti trajektorie efektoru vůči pracovnímu prostoru [2].



Obr. 4) Schéma rozdělení akčního systému PR [2]

2.1 Struktura průmyslových robotů pro stavebnictví



Obr. 5) Adaptivní PR jako soustava konstrukčních uzlů, skupin a součástí [2]

2.1.1 Subsystém machineware (MW)

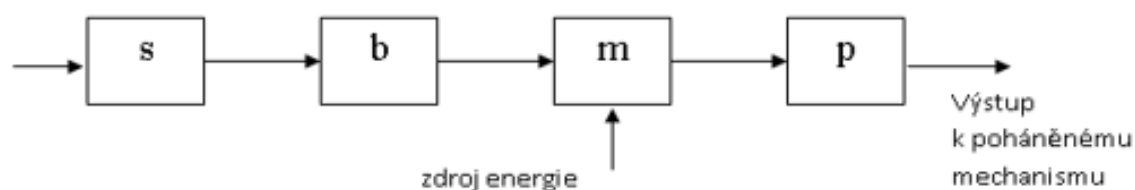
Jedná se o řídicí a výkonovou vrstvu mezi hardwarem a softwarem robotu zajišťující převod řídicích signálů na pohyb a propojení všech komponent systému [5].

Polohovací ústrojí:

- Pohonné jednotky

Pohonné jednotky zajišťují pohyb jednotlivých částí robotu a přenos mechanické síly pro manipulaci se stavebními prvky. U PR se ustálilo tzv. centrické uspořádání pohonné jednotky, kdy jeden montážní a funkční blok obsahuje právě tyto komponenty:

- (s) snímač (polohy, rychlosti, otáček, úhlového natočení)
- (b) brzda
- (m) motor
- (p) převodovka [\[6\]](#)



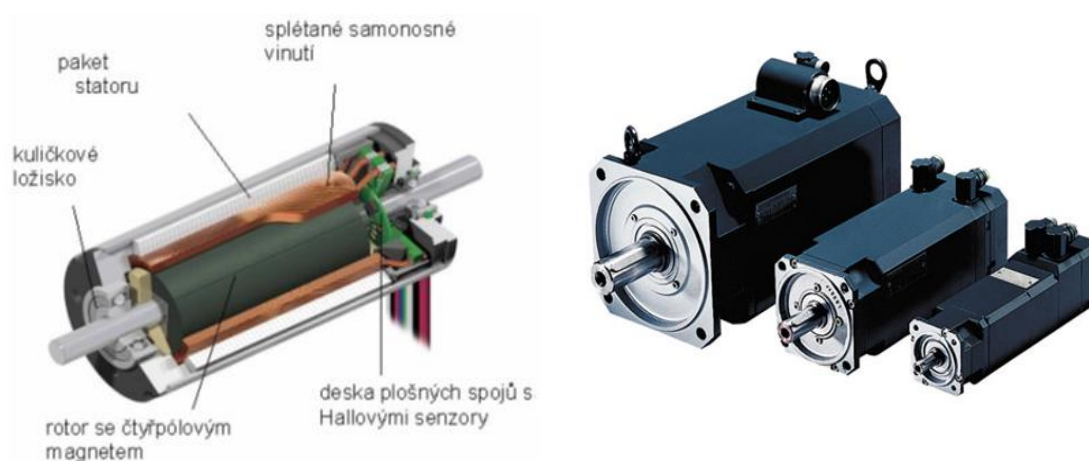
Obr. 6) Centrické uspořádání pohonné jednotky [\[6\]](#)

V závislosti na specifických požadavcích stavebních operací se využívají následující typy pohonů:

- Elektrické pohony a servopohony

-dělí se na stejnosměrné (DC) a střídavé (AC)

-umožňují vysokou přesnost a plynulost pohybu, využívají se především v kloubových robotech a robotických pažích [\[2\]](#)

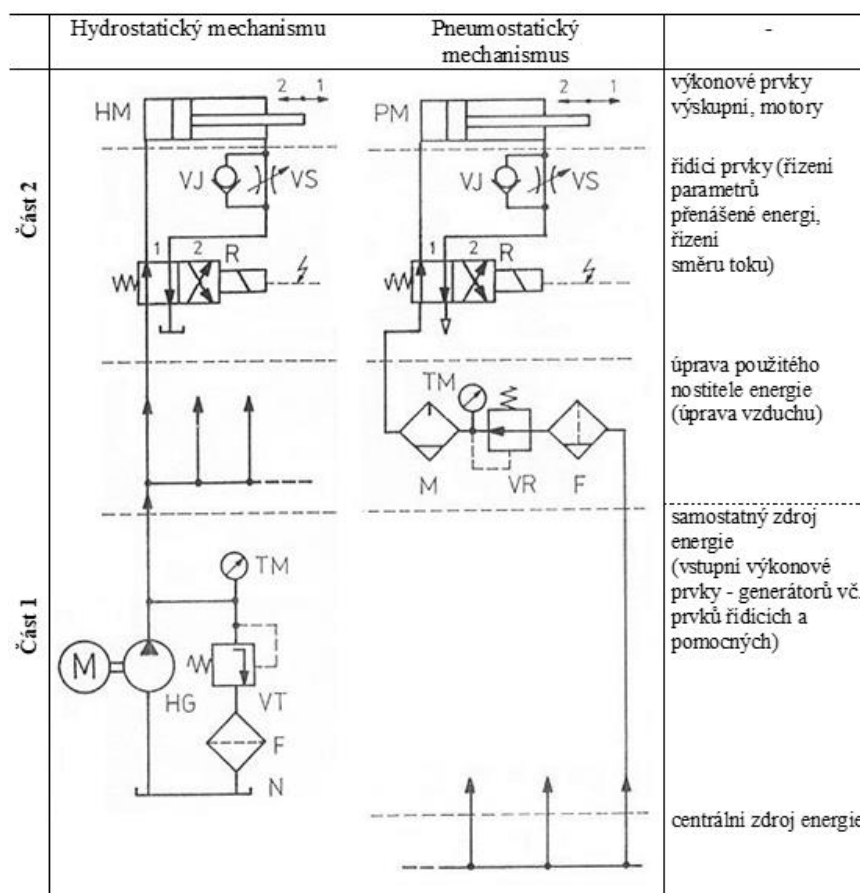


Obr. 7) Na obrázku vlevo se nachází elektrický stejnosměrný pohon (DC), vpravo elektrický střídavý servopohon (AC) [\[6\]](#)

- Tekutinové pohony

-hydraulické pohony a servopohony poskytují vysoký výkon a jsou vhodné pro manipulaci s těžkými konstrukčními prvky, například při demolici nebo montáži velkorozměrových prefabrikátů

-pneumatické pohony nacházejí uplatnění u aplikací s vysokou rychlostí a opakovatelností, například při nanášení omítek, injektáži betonu nebo montáži lehkých stavebních komponentů [2]



Obr. 8) Příklady hydraulického a pneumatického schématu [6]

- Kombinované pohony

-praktický význam mají pohony elektrohydraulické a pneumohydraulické

Moderní pohonné systémy bývají vybaveny integrovanými senzory, které sledují mechanické zatížení, umožňují prediktivní údržbu a optimalizují spotřebu energie [2], [7], [8].

b) Převodovky

V případě stavebních PR pracujících velmi často v náročném, nepředvídatelném prostředí s obrovskými zatíženími, se uplatňují převodové mechanismy zajišťující vysokou nosnost, robustnost, odolnost vůči rázům a zároveň dostatečnou pevnost. Polohová přesnost zde není natolik stěžejní jako u PR v klasickém strojírenství, ale důraz je kladen spíše na mechanickou výdrž.

- Planetové

Jedná se o nejrozšířenější typ v robotických pohonech, díky vysoké robustnosti a přizpůsobivosti různým typům mechanických struktur hojně využívaný i ve stavebních robotických systémech (např. pro řízení ramen, podvozků nebo zdvihacích mechanismů).

Výhody:

-vysoká přenosová kapacita momentu

- kompaktní konstrukce
- vysoká účinnost (až 97 %)
- modulární konstrukce vhodná pro kombinaci s elektromotory [\[9\]](#)

- Cykloidní

Objevují se v ramenech stavebních robotů, kde je nutná vyšší tuhost a odolnost vůči nárazovému zatížení např. při manipulaci s těžkými prefabrikáty, robotická pokládka cihel.

Výhody:

- malá vůle
- vysoká torzní tuhost
- odolnost vůči přetížení a vibracím [\[10\]](#)

- Šnekové

Jejich využití lze najít v některých osách, kde není prioritní rychlost, ale spíše samosvornost nebo při výpadku napájení, kdy dojde k blokaci i bez brzdy (např. zvedací systémy).

Výhody:

- samosvornost (nevratný chod)
- kompaktní rozměry
- tlumí nárazy [\[2\]](#)

- Hřebeny a pastorky

Zejména v portálových robotech, podélných pojezdech nebo jeřábových aplikacích.

Výhody:

- přímý převod rotačního pohybu na lineární
- vysoká nosnost a jednoduchá údržba
- možnost dlouhých drah bez omezení zdvihu [\[2\]](#)

- Harmonické

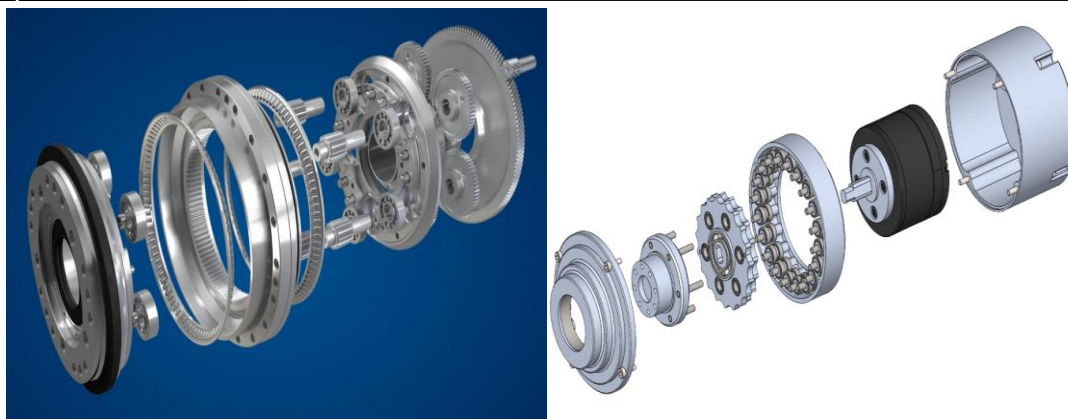
K použití u stavebních robotů dochází výjimečně. Spíše v místech, kde je požadována kompaktnost a přesnost, například u koncových efektorů.

Nevýhody:

- nízká odolnost vůči nárazovému zatížení
- nízká robustnost vůči znečištění
- nedostatek vhodných velikostí pro těžké aplikace
- obtížnější servis a výměna

Výhody:

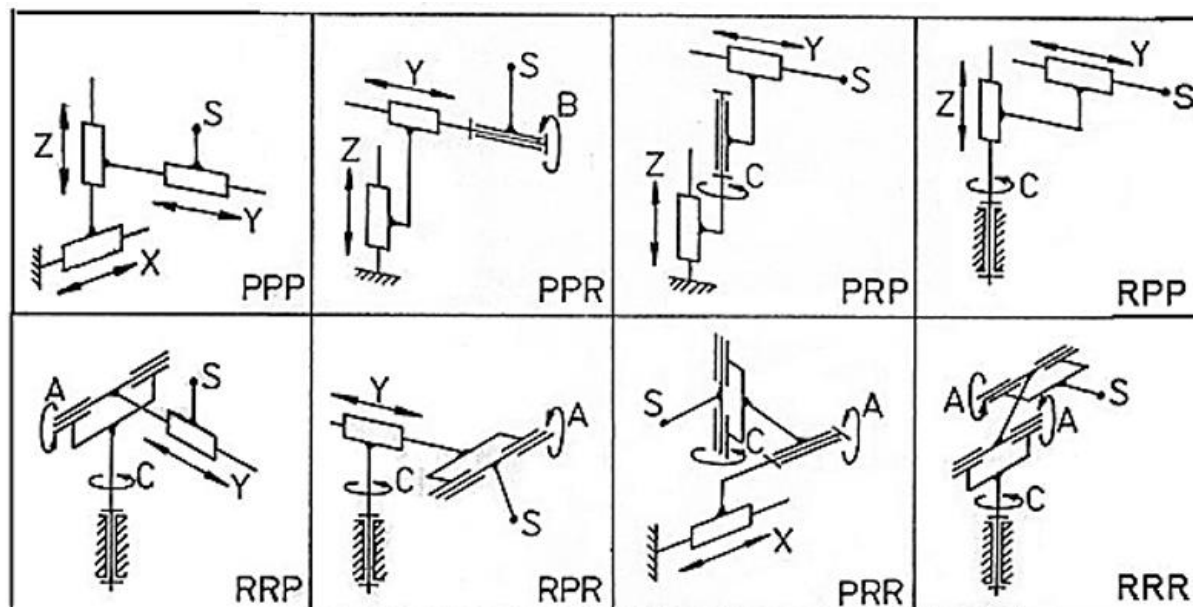
- nulová vůle
- vysoký převodový poměr v malém objemu [\[11\]](#)



Obr. 9) Vlevo se nachází planetová a vpravo cykloidní převodovka a jejich jednotlivé komponenty [9]

c) Nosná konstrukce

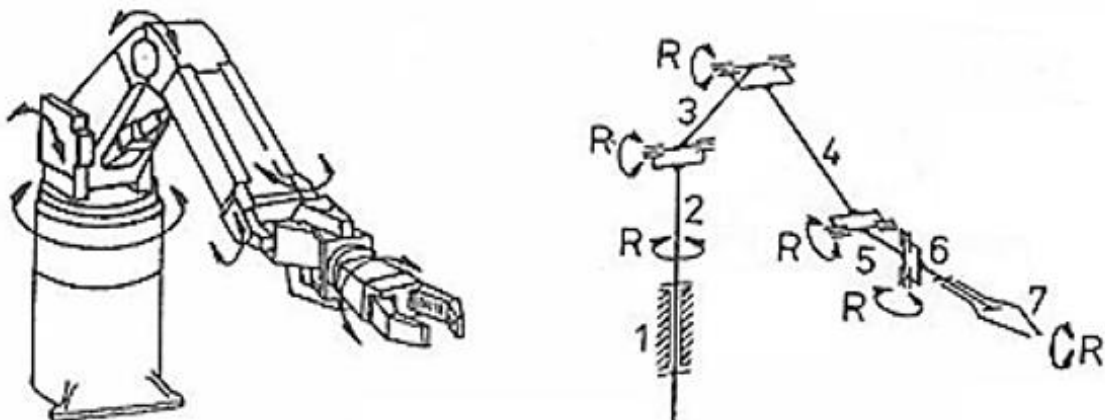
Nosná konstrukce je tvořena hlavním rámem robotu, který zajišťuje jeho celkovou stabilitu a umožňuje uchycení dalších systémů.



Obr. 10) Základní řetězce PR s vyznačením pořadí kinematických dvojic posuvných/translačních (P/T) a rotačních (R) [6]

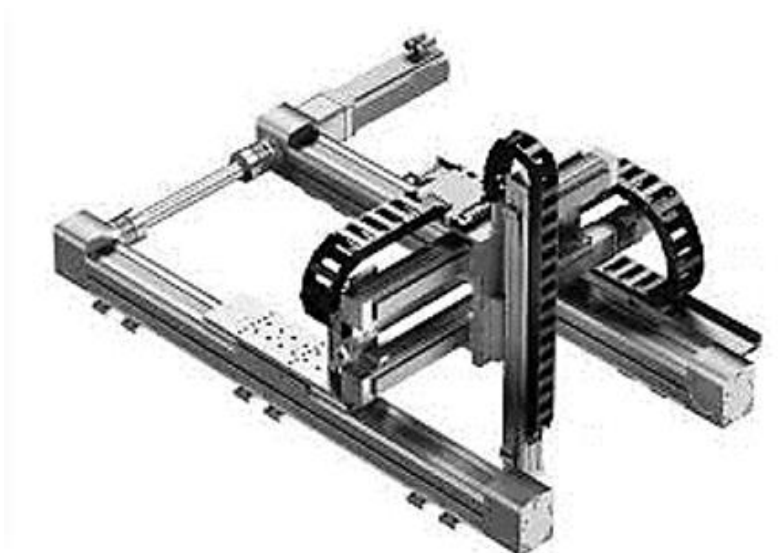
Podle typu konstrukčního uspořádání se stavební PR dělí na:

- Kloubové (antropomorfní) PR – jejich pracovní prostor je (RRR) a využívají víceosé rotační spoje, které umožňují provádět obecný prostorový pohyb pomocí kinematických řetězců se 6-ti stupni volnosti [2]



Obr. 11) Obecný prostorový pohyb realizovaný pomocí kinematických řetězců se 6-ti stupni volnosti [\[6\]](#)

- Portálové (lineární) roboty – pracují v přímých drahách a operují v omezeném počtu stupňů volnosti (TTT pracovní prostor), což je činí vhodnými pro nanášení stavebních směsí nebo 3D tisk konstrukcí [\[2\]](#)



Obr. 12) Typický příklad lineárního vedení kinematického řetězce TTT koncepce FESTO a doplnit zdroj [\[6\]](#)

- Mobilní roboty – disponují kolovými, pásovými nebo kráčejícími podvozky, které jim umožňují autonomní pohyb po staveništi a manipulaci s materiálem přímo v místě výstavby [\[2\]](#)



Obr. 13) Mobilní PR Waveshare Jetank AI Kit [12]

Nosná konstrukce musí být vyrobena z materiálů s vysokou pevností a nízkou hmotností, například z hliníkových slitin, kompozitů nebo vyztužené oceli, aby odolala působení vibrací, dynamických rázů a nepříznivých klimatických podmínek, jako je prach, vlhkost nebo extrémní teploty [7], [1].

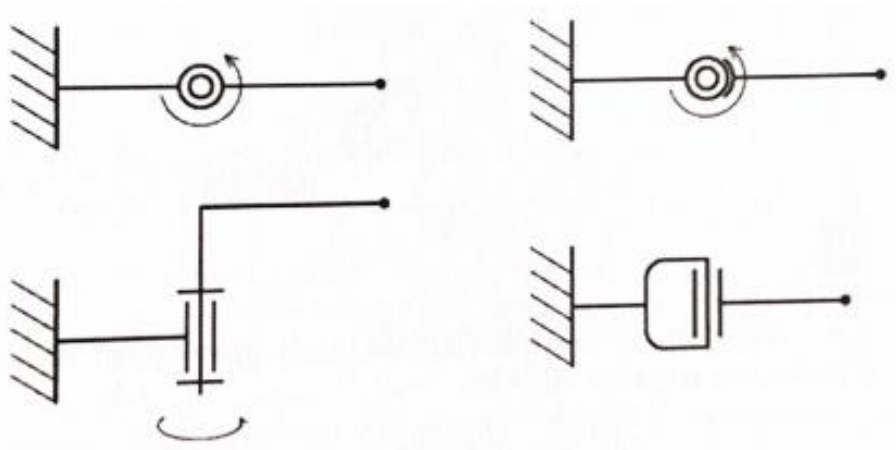
d) Klouby a spojovací mechanismy

Kloubové a spojovací prvky umožňují přenos síly mezi jednotlivými segmenty robotu a realizaci požadovaných pohybů. Hlavní typy spojovacích prvků zahrnují:

- Rotační klouby

-jsou tvořeny rotačními (R) kinematickými dvojicemi (KD)

-zajišťují pohyb v kruhové trajektorii, čímž umožňují precizní polohování robotických ramen [2]



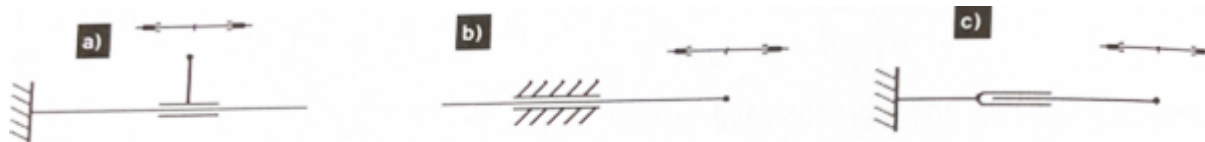
Obr. 14) Schématické znázornění kloubů (rotačních KD) v nárysu a půdorysu [2]

- Lineární vedení

-je tvořeno translačními (T) kinematickými dvojicemi (KD)

-slouží k přesunu efektorů v přímém směru

-využívá se především u portálových robotů [2]



Obr. 15) Schématické znázornění lineárního vedení (translačních KD): a) suportové, b) smykadlové, c) výsuvné [2]

- Teleskopické spoje

-zde je opět zajištěn translační pohyb díky translačním (T) kinematickým dvojicím (KD)

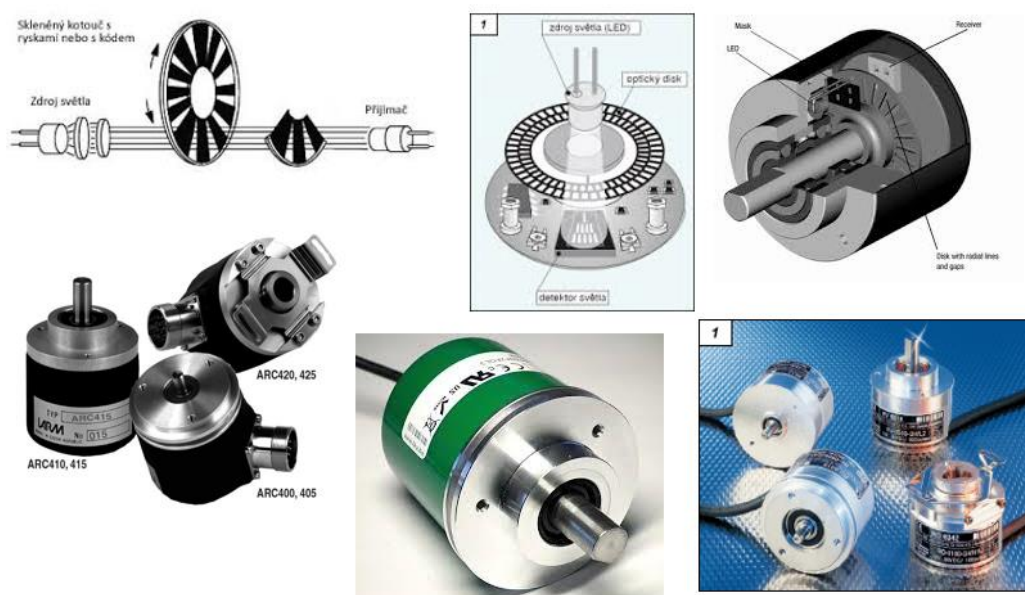
-poskytují dodatečný rozsah pohybu, což zvyšuje flexibilitu robotů při manipulaci s objemnými stavebními prvky

-tento spoj je využit například pro vysouvání a zasouvání teleskopického ramene mobilního PR Hadrian X

Kritickým parametrem spojovacích prvků je jejich pevnost, životnost a schopnost odolávat vibracím a dynamickým změnám zatížení [7], [3].

e) Snímače polohy a rychlosti

Inkrementální rotační snímače (IRC) jsou tvořeny optickým vysílačem, odměřovacím kotoučem a optickým přijímačem a používají k měření úhlu natočení. Principem je rotace odměřovacího kotouče ve světelném paprsku a opatřeného průsvitnými a neprůsvitnými ryskami. Světlo ze zdroje dopadá přes rotující kotouč ryskami na světelný přijímač a převádí tyto světelné impulzy na elektrické nebo na obdélníkový signál [2].



Obr. 16) Inkrementální snímače polohy a rychlosti pohyblivých částí PR (nepřímé odměřování) [6]

f) Ochranné prvky mechanické struktury

Staveniště představuje prostředí s extrémními podmínkami, které zahrnují prach, vlhkost, vibrace a vysoké dynamické zatížení. Z tohoto důvodu musí být PR konstruovány tak, aby odolávaly nepříznivým vlivům, čímž se prodlužuje jejich životnost a zajišťuje bezpečný provoz. Mezi ochranné prvky mechanické struktury patří:

- Kryty proti prachu a vodě – slouží k ochraně citlivých komponent, jako jsou elektronické řídicí jednotky, pohonné systémy a senzory, před pronikáním nečistot a vlhkosti. Odolnost vůči těmto faktorům se hodnotí dle standardu IP (Ingress Protection), přičemž roboty určené pro venkovní aplikace by měly dosahovat minimálně úrovně IP65 nebo vyšší [7]

Prvek	Číslice/písmeno	Význam pro ochranu zařízení	Význam pro ochranu osob
První charakteristická číslice		Před vniknutím pevných cizích těles:	Před dotykem nebezpečných částí:
	0/X	(nechráněno)	(nechráněno)
	1	o průměru ≥ 50 mm	hřbetem ruky
	2	o průměru $\geq 12,5$ mm	prstem
	3	o průměru $\geq 2,5$ mm	nástrojem
	4	o průměru $\geq 1,0$ mm	drátem $\varnothing 1$ mm
	5	chráněno před prachem	drátem $\varnothing 1$ mm
	6	prachotěsné	drátem $\varnothing 1$ mm
Druhá charakteristická číslice		Proti vniknutí kapaliny (resp. vody) s nebezpečnými účinky:	–
	0/X	(nechráněno)	
	1	svisle kapající	
	2	kapající (ve sklonu 15°)	
	3	kropení (déšť)	
	4	stříkající	
	5	tryskající	
	6	intenzivně tryskající	
	7	ponoření dočasné	
	8	trvalé ponoření	

Obr. 17) Prvky IP kódu a jejich význam [13]

- Tlumiče vibrací – snižují mechanické namáhání, které by mohlo nepříznivě ovlivnit funkčnost citlivých součástí, jako jsou gyroskopické senzory, inerciální měřicí jednotky (IMU) nebo aktuátory. Tlumení vibrací je nezbytné především u mobilních robotů pohybujících se po nerovném terénu
- Ochranné mechanismy proti přetížení – chrání robotické konstrukce a jejich mechanické subsystemy před nadměrným zatížením. Uplatňují se například krouticí spojky a snímače síly, které v případě překročení mezních hodnot přeruší činnost robotu nebo aktivují bezpečnostní režim [7]

Pojezdové (lokomoční) ústrojí:

Toto ústrojí zajišťuje přemísťování celého PR většinou konstruovaného jako samostatné stacionární zařízení, připojené jako celek k pojezdovému ústrojí. U pojezdových ústrojí, které slouží jen k přesouvání PR v rámci jednoho pracoviště, z výpomocných důvodů či v případech

složitosti manipulace při obsluze jednotlivých pracovišť. V praxi se vyskytuje především nutnost obsluhy více pracovních stanic jedním PR. Počet takových obsluhovaných míst je tedy pro započítávání do stupňů volnosti (DOF) robotu důležitý, ne však zcela zásadní [2].

a) Pojezdy

- Pomocná volně otočná kola

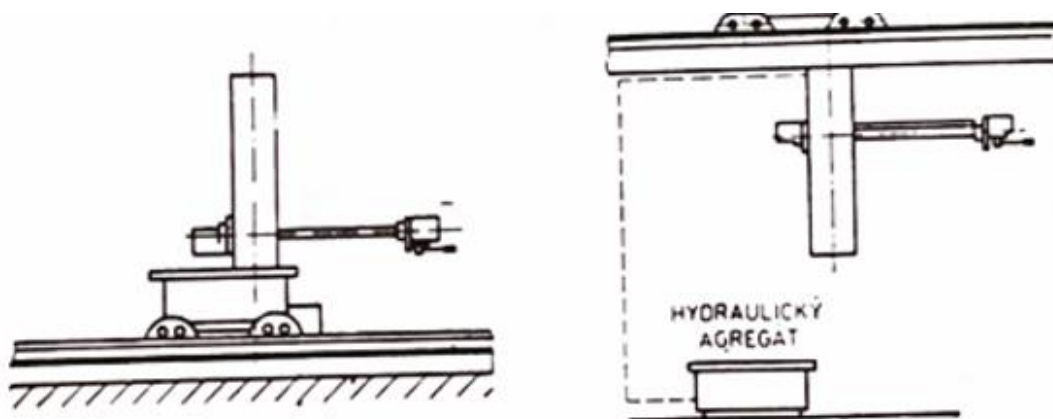
-slouží k volné manipulaci PR po podlaze

- Pojezdová kola

-umožňují pohyb PR po kolejnici či jinak vhodně uzpůsobených traverzách

-nutnost zajistit stabilitu PR, z toho důvodu je vhodnější závěsný systém

- PR s integrovaným podvozkem k pojezdovým účelům [2]



Obr. 18) Schéma instalace pojezdu PR vlevo na kolejové dráze, vpravo na závěsné (visuté) dráze [2]

b) Pohony

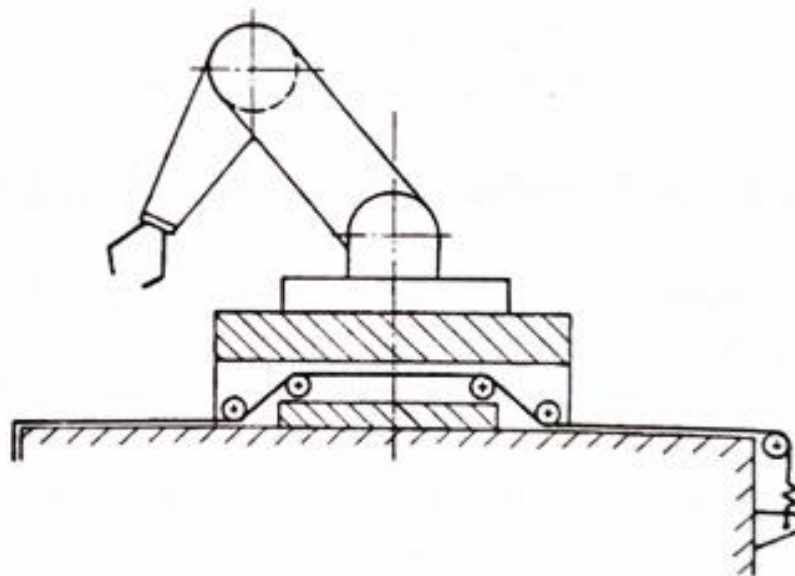
- Hřeben a pastorek
- Lineární motory (válce s písty) hydraulické či pneumatické – vhodné pro kratší posuvy
- Pohybový šroub a matice – neobvyklé

c) Zajištění a ochrana přívodu energie

- Kabelový řetěz
- Prostorový 3D nosič kabelů Robotrax

d) Ochrana vedení proti vnějším nečistotám

- Průchozí kryty z tenkého plechu
- Teleskopické kryty [2].

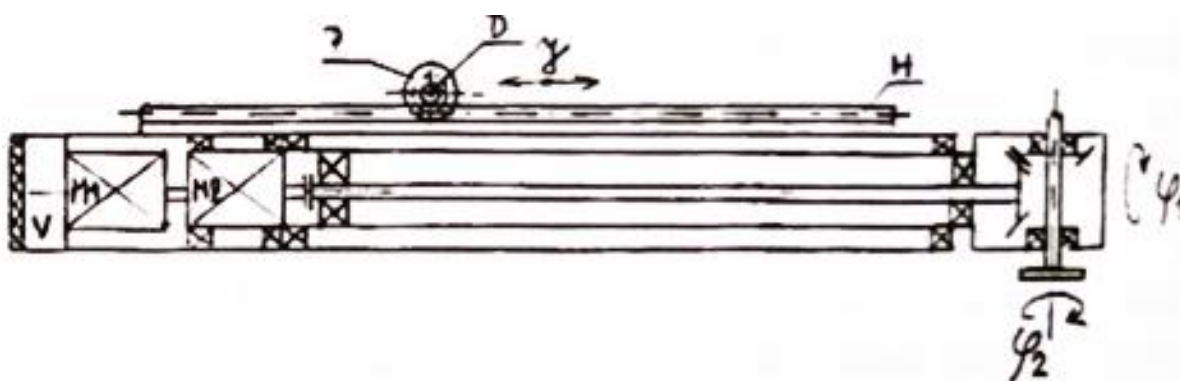


Obr. 19) Průchozí kryty z tenkého plechu [2]

Orientační ústrojí:

Při třech stupních volnosti (DOF) dopraví polohovací ústrojí PR referenční bod „B“ do požadovaného místa v obsluhovaném prostoru tak, aby manipulovaná součást byla náležitě orientována. Toto ústrojí nemá zásadní vliv na stavbu robotu a je pouze jeho doplněním k dosažení jednoznačné polohy a orientace součástí.

- Stavebnicové provedení – předpokládá, že každá kinematická dvojice (KD) bude řešena samostatně, s vlastním pohonem, odměřováním, připojovacími přírubami na vstupu i výstupu, napájením, ovládacími a dalšími prvky
- Integrované (nestavebnicové) provedení – je vzájemně provázáno v celé konstrukci robotu a někdy zasahuje až do polohovacího ústrojí a může být se dvěma či třemi stupni volnosti [2]



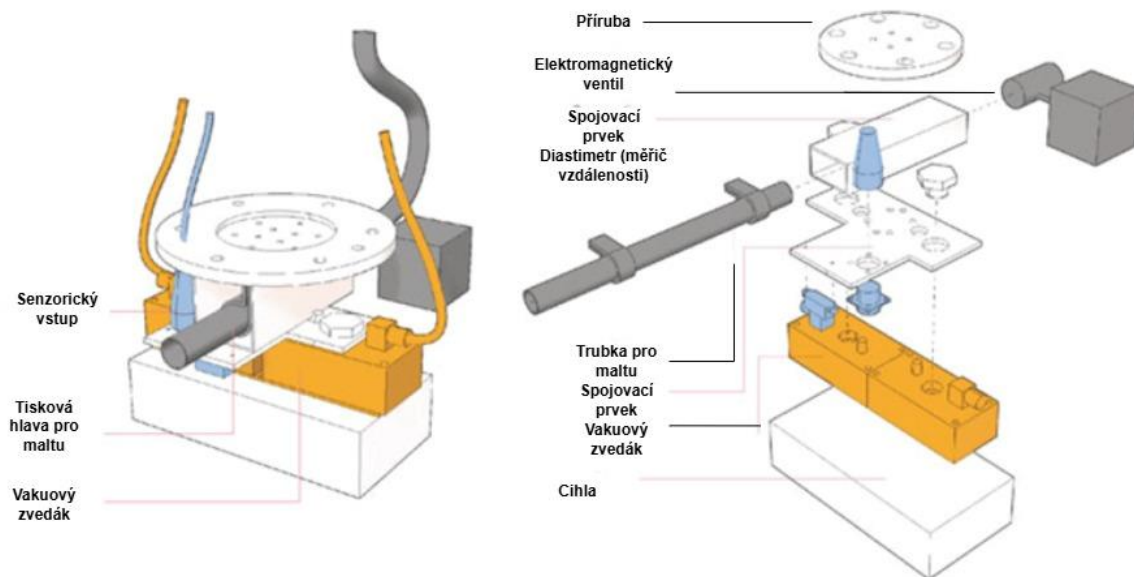
Obr. 20) Schéma integrovaného orientačního ústrojí se dvěma stupni volnosti (DOF) [2]

- Netradiční provedení – mnohakloubová nebo kompaktní kulová zápěstí [2]

Akční člen (koncový efektor):

Koncové efekторы jsou pracovní nástroje, které umožňují robotům provádět konkrétní stavební operace. Nejčastějšími typy efektorů ve stavebnictví jsou:

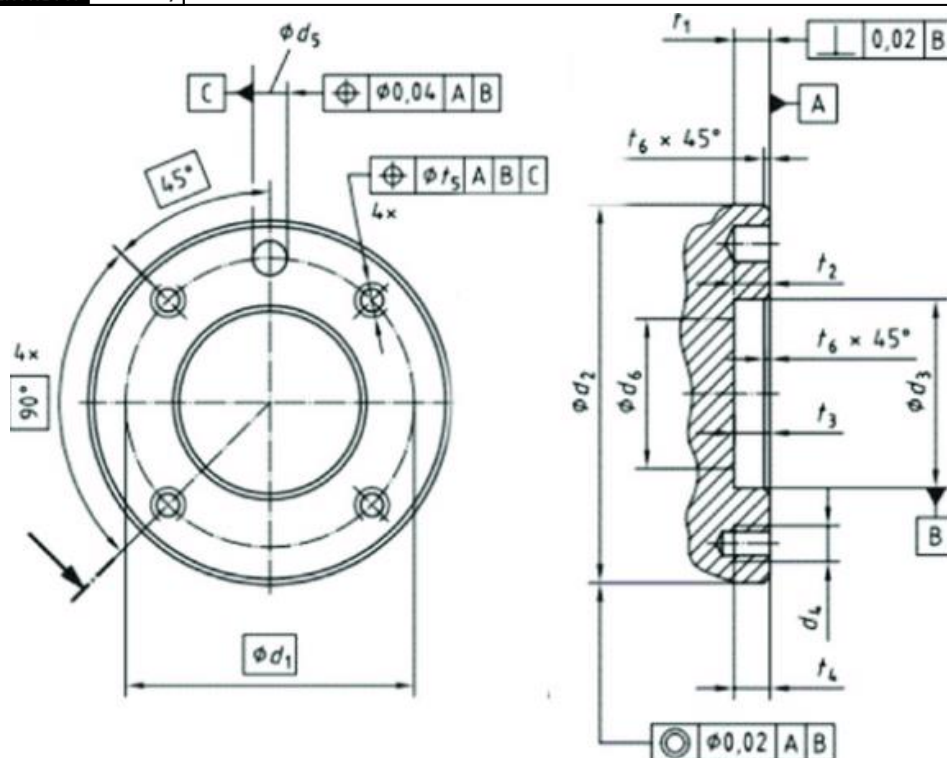
- Mechanická chapadla – určená pro manipulaci s cihlami, panely nebo jinými stavebními bloky [7]
- Řezací a vrtací nástroje – umožňují dělení a opracování stavebních materiálů s vysokou přesností [1]
- Trysky pro nanášení betonu, malt a omítek – používají se při 3D tisku stavebních konstrukcí nebo aplikaci povrchových úprav [3]



Obr. 21) Ukázka koncového efektoru pro manipulaci s cihlami a následnému nanášení malty [3]

Efektivní integrace koncových efektorů do robotického systému umožňuje automatizovanou výstavbu, zkrácení pracovních cyklů a snížení materiálového odpadu [7].

Koncové efektor jsou připojovány k robotickému rameni prostřednictvím standardizovaného rozhraní zajišťujícího jejich snadnou výměnu a kompatibilitu s různými typy nástrojů. Nejběžnějším řešením je univerzální montážní příruba, která odpovídá normě ISO 9409-1-50-4-M6. Tato příruba představuje mechanické i elektrické rozhraní umožňující upevnění a propojení efektoru s koncem robotického ramene, konkrétně v místě označovaném jako TCP (Tool Center Point). Právě v tomto bodě dochází k fyzické interakci robotu s prostředím prostřednictvím efektoru – ať už jde o manipulační chapadlo, šroubovací nebo svařovací nástroj, lešticí hlavici, nebo například 3D kameru pro vizuální inspekci [14].



Obr. 22) Nárys a bokorys univerzální montážní příruby dle normy ISO 9409-1-50-4-M6, kde číslo 50 je rovno průměru roztečné kružnice d_1 ; 4 je počet závitových děr právě na této kružnici; M6 značí konkrétní závit v těchto vrtaných otvorech [15]

2.1.2 Subsystem hardware (HW)

Jeho hlavní součástí je řídicí jednotka. Ta zajišťuje výpočetní výkon a konektivitu robotu nejen s jeho ovládacím panelem, ale také s dalšími periferiemi a externími systémy prostřednictvím sítí jako IoT nebo 5G. Důležitá je také kompatibilita a rozšiřitelnost hardwaru vzhledem k okolní infrastruktuře [16].

a) Řídicí systémy

Řídicí systém představuje centrální jednotku robotu, která koordinuje všechny jeho pohyby, zpracovává vstupní data ze senzorů a optimalizuje výkon jednotlivých komponent. Moderní PR ve stavebnictví jsou vybaveny pokročilými algoritmy řízení umožňující:

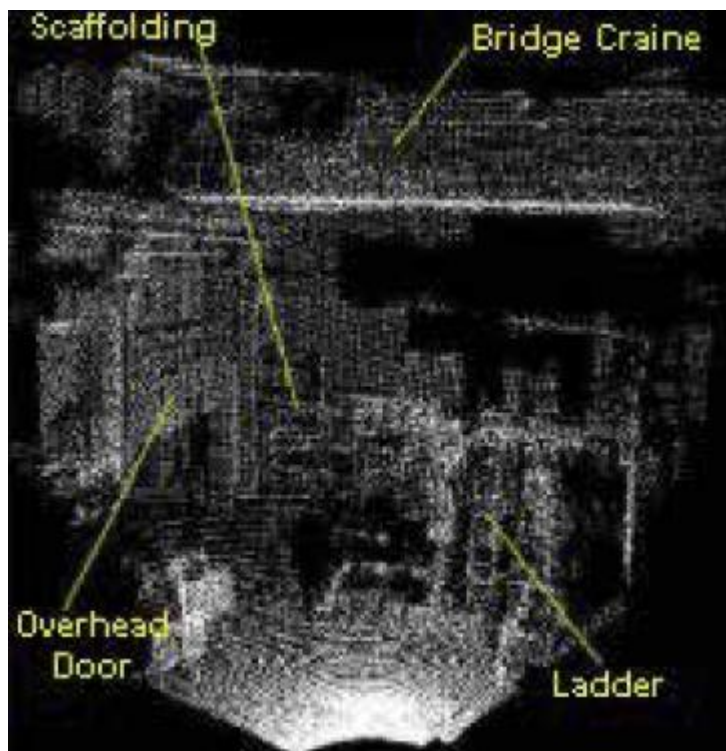
- Programovatelné řízení – vykonávání předem definovaných operací podle pevně stanovených instrukcí
- Adaptivní řízení – schopnost dynamicky reagovat na změny v okolním prostředí a přizpůsobit svůj pohyb v reálném čase dle předem člověkem naprogramovaných modelů a pravidel
- Autonomní řízení – využití strojového učení a umělé inteligence k analýze dat a samostatnému rozhodování bez nutnosti zásahu operátora

Důležitým aspektem moderních řídicích systémů je propojení s digitálními modely stavby (BIM), které umožňuje přesnější plánování a optimalizaci stavebních procesů [4], [7].

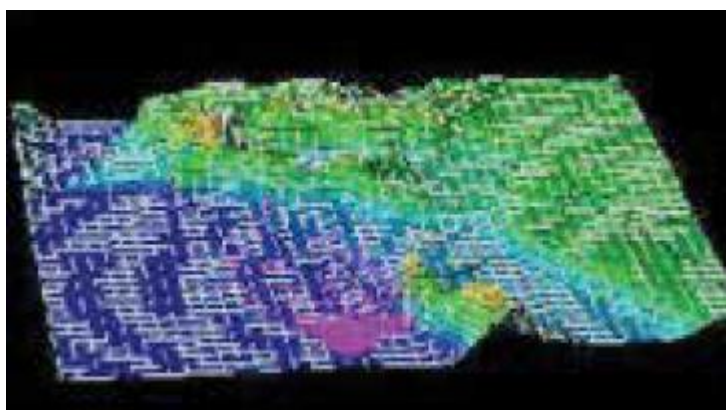
b) Senzorické a navigační systémy

Senzory hrají hlavní roli při autonomním řízení robotů, neboť jim umožňují vnímat své okolí, detekovat překážky, analyzovat pracovní podmínky a navigovat se v prostoru. Mezi nejpoužívanější senzorické technologie patří:

- LIDAR (Light Detection and Ranging) a 3D kamery – vytvářejí podrobné trojrozměrné mapy okolí a umožňují přesnou detekci překážek. Tyto senzory jsou nezbytné pro přesné polohování robotů při montáži prefabrikátů nebo při 3D tisku betonových konstrukcí [7]



Obr. 23) Mapa prostředí – data shromážděná pomocí LIDAR senzoru [7]



Obr. 24) Na základě přijatých dat od LIDARu zrekonstruovaná 3D mapa prostředí [7]

- GPS navigace – využívá satelitní signály k určení polohy, což umožňuje robotům pracovat ve velkých stavebních areálech. Pro zvýšení přesnosti může být GPS kombinováno s RTK (Real-Time Kinematic) korekcí, která minimalizuje polohové chyby na úroveň centimetrů

- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – metoda, která umožňuje autonomním robotům současně mapovat neznámé prostředí a navigovat se v něm v reálném čase. Tato technologie je využívána zejména mobilními stavebními roboty, které se pohybují po rozsáhlých staveništích bez pevně definované trajektorie

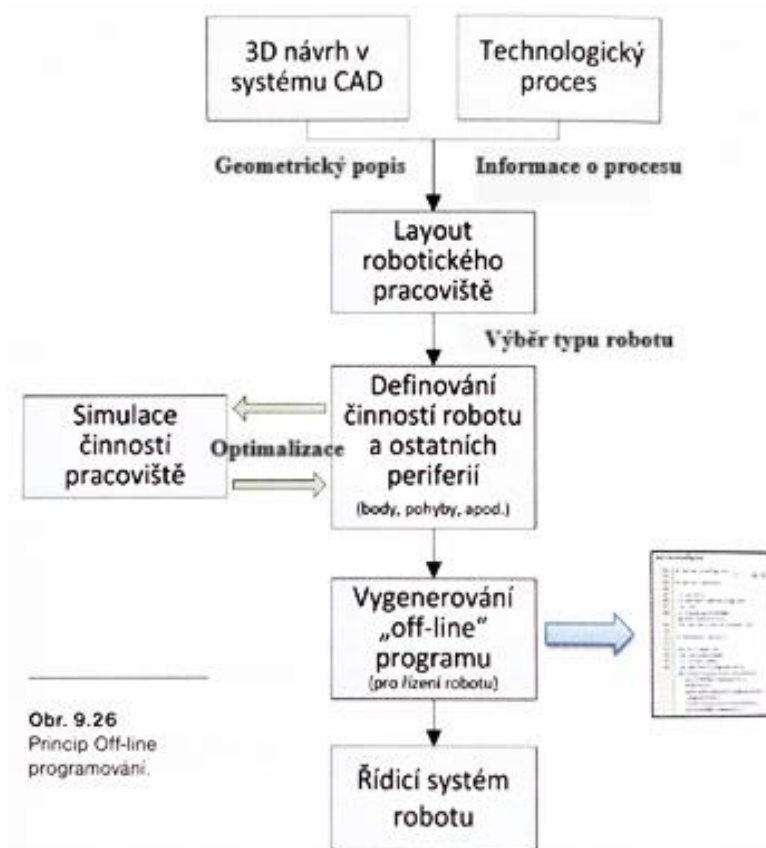
Efektivní kombinace senzorických a navigačních systémů umožňuje robotům pracovat s vysokou přesností i v podmínkách s proměnlivým terénem a překážkami, čímž se zvyšuje jejich celková provozní efektivita [1], [7].

2.1.3 Subsystem software (SW)

V robotice představuje soubor programových nástrojů a prostředí, které určují, jak bude robot programován a jak s ním bude obsluha nebo programátor komunikovat. Hraje klíčovou roli v integraci robotu do firemních technologií a může být realizován buď on-line (obsluha programuje robot přímo na pracovišti pomocí ručního ovládacího panelu „teach-pendantu“) nebo off-line (programování pomocí softwaru, 3D vizualizace robotického pracoviště a následného převedení kódu do příslušného formátu programovacího jazyka). Kvalita softwaru a jeho dokumentace významně ovlivňuje efektivitu nasazení robotu a možnost jeho rozšíření v rámci výroby [7], [2].



Obr. 25) Teach-pendant společnosti KUKA používaný pro on-line programování [2]



Obr. 26) Princip off-line programování [2]

Softwarové rozhraní zastává zásadní úlohu v řízení, monitorování a optimalizaci robotických operací v proměnlivém prostředí staveniště. Zahrnuje řídicí algoritmy, uživatelská rozhraní, komunikační protokoly a integrační platformy, které umožňují efektivní interakci mezi roboty, operátory a digitálními modely stavby. Díky moderním softwarovým řešením mohou robotické systémy autonomně reagovat na změny v pracovním prostoru a přizpůsobovat svou činnost v reálném čase [1].

a) Struktura softwarového rozhraní

Softwarové systémy stavebních robotů jsou navrženy jako modulární, což usnadňuje jejich údržbu, rozšiřování a integraci s dalšími digitálními technologiemi. Mezi hlavní složky softwarového rozhraní patří:

- Nízkoúrovňové řízení (Low-Level Control)

Zajišťuje přímé ovládání pohonů, senzorů a aktuátorů v reálném čase. Implementuje pokročilé regulační algoritmy, jako jsou PID regulace, adaptivní řízení nebo prediktivní řízení, které optimalizují výkon robotu [7].

- Vysokoúrovňové řízení (High-Level Control)

Řídí plánování trajektorií a sekvence úkolů na základě digitálních stavebních plánů. Využívá algoritmy umělé inteligence a strojového učení k přizpůsobení pohybových drah robotu změnám v prostředí [1].

- Uživatelské rozhraní (HMI – Human-Machine Interface)

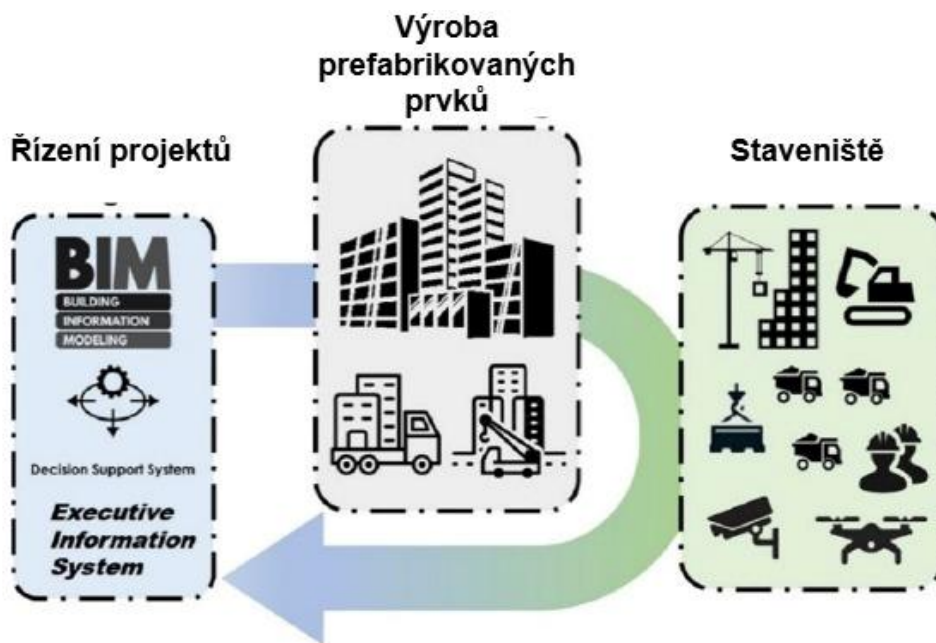
Poskytuje operátorům vizuální a interaktivní prostředí pro ovládání a monitorování robotů. Umožňuje nastavování parametrů, přizpůsobení pracovních sekvencí a sledování provozního stavu robotického systému v reálném čase [17].

b) Komunikace a síťové uspořádání

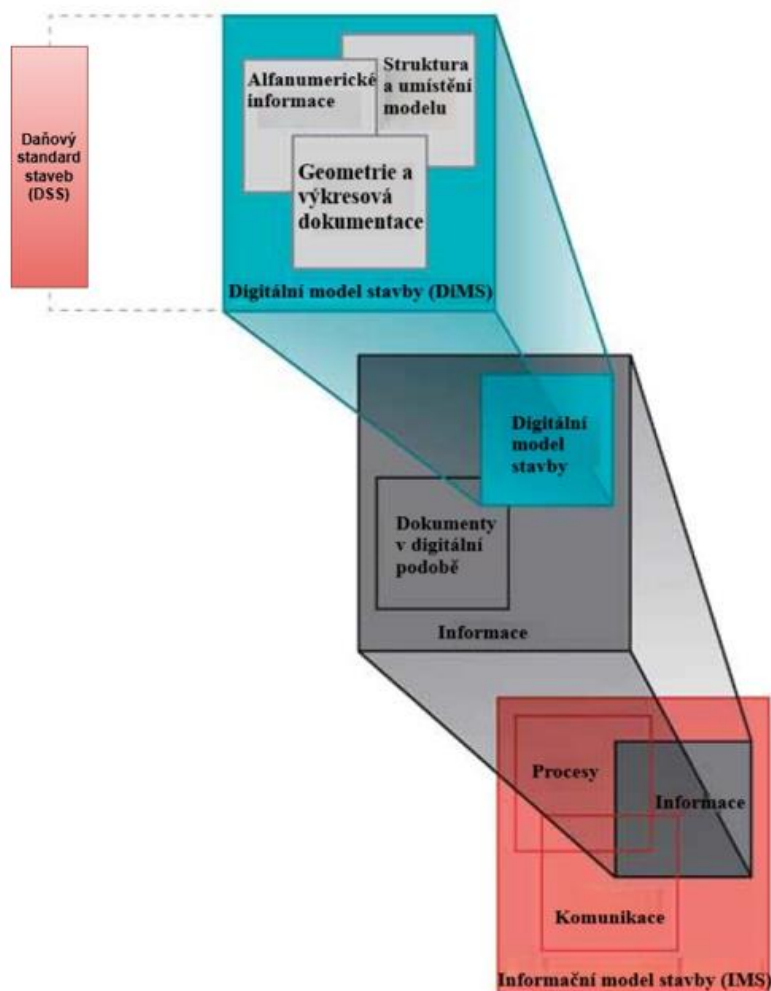
Pro efektivní provoz stavebních robotů je nezbytné zajistit stabilní, spolehlivou a bezpečnou komunikaci mezi jejich jednotlivými komponentami. V této oblasti se uplatňují různé typy komunikačních technologií. Průmyslové protokoly, jako je EtherCAT a CAN bus, umožňují rychlý a deterministický přenos dat mezi řídicími jednotkami v reálném čase, což je stěžejní pro synchronizaci pohybů a operací. Pro integraci robotických systémů s digitálními modely stavby a cloudovými platformami se používají protokoly MQTT a OPC UA, které umožňují škálovatelnou a zabezpečenou komunikaci. Bezdrátové technologie, jako jsou Wi-Fi, 5G a LoRaWAN, pak zajišťují připojení a vzdálený přístup v rámci rozsáhlých a dynamicky se měnících staveníšť, což je nezbytné pro flexibilní nasazení mobilních robotických jednotek a jejich interakci s digitálním prostředím stavby [1].

c) Propojení s digitálními stavebními technologiemi

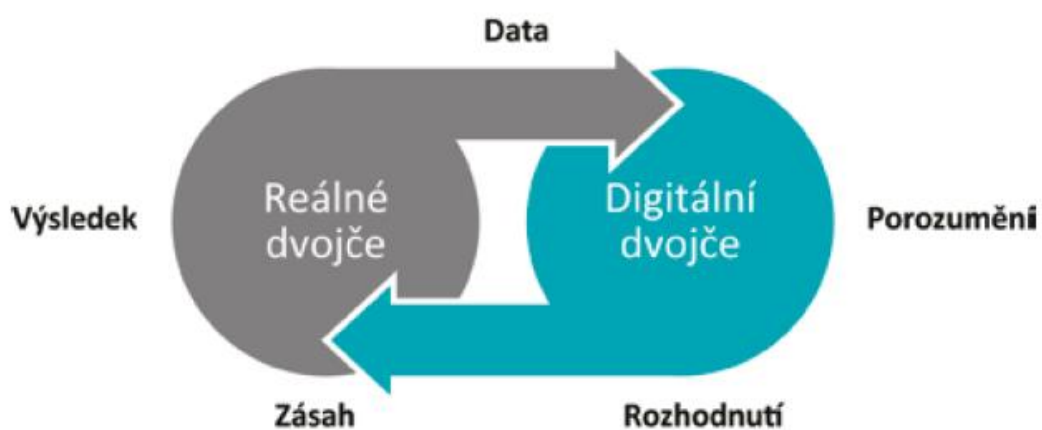
Efektivní fungování robotických systémů na stavbě dnes zásadně závisí na jejich propojení s digitálními nástroji, jako je BIM (Building Information Modeling) nebo umělá inteligence (AI). Pomocí BIM mají roboty přístup k detailním datům o geometrii stavby, což jim umožňuje vykonávat úkoly s vysokou přesností a podle aktuálního harmonogramu. Algoritmy umělé inteligence přispívají k optimalizaci trajektorií, plánování pracovních úloh a kolizní prevenci na základě reálných dat ze senzorů. Tato integrace podporuje zrychlení stavebních procesů a minimalizaci chyb vzniklých lidským faktorem [1].



Obr. 27) Datové zdroje a tok zpětné vazby ve stavebním sektoru [1]



Obr. 28) Informační model stavby (IMS) nebo anglicky Building information model (BIM) je nejaktuálnějším a nejvěrnějším odrazem reality stavby v digitálním světě, a to včetně všech důležitých souvisejících informací, které se ke stavbě pojí [\[18\]](#)



Obr. 29) Reálné dvojče posílá automaticky aktuální data digitálnímu dvojčeti, které tato data následně zpracovává, vyhodnocuje a dává pokyn reálnému dvojčeti, jak v konkrétní situaci reagovat [\[18\]](#)

d) Kybernetická bezpečnost

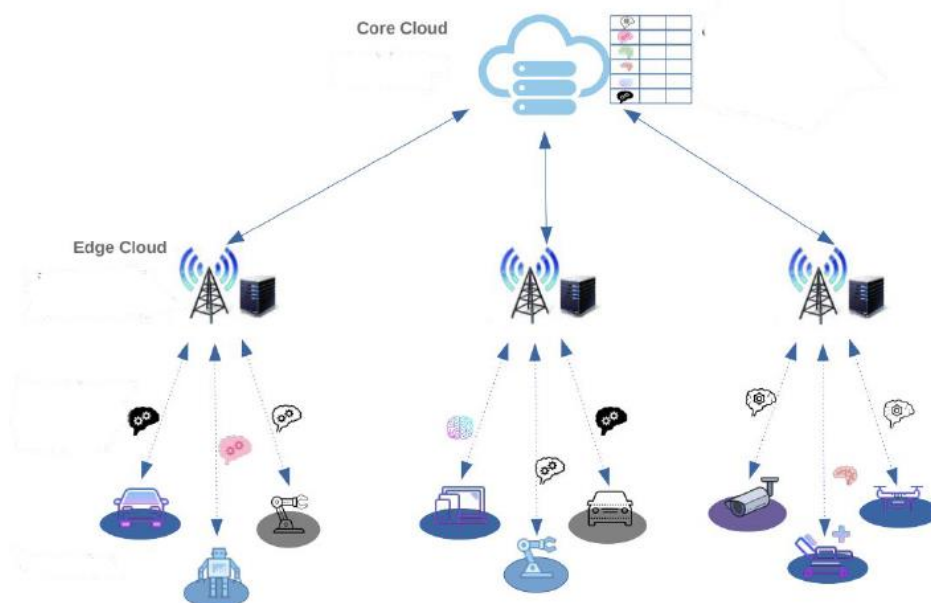
Zajištění kybernetické bezpečnosti je prioritou při integraci robotických systémů do stavebních procesů, zejména v souvislosti s využitím cloudových technologií, IoT a bezdrátové komunikace. Roboty jsou potenciálním cílem útoků, které mohou ohrozit nejen data, ale i samotnou bezpečnost stavebního provozu. Mezi nejčastější opatření patří šifrování dat, autentizace pomocí zabezpečených přístupových protokolů a monitorování síťového provozu. Významnou roli hrají také redundantní komunikační systémy, které zajišťují kontinuitu provozu i při výpadku nebo narušení primární sítě. Tato opatření přispívají ke zvýšení bezpečnosti autonomních stavebních robotů v digitálně propojeném pracovním prostředí [1].

e) Příklady softwarových platform

Moderní stavební roboty využívají široké spektrum softwarových platform, které zajišťují nejen samotné řízení pohybových funkcí, ale také plánování úloh, koordinaci činností a optimalizaci provozu. Mezi nejpoužívanější řešení patří ROS (Robot Operating System), což je open-source rámec umožňující vývoj, simulaci a nasazení autonomních robotických systémů. Pro pokročilé průmyslové aplikace, včetně integrace do automatizovaných výrobních a stavebních procesů, se využívá Siemens TIA Portal, který umožňuje jednotné programování a řízení technologických uzlů. Další důležitou platformou je NVIDIA Isaac, která umožňuje vývoj autonomních systémů s využitím hlubokého učení a pokročilého počítačového vidění. Díky těmto softwarovým nástrojům jsou moderní roboty schopné efektivně operovat v náročném stavebním prostředí a adaptivně reagovat na aktuální podmínky a data [17].

2.1.4 Subsystem brainware (BW)

Představuje moderní koncept využívající principy softwaru jako služby (SaaS), který přenáší logiku inteligence robotu do cloudu. Místo pevně nahráného softwaru v zařízení jsou tzv. „mozkovny“ (specializované AI modely) uchovávány v centrálních a okrajových cloudových úložištích a dynamicky distribuovány podle potřeby konkrétního úkolu (např. strojové vidění nebo rozpoznávání řeči). Metadata získaná při provozu jsou odesílána zpět do cloudu, kde přispívají ke zlepšování celého systému prostřednictvím strojového učení [16].



Obr. 30) Navrhovaný koncept brainware (BW) [16]

2.2 Vlivy prostředí na provoz průmyslových robotů

PR používané ve stavebnictví musí být konstruovány tak, aby odolaly extrémním podmínkám staveniště, které se výrazně liší od stabilního a řízeného prostředí průmyslových hal. Robotické systémy jsou vystaveny klimatickým vlivům, mechanickému zatížení, častým změnám v pracovním prostoru a dalším externím faktorům, které mohou ovlivnit jejich provozní spolehlivost a životnost. K zajištění efektivního fungování stavebních robotů je nezbytné implementovat ochranná opatření, která minimalizují negativní dopady okolního prostředí [\[1\]](#).

2.2.1 Klimatické a environmentální vlivy

a) Teplotní extrémy

Staveniště se mohou nacházet v oblastech s extrémními teplotními podmínkami, a to jak v horkém (pouštní a tropické oblasti), tak i chladném klimatu (arktické regiony). Vliv teplotních výkyvů může mít zásadní dopad na funkčnost elektronických a mechanických součástí robotů. Z tohoto důvodu jsou aplikována následující opatření:

- Tepelná izolace a aktivní chlazení – zabráňují přehřívání řídicích jednotek, bateriových systémů a senzoriky při extrémně vysokých teplotách
- Vyhřívání a ochrana proti námraze – chrání pohonné systémy, hydraulické prvky a kloubové spoje před zamrzáním v chladném prostředí [\[1\]](#)

b) Vlhkost a voda

Stavební roboty často pracují ve venkovních podmínkách, kde jsou vystaveny působení srážek, mlhy nebo vysoké vlhkosti, což zvyšuje riziko koroze, zkratu elektronických obvodů a degradace mechanických částí. Pro zajištění spolehlivého provozu jsou využívána následující opatření:

- Ochrana proti vniknutí vody (IP krytí) – významné součásti robotů, jako jsou řídicí jednotky, senzory a elektronika, musí být hermeticky utěsněny v souladu se standardy odolnosti proti vodě
- Antikorozní úprava kovových částí – mechanické konstrukční prvky jsou opatřeny speciálními povrchovými úpravami (např. galvanizací nebo práškovým lakováním), které zvyšují jejich odolnost vůči korozi [\[1\]](#)

c) Prach a znečištění

Staveniště jsou charakteristická vysokou koncentrací prachu, abrazivních částic a dalších nečistot, které mohou zanášet pohonné systémy, ucpávat senzory a způsobovat nadměrné opotřebení mechanických částí. Aby byl minimalizován negativní dopad znečištění, jsou implementována následující řešení:

- Vzduchové filtry a utěsněné skříně – chrání řídicí elektroniku, servopohony a senzory před vniknutím prachových částic
- Automatizované čisticí systémy – roboty mohou být vybaveny ofukovacími tryskami, vibračními filtry nebo samočisticími mechanismy, které zabráňují nadměrnému usazování prachu a nečistot na kritických komponentech
- PR určené pro stavebnictví musí být vybaveny pokročilými ochrannými technologiemi, které jim umožňují efektivně fungovat i v nejnáročnějších podmínkách. Správné řešení environmentálních vlivů výrazně zvyšuje spolehlivost

robotických systémů, snižuje nároky na údržbu a přispívá k delší životnosti jednotlivých komponent [\[1\]](#)

2.2.2 Mechanické a dynamické vlivy

PR nasazené ve stavebnictví musí být schopny pracovat v prostředí, kde dochází k neustálým mechanickým vlivům, jako jsou vibrace, otřesy nebo nerovný terén. Tyto faktory mohou negativně ovlivnit přesnost, stabilitu a životnost robotických systémů, a proto je nezbytné implementovat technologie, které minimalizují jejich dopad.

a) Vibrace a rázy

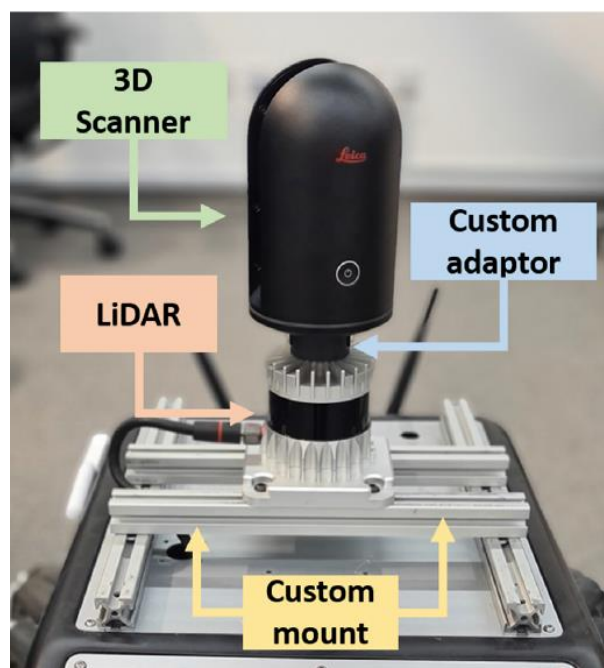
Stavební prostředí je často charakterizováno intenzivními otřesy způsobenými provozem těžké stavební techniky, demoličními pracemi či manipulací s objemnými stavebními prvky. Tyto vibrace mohou negativně ovlivnit činnost robotických systémů, a to jak v oblasti přesnosti pohybu, tak v životnosti mechanických komponent. Pro minimalizaci těchto vlivů jsou do konstrukce robotů integrovány tlumiče vibrací a kompozitní materiály, které účinně snižují přenos rázů na citlivé části systému, zejména řídicí jednotky, pohonné agregáty a senzorickou techniku. Kromě toho se uplatňují pokročilé inerciální senzory, které v reálném čase detekují změny pohybu a umožňují kompenzaci otřesů, čímž přispívají k zachování vysoké přesnosti pracovních operací i v nestabilních podmínkách staveniště [\[1\]](#).

b) Nerovný terén

Staveniště představují vysoce dynamické prostředí, kde robotické systémy čelí častým změnám povrchu, jako je sypká zemina, štěrk nebo rozbahněný terén. Z tohoto důvodu musí být mobilní roboty navrhovány s důrazem na adaptivní pohyb a stabilitu. Pásové či kráčející podvozky poskytují lepší trakci na nerovném a měkkém podloží, čímž zajišťují plynulý a bezpečný pohyb i v náročných podmínkách. Systémy aktivní stabilizace, založené na gyroskopických senzorech a pokročilých regulačních algoritmech, umožňují robotům automaticky upravovat náklon a kompenzovat výkyvy při pohybu po členitém terénu. Tyto technologie významně rozšiřují operační schopnosti robotů na staveništi a přispívají k jejich bezpečnému a efektivnímu provozu [\[1\]](#).

c) Dynamika pracovního prostoru a překážky

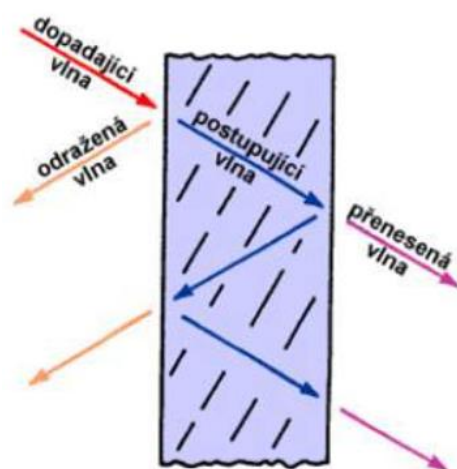
Staveniště představuje dynamické prostředí, které se neustále proměňuje – dochází k přesunům materiálů, změnám pohybových tras a interakci s lidskou obsluhou. Robotické systémy proto musí být vybaveny schopností autonomní adaptace na aktuální podmínky a zároveň minimalizovat riziko kolizí. Tento požadavek je řešen nasazením pokročilých navigačních senzorů, jako jsou LIDAR senzory, 3D kamery nebo radarové systémy, které umožňují detekci a lokalizaci překážek v reálném čase. Data z těchto senzorů jsou zpracovávána pomocí algoritmů umělé inteligence, které zajišťují autonomní plánování a úpravy trajektorie pohybu robotu na základě aktuální situace na staveništi [\[1\]](#).



Obr. 31) Senzorová zátěž (výbava) na palubě robotu, používaná pro sběr dat a navigaci [17]

2.2.3 Elektromagnetické rušení

Stavební roboty jsou při provozu často vystaveny elektromagnetickému rušení (EMI), které může vznikat například z důvodu silnoproudých elektrických vedení, provozu stavební techniky nebo použití bezdrátových komunikačních zařízení. Toto rušení může negativně ovlivnit funkci citlivých senzorů, bezdrátového přenosu dat a přesnost řídicích systémů. Pro zajištění spolehlivosti robotického systému se proto využívá elektromagnetické stínění na takových komponentech, jako jsou řídicí jednotky, datové sběrnice a komunikační moduly. Dále se nasazují redundantní komunikační systémy, které zajišťují stabilní přenos dat i v prostředí se silným rušením. Tato opatření významně přispívají k provozní spolehlivosti autonomních systémů v dynamických podmínkách stavebních prací [7].



Obr. 32) K prvnímu útlumu elektromagnetického vlnění dochází na rozhraní vzduch-stěna, dále při průchodu stínící kovovou přepážkou, a posledně vlivem odrazu v přepážce [19]

2.3 Životní cyklus průmyslových robotů ve stavebnictví

Životní cyklus PR ve stavebnictví zahrnuje všechny fáze jejich existence, od počátečního návrhu a vývoje, přes implementaci a provoz až po modernizaci nebo likvidaci. Každá z těchto fází ovlivňuje efektivitu, udržitelnost a ekonomickou návratnost robotických technologií v rámci stavebních procesů. Správně navržený životní cyklus zajišťuje dlouhou životnost robotických systémů, optimalizaci provozních nákladů a maximální využitelnost moderních technologických řešení.



Obr. 33) Životní cyklus PR ve stavebnictví (Autor: Karel Procházka)

2.3.1 Návrh a vývoj

Fáze návrhu a vývoje je klíčová pro optimalizaci funkčnosti robotu, přičemž se zohledňují požadavky konkrétních stavebních procesů a podmínky pracovního prostředí.

a) Koncept a požadavky

Před samotným zahájením konstrukčního vývoje robotického systému je nutné přesně definovat jeho základní požadavky a funkce. Mezi hlavní kroky patří určení primárního účelu robotu – může se jednat například o manipulaci se stavebními materiály, montáž prefabrikovaných prvků, 3D tisk nebo demolici. Dále je nutné specifikovat mechanické, elektrické a softwarové parametry s přihlédnutím k náročným podmínkám stavebního prostředí, včetně požadavků na robustnost, odolnost vůči prachu a vibracím či energetickou autonomii. Návrh modulární konstrukce umožňuje následnou snadnou údržbu a flexibilní adaptaci systému na různé pracovní úlohy, což je v kontextu stavebních projektů důležitým faktorem pro efektivní nasazení robotických systémů [17].

b) Konstrukční návrh a prototypování

Po definování základních požadavků následuje konstrukční návrh a vývoj prototypu robotického systému. Mechanická struktura robotu je navrhována s ohledem na provoz v náročných podmínkách staveniště – musí odolat prachu, vibracím, proměnlivému terénu a teplotním výkyvům. Důležitou součástí konstrukční fáze je integrace senzorických systémů a řídicí elektroniky, které umožňují přesné řízení pohybů a zpětnou vazbu v reálném čase. Následné laboratorní testování prototypu, včetně simulace reálných stavebních operací, umožňuje vyhodnocení výkonu systému a identifikaci oblastí pro optimalizaci před nasazením na skutečném staveništi [17].

c) Softwarový vývoj

Současně s vývojem hardwaru robotických systémů probíhá paralelní implementace softwarových komponent, které zajišťují autonomii, flexibilitu a přesnost robotických operací na staveništi. Stěžejní je vývoj a ladění řídicích algoritmů a navigačních systémů, které umožňují autonomní pohyb v komplexním a dynamickém prostředí. Pro dosažení vysoké přesnosti trajektorií se využívají simulační modely stavebních procesů. Nedílnou součástí je rovněž návrh uživatelského rozhraní (HMI), které umožňuje intuitivní ovládání a monitorování robotu v reálném čase. Tato integrace pokročilého softwaru zásadním způsobem přispívá k efektivnímu nasazení robotů ve stavební praxi [17].

2.3.2 Implementace a uvedení do provozu

Po úspěšném testování prototypu dochází k jeho nasazení do stavební praxe a integraci do reálných pracovních procesů.

a) Instalace a kalibrace

Transport robotu na místo nasazení a jeho sestavení. Kalibrace pohybových mechanismů a nastavení referenčních bodů pro zajištění přesnosti operací. Testování propojení s dalšími stavebními systémy, jako jsou BIM modely, IoT senzory nebo systémy stavební automatizace [16].

b) Integrace do pracovních postupů

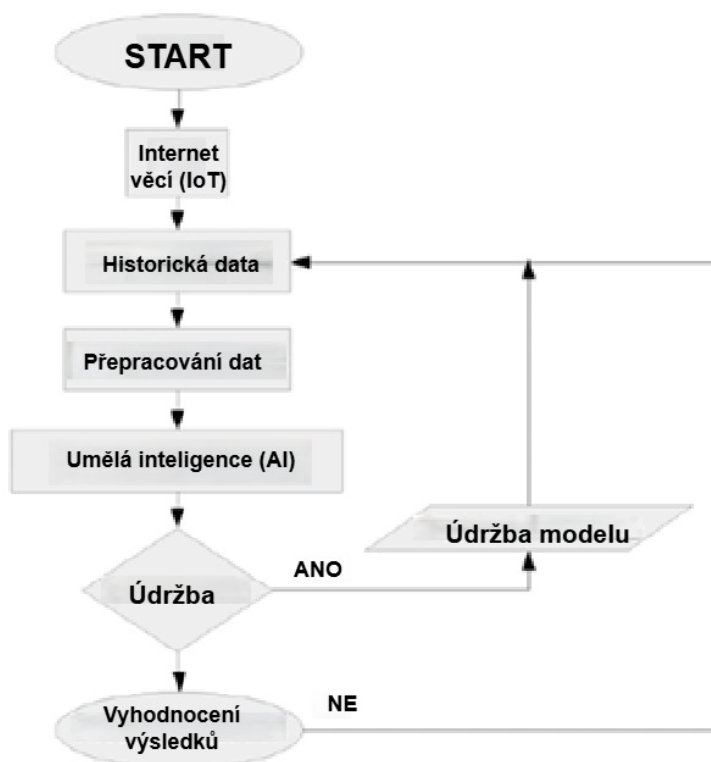
Po instalaci následuje optimalizace pracovních procesů a seznámení obsluhy s ovládáním robotického systému. Školení operátorů a personálu pro bezpečné a efektivní ovládání robotu. Zkušební provoz s reálnými stavebními materiály k ověření správného fungování robotu v podmínkách staveniště. Optimalizace trajektorií a pracovních sekvencí podle aktuálních podmínek staveniště s cílem maximalizovat produktivitu a efektivitu robotického systému [17].

2.3.3 Provoz a údržba

Dlouhodobý a spolehlivý provoz robotů závisí na pravidelné údržbě, monitorování a diagnostice jednotlivých součástí systému.

a) Prediktivní údržba

Moderní robotické systémy využívají pokročilé metody prediktivní údržby, které umožňují minimalizovat neplánované výpadky. Sledování opotřebení komponent pomocí senzorů a systémů internetu věcí (IoT) poskytuje nepřetržité informace o technickém stavu zařízení. Tato data jsou následně zpracovávána pomocí algoritmů umělé inteligence, jež umožňují předpovědět potenciální poruchy a optimalizovat údržbové cykly tak, aby se snížil počet prostojů a zvýšila provozní spolehlivost robotických systémů [20].



Obr. 34) Prediktivní údržba využívající internet věcí (IoT) a umělou inteligenci (AI) [20]

b) Diagnostika a dálkové řízení

Dálková diagnostika umožňuje nepřetržité monitorování výkonu robotu a včasnou identifikaci problémů. Cloudové platformy umožňují přístup k datům o provozu robotu odkudkoli na světě. Okamžitá upozornění na odchylky v provozních parametrech umožňují rychlou reakci na potenciální závady [17].

c) Náhradní díly a opravy

Konstrukteři robotických systémů kladou stále větší důraz na modularitu konstrukce, která výrazně usnadňuje údržbu a umožňuje snadnou výměnu jednotlivých komponent. Díky této koncepci je možné rychle a efektivně nahrazovat opotřebované části bez nutnosti zdlouhavých odstávek, což přispívá k vyšší provozní dostupnosti technologií. Nedílnou součástí modernizace robotických systémů jsou také pravidelné softwarové aktualizace, které zajišťují jejich kompatibilitu s aktuálními stavebními technologiemi a zároveň umožňují rozšiřování funkčních možností. Efektivní řízení celého životního cyklu robotů – od konstrukční fáze až po recyklaci – je přitom významným předpokladem pro maximalizaci jejich výkonu, snižování dlouhodobých provozních nákladů a zajištění udržitelnosti v kontextu moderního digitálně řízeného stavebnictví [21].

2.3.4 Modernizace a přizpůsobení novým technologiím

Dynamický rozvoj technologií v oblasti robotiky a stavebnictví vyžaduje průběžnou modernizaci robotických systémů, aby si zachovaly vysokou efektivitu, spolehlivost a kompatibilitu s novými technologickými standardy. Pravidelná aktualizace hardwarových i softwarových komponent přispívá ke zvyšování přesnosti, produktivity a rozšiřování funkcionality robotických systémů, čímž se zajišťuje jejich dlouhodobá provozní a ekonomická udržitelnost [1].

a) Hardwarové vylepšení

Modernizace mechanických a elektronických částí robotických systémů hraje zásadní roli ve zvyšování jejich výkonnosti a adaptability v dynamicky se měnícím stavebním prostředí. Významným prvkem těchto úprav je modernizace senzorických systémů, které zajišťují vyšší přesnost navigace a rozpoznávání překážek, což výrazně zvyšuje provozní bezpečnost a efektivitu. Současně výměna výkonnějších pohonů a koncových efektorů rozšiřuje manipulační možnosti robotů, čímž umožňuje práci s těžšími nebo rozměrnějšími stavebními prvky, které by jinak nebyly realizovatelné klasickými prostředky. Tyto technologické inovace tedy přímo přispívají ke zvýšení produktivity, spolehlivosti a rozšiřitelnosti robotických systémů na stavbách [1].

b) Softwarové aktualizace

Softwarová modernizace představuje nezbytný prvek v procesu adaptace PR na nové pracovní podmínky a zajišťuje jejich efektivní integraci s digitálním prostředím moderního stavebnictví. Zavádění pokročilých algoritmů umělé inteligence výrazně zlepšuje schopnost autonomního rozhodování, čímž se zvyšuje flexibilita robotů a jejich schopnost reagovat na dynamické změny v pracovním prostoru. Současně rozšíření možností digitální komunikace – například propojení s BIM modely nebo systémy digitálních dvojčat – umožňuje robotickým systémům efektivněji plánovat a koordinovat jednotlivé pracovní úkoly. Tímto způsobem dochází nejen ke zvýšení provozní efektivity, ale také k hlubší integraci robotických technologií do širší koncepce Průmyslu 4.0 [1].

2.3.5 Recyklace a ekologická likvidace

Po dosažení konce životního cyklu robotického systému je nezbytné zajistit jeho ekologickou likvidaci, případně recyklaci všech využitelných komponent. V rámci principů udržitelného průmyslu se stále větší důraz klade na minimalizaci odpadu a efektivní využívání materiálových zdrojů. Recyklace hodnotných součástí, jako jsou kovy, plastové kryty nebo elektronické obvody, přispívá nejen k ochraně životního prostředí, ale zároveň i k omezení výrobních nákladů při výrobě nových zařízení. Tyto postupy jsou v souladu s rostoucími požadavky na environmentální odpovědnost v oblasti moderních technologií a automatizace [1].

a) Demontáž a využití materiálů

Po ukončení provozu PR je možné řadu jeho komponent dále využít nebo recyklovat, což přispívá nejen ke snížení environmentální zátěže, ale také k efektivnímu nakládání s materiálovými a ekonomickými zdroji. Znovuvyužití funkčních částí, jako jsou pohonné jednotky, senzory nebo řídicí moduly, umožňuje omezit výrobní náklady při zachování technické funkčnosti systémů. Kovové prvky mechanické struktury lze následně recyklovat a zpracovat pro výrobu nových robotických zařízení nebo dalších průmyslových aplikací, čímž dochází k uzavření materiálového cyklu a podpoře principů cirkulární ekonomiky [1].

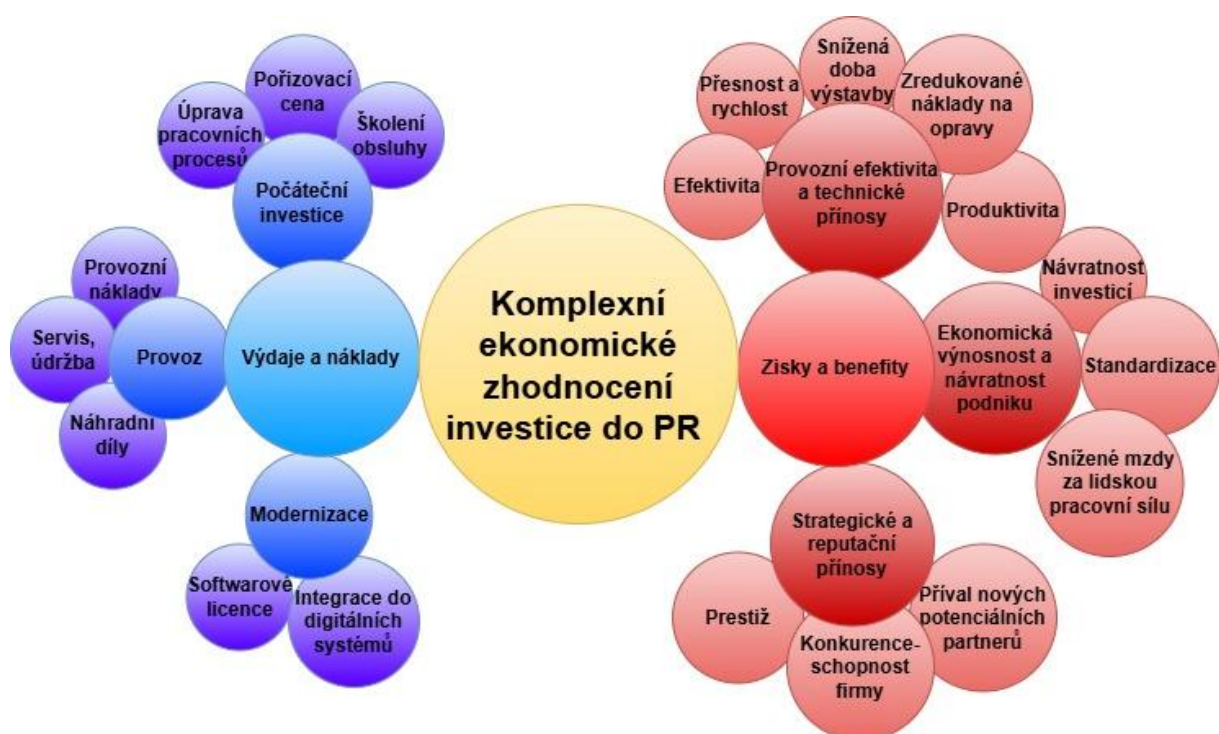
b) Ekologické zpracování baterií a elektroniky

S ohledem na zpřísnující se ekologické normy je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost ekologicky šetrnému nakládání s elektronickým odpadem a zejména s komponenty, které obsahují potenciálně škodlivé chemické látky. Mezi tyto prvky patří například lithiové baterie, které musí být likvidovány v souladu s platnými ekologickými předpisy. Jejich části lze přitom částečně recyklovat a dále využít v průmyslové výrobě. Podobně i polovodičové součástky, desky plošných spojů a další elektronické komponenty podléhají specifickým metodám

zpracování, jejichž cílem je minimalizace ekologické zátěže a podpora udržitelnosti celého životního cyklu robotických technologií [1].

2.4 Ekonomické aspekty životního cyklu robotů

Zavedení PR do stavební výroby představuje výraznou investici, která musí být od počátku podložena zodpovědným ekonomickým zhodnocením. Nestačí pouze posoudit pořizovací cenu samotného zařízení – důležité je sledovat celý jeho životní cyklus, včetně nákladů na provoz, údržbu a modernizaci, a zohlednit také potenciál jeho dalšího využití po ukončení hlavní aplikace. Do úvodních nákladů je nutno započítat nejen technické vybavení, ale rovněž výdaje spojené se zaškolením obsluhy a nutnými zásahy do stávajících procesů – například úpravou pracovních toků nebo napojením na digitální systémy, jako je BIM. Během provozu je pak třeba počítat s pravidelnými výdaji za energii, servisní zásahy, náhradní díly či licence k softwarovému vybavení. Významným přínosem robotizace je zvýšení produktivity a přesnosti, což vede ke zkrácení celkové doby výstavby a snížení nákladů na přepracování či opravy. U dobře navržených systémů navíc existuje možnost repasování a jejich dalšího nasazení v méně náročných podmínkách, čímž se výrazně zlepšuje celková návratnost vložených prostředků. V širším měřítku pak robotizace přináší pozitivní dopady i na samotný stavební sektor – pomáhá řešit nedostatek kvalifikované pracovní síly, snižuje mzdové náklady a umožňuje vyšší míru standardizace a efektivity výroby. Pokud jsou robotické systémy správně řízeny, pravidelně modernizovány a využívány ve vazbě na zásady Průmyslu 4.0, mohou představovat dlouhodobě udržitelný přínos jak pro jednotlivé firmy, tak pro celé odvětví [22], [3].



Obr. 35) Komplexní ekonomické zhodnocení investice do PR (Autor: Karel Procházka)

2.5 Bezpečnostní a legislativní aspekty provozu

Provoz robotických systémů na staveništi musí být bezpečný jak pro samotné roboty, tak pro lidské pracovníky a okolní infrastrukturu. Implementace bezpečnostních prvků minimalizuje riziko nehod a zajišťuje soulad s legislativními normami. Kolizní senzory a nouzové zastavení umožňují automatické přerušení činnosti robotu v případě, že dojde k detekci nebezpečí v jeho pracovním prostoru. Integrace robotů s bezpečnostními systémy stavby umožňuje koordinaci jejich činnosti s ostatními technologiemi na staveništi, což zajišťuje plynulý a bezpečný provoz. PR používané ve stavebnictví musí být navrženy tak, aby odolávaly extrémním mechanickým a environmentálním podmínkám. K zajištění jejich spolehlivého provozu se využívají pokročilé materiály, tlumicí prvky, senzorické technologie a inteligentní řídicí algoritmy, které umožňují adaptivní reakce na změny v pracovním prostředí a bezpečné vykonávání stavebních operací [4], [23].



Obr. 36) Normy a předpisy pro zajištění bezpečnosti spolupráce člověka a stroje [1]

Podrobný popis jednotlivých zákonů, směrnic a norem:

European Machinery Directive 2006/42/EC

(*Směrnice EU o bezpečnosti strojních zařízení*)

→ Všechny typy strojů včetně robotů [24]

OSHA Act of 1970 / General Duty Clause

(Americké zákony o bezpečnosti práce – OSHA)

→ Obecná bezpečnost, platí i pro robotiku [\[25\]](#)

IEC 61508:2010

(Funkční bezpečnost elektrických/elektronických systémů)

→ Základní bezpečnostní požadavky (všeobecné) [\[26\]](#)

ISO 12100:2010

(Principy návrhu a posuzování rizik strojních zařízení)

→ Všechny průmyslové stroje a zařízení [\[27\]](#)

ISO 13849-1:2015

(Bezpečnost řídicích systémů – např. nouzové zastavení, redundantní obvody)

→ Všechny stroje i roboty [\[28\]](#)

ISO 10218-1:2011

(Bezpečnostní požadavky na PR)

→ Průmyslové roboty [\[29\]](#)

ISO 10218-2:2011

(Bezpečnost při integraci robotických systémů)

→ Průmyslové robotické systémy [\[30\]](#)

ISO/TS 15066:2016

(Bezpečnost kolaborativních robotů – limity síly, kontaktu atd.)

→ Kolaborativní roboty (HRC – Human-Robot Collaboration) [\[31\]](#)

3 ŘEŠERŠE ZNÁMÝCH ŘEŠENÍ KONSTRUKCE A APLIKACE PRO STAVEBNÍ PROCESY

3.1 Hadrian X®

Jedná se o první světový mobilní robotický stroj a systém sloužící pro zdění z prefabrikátů, schopný bezpečně pracovat ve venkovním prostředí, při nekontrolovatelných podmínkách, s vysokou rychlostí a přesností. Tento robot australské společnosti FBR (dříve Fastbrick Robotics) vytváří blokové struktury pomocí 3D CAD modelu, a tak je produkováno o mnoho méně odpadu než u tradičních stavebních metod, zatímco bezpečnost na pracovišti se zvyšuje a zdi domu je schopný postavit za méně než jeden den [32]. Namísto klasické malty je na keramické cihly nebo tvárnice nanášeno speciální stavební lepidlo, tvrdnoucí po 45 minutách. V porovnání s tradiční výstavbou zdíva lidskými dělníky, byla k podzimu roku 2023 uváděna až 20x vyšší rychlost pokládky cihelných bloků Hadrianem X [33].

3.1.1 Inteligentní ovládací systém

Unikátní optimalizační software převádí model zdi na pozice jednotlivých bloků, minimalizuje manipulaci a odpad z cihelných bloků za účelem zvýšení efektivity bytové výstavby. Každý dodavatel napříč celým procesem výstavby domu, od architekta až po koncového dodavatele, pracuje s jediným zdrojem dat, umožňujícím paralelní výrobu materiálů [32]. Celý proces pokládky cihel může být ovládán pomocí tabletu v součinnosti s právě již zmíněným 3D CAD modelem [33].

3.1.2 Systém plnění robotu a příprava tvárnice

Po celou dobu pokládky musí být Hadrian X zásobován paletami s tvárnici. Toho je prozatím stále dosahováno za pomoci lidského pracovníka a vysokozdvížného vozíku, kdy paleta musí být tímto vozíkem umístěna do zadní (plnicí) části robotu. Tam je za pomoci menších robotických systémů paleta rozbalena a v případě potřeby jsou kotoučovou pilou jednotlivé tvárnice řezány na požadovaný rozměr a tvar [33].



Obr. 37) Autonomní konstrukční rameno Hadrian X® společnosti FBR [34]

3.1.3 Dynamic Stabilisation Technology™

Hadrian X využívá technologii dynamické stabilizace neboli DST®, umožňující precizní práci při venkovních podmínkách. V reálném čase koriguje dynamické rušení a vibrace výložníku a kladky a pokládá cihelné bloky s vysokou přesností a mimo robotickou pokládku cihel má nespočet jiných funkcí. Zajišťuje přesnost, již bylo předtím možné dosáhnout pouze roboty pracujícími ve vnitřních podmínkách, a dláždí tak cestu pro venkovní robotickou automatizaci. Tradičně byla robotika omezena pouze na využití ve vnitřních prostorech v kontrolovatelném, stabilním a statickém prostředí k provádění opakujících se úkolů, jako je například produkce automobilů. Při práci ve venkovním prostředí jsou roboty vystaveny nepředvídatelným a neustále se měnícím interferencím, jako je vítr, vibrace, měnící se pohyby stroje a teplotní změny. DST® je vysoce přesný systém, který nepřetržitě koriguje pozici koncového efektoru robotu tak, aby bylo zajištěno, že se nachází vždy ve stabilní poloze a ve správném bodě 3D prostoru. V případě, že je kombinováno DST® s proprietárním softwarem společnosti FBR, je robotům umožněno pracovat při venkovním, nestabilním, nepředvídatelném prostředí a plnit tak úkoly přímo na míru [35].

3.2 Next-Gen Hadrian X®

Jedná se o novější a modernější verzi robotu Hadrian X. Odlišnostmi a vylepšeními oproti původní verzi jsou: a) Systém kyvadlové dopravy bloků, b) Teleskopické robotické 32 metrů dlouhé výložníkové rameno, c) Modulární (stavebnicový) design [36].



Obr. 38) Autonomní konstrukční rameno Next-Gen Hadrian X® společnosti FBR [36]

3.2.1 Hlavní vylepšení oproti modelu Hadrian X®

a) Systém kyvadlové dopravy bloků

Je navržen k pokládce existujících komerčně dostupných bloků, stejně tak jako těch na trhu stále nedostupných, zahrnujících objemné cihlové bloky o rozměrech až 600 mm x 400 mm x 300 mm a vážících až 45 kg. Tento novější typ Hadrian X byl navržen tak, aby byl schopen pokládat rychlostí až 500 bloků za hodinu (ekvivalentní až 120 m² za hodinu) a měl potenciál dokončit jak externí, tak interní zdi standardního domu z takzvané „sendvičové zděné konstrukce“ v jednom dni [36].

b) Teleskopické robotické rameno

Teleskopické robotické 32 m dlouhé výložníkové rameno poskytuje větší dosah než jeho předchůdce, dovolující výstavbu zdi ze silnice až tři podlaží vysoko a taky pokládku cihelných bloků až na vzdálenost 50 mm od stávající zdi. Většina pomocných zařízení na Hadrianu X je samostatná, což výrazně zvyšuje jeho efektivitu [36].

c) Modulární (stavebnicový) design

Design je navržený tak, že lze provádět individuální úpravy, opravy a efektivní výměnu jednotlivých modulů, díky vysoce spolehlivému systému. Novější a vylepšený designový modul kotoučové pily umožňuje oproti předchůdci i zkosené řezy do cihelných bloků [36].

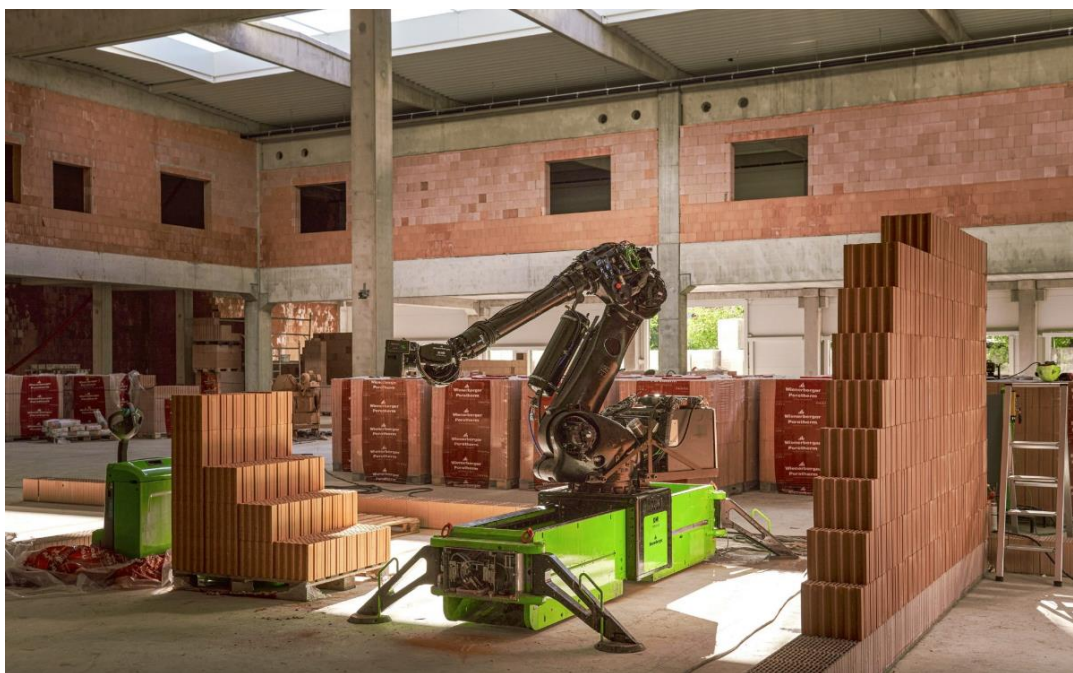
3.3 WLTR

Zdící robot WLTR (Wienerberger Laying Technology Robot) představuje inovativní řešení společnosti Wienerberger, které reaguje na aktuální požadavky na automatizaci vybraných stavebních činností. Robot je určen pro plně automatizované ukládání cihel typu Robot Ready a jeho cílem je zvýšení efektivity a přesnosti při zdění opakujících se úseků stěn. Zařízení bylo vyvinuto s ohledem na reálné podmínky stavení a je určeno především pro rovné, dlouhé a málo členité stěny, typicky u komerčních, průmyslových a halových objektů. Automatizaci dochází ke snížení fyzické náročnosti práce a zároveň k eliminaci lidské chyby při ukládání cihel. WLTR kombinuje tradiční stavební materiál s moderní robotickou technologií, čímž

otevřít prostor pro další vývoj v oblasti robotizace zděicích prací. Přestože firma Wienerberger pochází z Rakouska, vývoj zděicího robota byl iniciován především českou divizí této společnosti, a to ve spolupráci s tuzemskými výzkumnými institucemi, univerzitami a odborníky z praxe [37].

3.3.1 Technické parametry

Prototyp zděicího robota verze V1 je na fotografiích zobrazen ve stavu bez kapotáže, což umožňuje pohled na vnitřní mechanické a elektronické komponenty. Novější modely již standardně disponují ochranným opláštěním. Do budoucna se uvažuje o rozšíření funkcionality prostřednictvím přídavného modulu, který bude umístěn mezi rameno a základnu robota. Tento rozšiřující prvek by měl umožnit navýšení maximální výšky zdění ze stávajících 3,25 m až na 5 m, čímž se výrazně rozšíří pracovní rozsah systému [37].



Obr. 39) Zděicí robot WLTR firmy Wienerberger s.r.o poprvé na stavbě [88]



Obr. 40) Pohled na koncový efektor (griper) zdícího robotu WLTR [88]

Hlavní parametry

- Dosah - 3,25 m od paty zdiva
- Rychlost zdění - průměrně 7,5 m²/hod (max 10 m²/hod)
- Obsluha - 1 x operátor + 1 x pomocník dělník (zedník)
- Připojení - elektrická energie + voda
- Váha - 2 500 kg
- Rozměry

New Business
& Ventures
we are wienerberger

Obr. 41) Technické parametry a varianty lokálního přesunu robotu WLTR pomocí elektrického paletového vozíku nebo jeřábu [38]

Rychlost zdění odpovídá spotřebě jedné palety Robot-ready cihel za přibližně 30 minut, a to za předpokladu, že se jedná o rovnou stěnu s minimálním počtem otvorů (např. pro okna a dveře) a bez složitých tvarových přerušení. V případě složitější geometrie zdiva nebo vyšší členitosti může být výkon robotu snížen až o 25 % [37].

Tab 1) Základní technické parametry zdícího robotu WLTR [37]

Parametr	Hodnota	Parametr
Rozměry zařízení (Š × D × V)	78 cm × 340 cm × 215 cm	Rozměry zařízení (Š × D × V)
Elektrická přípojka	3 × 400 V AC, 32 A	Elektrická přípojka
Připojení tlakové vody	≥ 2 bar	Připojení tlakové vody
Provozní teplota pracovního prostředí	5–40 °C	Provozní teplota pracovního prostředí
Minimální délka zdi	5 m	Minimální délka zdi
Maximální užité zatížení v patře	15 kN (tj. cca 1 530 kg) při rozestupu břemen ≥ 1,5 m	Maximální užité zatížení v patře
Typ cihel	Porotherm 30 RR Profi Dryfix (Robot-ready)	Typ cihel
Typ pojiva	Zdicí pěna Porotherm Dryfix2	Typ pojiva

Zadání zdiva provádí obsluha pomocí jednoduchého rozhraní, kde operátor definuje počáteční a koncový bod zdiva a specifikuje umístění otvorů. Pro zajištění plynulého provozu je nezbytná asistence jednoho pomocného pracovníka, který zajišťuje zásobování robotu novými paletami cihel a zároveň vykonává pomocné činnosti, jako je příprava a vkládání dořezaných cihel nebo instalace kotevních spon pro napojení stěn. Příkon robotu činí přibližně 1,5 kW. Ve stand-by režimu je spotřeba srovnatelná s klasickou žárovkou, zatímco při aktivním zdění odpovídá spotřeba přibližně rychlovarné konvici. Ve složené poloze má zařízení šířku 78 cm, což zaručuje, že nemůže být zcela uzavřeno ve vyzděném prostoru – průchody mezi místnostmi mají typicky minimální šířku alespoň 80 cm, což umožňuje přesun mezi jednotlivými místnostmi i po dokončení zdiva [37].

3.3.2 Manipulační a přepravní vlastnosti robotu

Přední část robotu je konstrukčně přizpůsobena pro najíždění elektrickým paletovacím vozíkem, pomocí kterého může být zařízení snadno přemístěno. V zadní části robotu jsou umístěna transportní kolečka, díky nimž může jediný pracovník robot přemísťovat po staveništi. Během pracovního cyklu se robot podél zdiva posouvá autonomně – konstrukce umožňuje vertikální zdvih centrální části, následovaný horizontálním posunem základny do další pracovní pozice. Zařízení obsahuje také manipulační oka, která umožňují jeho zavěšení a přesun např. pomocí jeřábu [37].

3.3.3 Cihly a pojiva využívaná pro robotické zdění

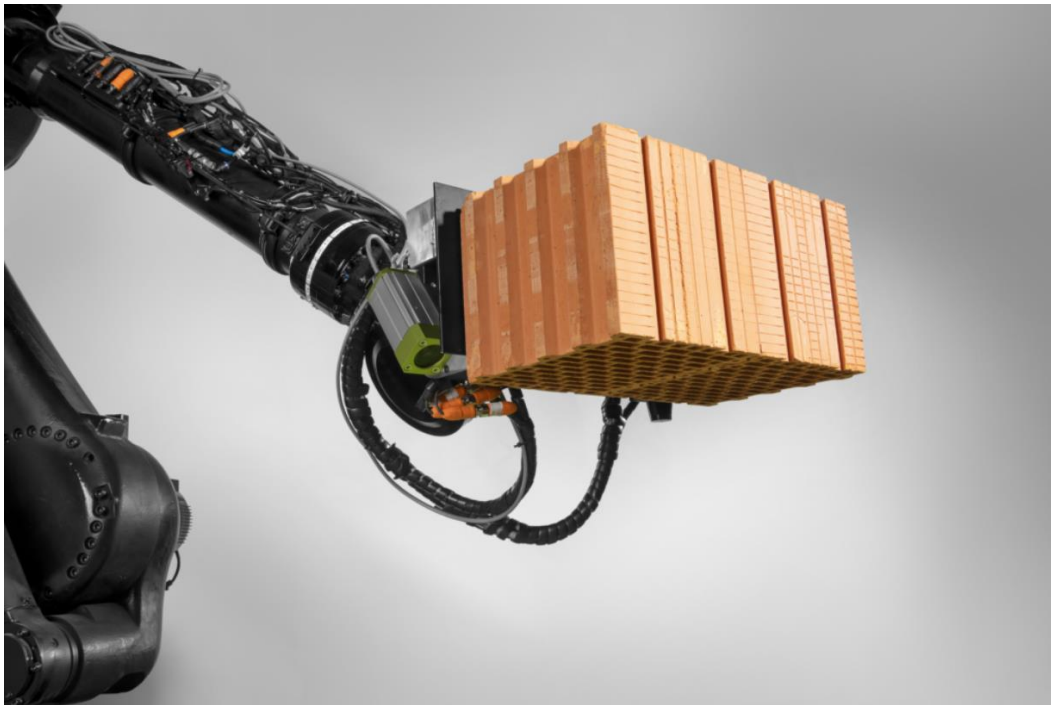
Robot je určen výhradně pro práci se speciálními zdicími prvky typu RR (Robot Ready). Tyto cihly zachovávají statické, požární i akustické vlastnosti standardních keramických cihel, avšak navíc obsahují integrovanou drážku pro přesné uchopení robotickým manipulátorem.

Tab 2) Typy cihel využívané pro robotické zdění, jejich tloušťka a pevnostní třída [37]

Typ cihly	Tloušťka	Pevnostní třída
Porotherm 30 RR Profi Dryfix	30 cm	P10 / P15
Porotherm 24 RR Profi Dryfix	24 cm	P10 / P15
Porotherm 19 AKU RR Profi Dryfix	19 cm	P15 (akustická cihla)



Obr. 42) Cihla Porotherm 30RR Profi se zateplením pro robotické zdění vystavená na Stavebním veletrhu Brno 2025 (Autor: Karel Procházka)



Obr. 43) Pohled na cihlu POROTHERM manipulovanou koncovým efektem zdícího robotu WLTR [39]

V současné době robot využívá jako pojivo zdící pěnu Porotherm Dryfix, která je aplikována ve dvou paralelních pruzích. Nanášení pěny probíhá v souladu s technologickým postupem stanoveným výrobcem, analogicky jako při klasickém ručním zdění. Do budoucna se předpokládá rozšíření systému o možnost celoplošného nástřiku pěny Dryfix, a to zejména s ohledem na provozní podmínky na staveništi, například při zvýšené vlhkosti nebo větrném počasí, kde může být stávající systém méně stabilní. Dále se počítá s možností implementace systému pro aplikaci tenkovrstvé zdící malty (resp. zdícího lepidla), která však představuje tzv. mokré technologický proces. Tento způsob spojování cihel je z pohledu robotizace výrazně náročnější na přesnost dávkování, časovou koordinaci a čištění systému, a proto je jeho plná integrace do automatizovaného zdění technologickou výzvou pro další vývoj [37].

3.3.4 Sekvence pracovního cyklu robotu

Pro zajištění efektivního a přesného provozu zdícího robotu je nutné dodržet následující pracovní sekvenci, která zahrnuje jak přípravu staveniště, tak samotný proces ukládky cihel [37].

a) Příprava staveniště a robotu

Před zahájením zdění je nezbytné přesně určit polohu robotu a umístění palet s cihlami vůči vyzdívávané konstrukci. Dále je nutné mít připravenou první řadu zdiva, která slouží jako výchozí základ pro navazující vrstvy. Robot musí být připojen k elektrické síti a tlakovému vodovodnímu rozvodu, který slouží pro provoz podpůrných systémů [37].

b) Zaměřování

Následuje zaměření pracovní roviny pomocí křížového laserového systému, který definuje přesnou výšku a orientaci ukládané vrstvy. Tato rovina slouží jako referenční úroveň, vůči níž robot kontinuálně koriguje výšku ukládaných cihel, čímž je zajištěna vysoká přesnost a rovinnost zdiva [37].

c) Zadáání vstupních parametrů a samotná pokládka cihel

Obsluha vloží do řídicího systému požadované parametry konstrukce (délka, výška, umístění otvorů apod.). Následně je spuštěna automatizovaná sekvence ukládky. Koncový efektor (tzv. griper) je vybaven soustavou senzorů a laserových čidel, které zajišťují detekci palety s cihlami, přesné uchopení cihel pomocí profilovaných drážek typu Robot Ready a zároveň umožňují identifikaci vadných nebo poškozených cihel, které jsou následně vyřazeny z procesu. Po uchopení dvou cihel je ve vstupní zóně robotu aktivováno nanášení zdicí pěny – dvě trysky aplikují pojivo ve dvou paralelních pruzích na ložnou plochu cihel. Následuje přesun efektoru do místa uložení, kde jsou cihly osazeny do vyzdívávané konstrukce. Průměrná doba potřebná pro uchopení a uložení dvou cihel činí přibližně 40 sekund, tedy 20 sekund na jednu cihlu. Tento čas se může mírně lišit v závislosti na konkrétní vrstvě zdiva či tvarové složitosti úseku [37].

3.3.5 Vhodné konstrukční situace

Robotické zdění nachází své uplatnění především v případech dlouhých, rovných a opakujících se úseků zdiva, kde se vyskytuje minimum konstrukčních otvorů, rohů a tvarových komplikací. Typicky se jedná o:

- dělicí a výplňové stěny v interiérech průmyslových a logistických hal
- zdivo v rámci komerčních nebo prodejních objektů
- příčky a vnitřní nenosné konstrukce

Do budoucna se počítá s rozšířením využití i v oblasti výstavby bytových domů, a to zejména tam, kde lze stavební řešení navrhnout s ohledem na efektivitu robotického pracovního cyklu [37].

3.3.6 Perspektivy a technologické výzvy

Pro další rozvoj robotizace ve zdění bude klíčové zaměřit se na následující oblasti:

- pokračující vývoj softwarových nástrojů, zejména pro zpracování BIM dat, optimalizaci trajektorií a adaptivní řízení robotu při práci v reálném prostředí staveniště
- rozšíření portfolia zpracovatelných stavebních materiálů, zejména vývojem nových typů cihel a tvarovek optimalizovaných pro robotické manipulátory a automatizované ukládání [37]

3.4 BOD2

Konstrukční 3D tiskárna BOD2 je výsledkem let probíhající modernizace a zlepšování designu vůbec první evropské 3D tiskárny BOD. Díky svému unikátnímu modulárnímu designu je perfektním řešením pro spoustu pracovních variací. Tiskárna BOD2 kombinuje roky zkušeností na půdě výzkumu a jejího užití po celém světě. Nejedná se o prototyp a je výsledkem dodání více než 50 tiskáren na globální trh v předchozích 3 letech. Všechny části BOD2 jsou vyrobeny z vysoce kvalitních materiálů a byly pečlivě navrženy tak, aby splňovaly vysoké požadavky stavebního průmyslu jak z hlediska rychlosti tisku, tak i stability a odolnosti. Jedná se o vlajkový produkt firmy COBOD, podporovaný softwarem COBOD „Slicer“, který připravuje navržené 3D modely, a pak je konvertuje na soubory pro 3D tisk. Sila skladují suchý cement, dávkovací zařízení mísí materiál a čerpadlo dodává míchaný beton do 3D tiskárny [40].



Obr. 44) Portálová konstrukční 3D tiskárna BOD 2 [40]

3.4.1 Konstrukce, přednosti a technické specifikace

Modulární příhradová konstrukce řeší dva velké problémy napříč konstrukčním 3D tiskem: Různé projekty pracují s odlišnými rozměry a tvary a díky modulární konstrukci BOD2 může být tiskárna konfigurována přímo pro daný projekt. 3D tiskárna může být rozšířena o moduly tak, aby pokryla celý projekt a v případě menších projektů mohou být moduly naopak zase odebrány. Nízká hmotnost v kombinaci s neuvěřitelnou tuhostí ocelové příhradové konstrukce zaručuje tuhou, robustní konstrukci, která odolává hrubému zacházení a zajišťuje stabilní a spolehlivý tisk rok co rok [41].

Konstrukčně nově přepracovaná tangenciální ocelová tryska umožňuje bezprecedentní rozsah kontroly povrchové kvality a textury povrchu. Díky neustálému sledování směru pohybu tiskové hlavy má tryska při tisku stěny zároveň funkci jejího vyhlazování. Kombinace tangenciálního ovládání a klapky umožňuje následující výhody: Redukce množství omítek a nižší požadavky na následné úpravy stěn. Snížení odpařování vody minimalizací plochy povrchu stěny. Vyhlazením vytištěné vrstvy a vrstvy pod ní je vytvořena vyhlazená a rovná stěna připravena k omítnutí [41].

3D tiskárna BOD2 je nejrychlejší konstrukční 3D tiskárna na trhu. Pohybový systém je zajišťován servopohony a s rychlostí až 1000 mm/s. Bez bezpečnostních zábran může tiskárna operovat v rychlostech do 250 mm/s. Pro větší rychlosti musí být instalována bezpečnostní zábrana v souladu s certifikacemi EU. Díky těmto rychlostem je tato technologie v porovnání s tradičními stavebními technologiemi ještě konkurenceschopnější [41].

Při tisku vyžaduje tiskárna BOD2 pouze 3-4 operátory. Společnost COBOD doporučuje vytvořit tým složený z operátora tisku, operátora materiálu, pomocného operátora materiálu a jednoho dalšího pomocného pracovníka. Tentýž tým může být také vyškolen pro montáž a demontáž 3D tiskárny na staveništi za pomoci jeřábu. Jednoduchost použití a minimální počet pracovníků pro obsluhu výrazně snižují náklady na lidské zdroje a optimalizují efektivitu na staveništi [41].

Pro usnadnění procesu v souladu s průmyslovými standardy byl BOD2 vyvinut k tisku z široké škály materiálů. To zákazníkům také umožňuje využívat materiály schválené jejich místními úřady. Extrudér zvládne zpracovat i kamenivo o průměru 10 mm a lze tak tisknout nejen z obyčejné malty, ale i ze skutečného betonu [41].

Systém rychlého uvolnění trysky dovoluje jednoduchou výměnu mezi tryskami pro tisk vrstev různých šířek (20-100 mm) a různých výšek (10-40 mm), a to za méně než dvě minuty. Volitelné tangenciální ovládání (software a hardware) zajišťuje, že tisková hlava sleduje směr tisku, což vede k tisku rovných a hladkých stěn [41].

Motory a řídicí jednotky jsou vyráběny v Německu ze součástek nejvyšší kvality. Všechny ocelové vazníky jsou vyrobeny z velmi houževnaté a odolné oceli S355. Veškeré části 3D tiskárny jsou vyrobeny v souladu s hodnocením IP66 (hodnoceno jako „prachotěsné“ a odolné vůči rozbouranému moři či silným vodním proudům) pro venkovní použití v náročných podmínkách a jsou bezpečné i ve vlhkém a mokřem prostředí [41].

Proprietární program společnosti COBOD „Slicer“ se řídí průmyslově standardizovaným G-kódem a během pár minut konvertuje soubory CAD do 3D tisknutelných souborů, což odstraňuje potřebu robotického programování. Senzorické mapování kompenzuje plochy, které nejsou zcela rovné. Webové rozhraní zajišťuje uživatelsky a dotykově přívětivé ovládání tiskárny přes WiFi nebo ethernet na všech zařízeních. Dvě kamery připevněné na tiskovou hlavu poskytují živý monitoring tisku na všech ovládacích zařízeních [41].

BOD2 je vybaven osmi nouzovými vypínači. Všechny nosníky vysoké 5 m a níže jsou zakryty, aby se předešlo skřípnutí, uvíznutí prstů atd. Kompletní BOD2 konstrukční 3D tiskárna obdržela CE certifikát. Tiskárna BOD2 je plně v souladu se směrnicí EU o strojích a robotech [41].

Násypka tiskové hlavy: Malé dávky betonu lze ručně podávat přímo do násypky tiskové hlavy otvorem na její straně. To je užitečné pro testování nových materiálů. Míchací čerpadlo: Pro tisk vyžadující nepřetržitý průtok velkého množství betonu je doporučeno použít míchací čerpadlo, které dodává beton do tiskové hlavy hadicí. Dříve byla hadice zavěšena přes kladku a následně vedena do tiskové hlavy a často tedy docházelo k interakci mezi ní a operátory. Nový systém používá kabelové řetězy, které zajistí, že se hadice vždy pohybuje s tiskovou hlavou a nový systém tak eliminuje potřebu interakce operátorů s těžkou hadicí. Navíc je systém modulární a lze jej dodatečně namontovat na všechny stávající tiskárny. Extrudér: Zastavení a spuštění tisku/extruze je možné v libovolném bodě, což je potřeba při tisku stěn s otvory pro dveře a okna [41].

Při tisku na nerovný nebo špatně vyrovnaný povrch tiskárna měří vzdálenost k podkladu a shromažďuje data do „výškové mapy“. Při tisku prvních vrstev může tiskárna automaticky vyrovnávat tyto nerovné povrchy vrstvou po vrstvě, dokud nebude výsledný tisk zcela vyrovnaný. To zajistí vodorovnost horní stěny i u velmi nerovných základů [41].

Hlučnost tiskárny dosahuje méně než 70 dB (běžný rozhovor se pohybuje okolo cca 60 dB), takže tiskárna je poměrně tichá. Doporučené operační teploty se pohybují v rozmezí od 5 do 35°C. Maximální šířka tiskárny je 14,62 m, maximální výška 8,54 m a maximální délka je bez limitu. Tok materiálu při tisku dosahuje hodnoty až 7,2 m³/hod [42].

3.4.2 Oblasti využití

Společnost COBOD má široké spektrum působnosti. Firma dodává produkty do průmyslového odvětví, zastavuje obytné zóny moderními domy, ale tiskne také komerční budovy a stavby pro

veřejnost. Co se průmyslu týče, ve spolupráci s firmou Holcim a GE jsou tisknuty základy větrných turbín. Dále lze tisknout i skladovací nádrže nebo rovnou celé tovární budovy. Nízká obytná zástavba, drobné domečky či jedno až tří podlažní budovy s přidruženou garáží jsou už rutinou. Pro komerční a veřejný sektor lze tisknout kostely a mešity, sklady, kanceláře, ale i školy [\[43\]](#).



Obr. 45) 3D vytištěný základ větrné turbíny ve spolupráci s firmami Holcim a GE Renewable Energy [\[43\]](#)



Obr. 46) První německý 3D tištěný obytný dům ve spolupráci s firmou PERI [\[43\]](#)



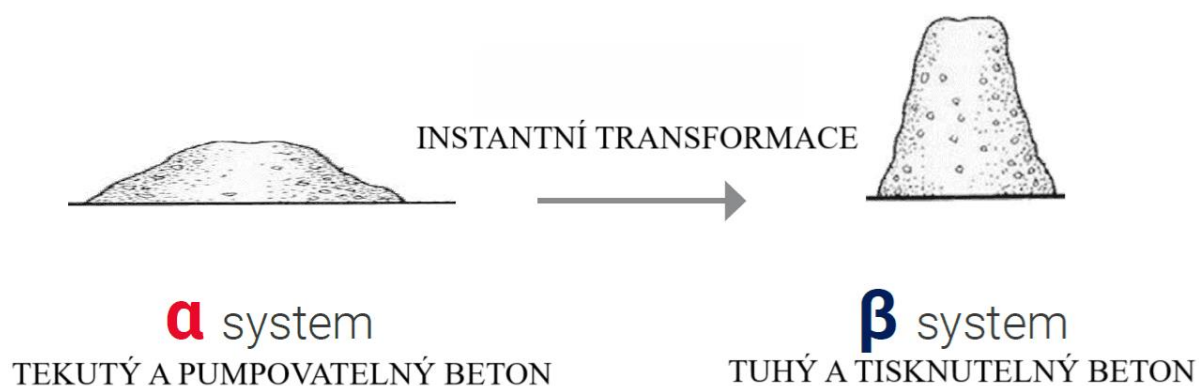
Obr. 47) První 3D tištěná škola na světě v Malawi, Afrika ve spolupráci s firmou 14Trees (Holcim) [\[43\]](#)

3.4.3 Materiály

Nezbytnou součástí 3D konstrukčního tisku je materiál, který je k tisku použit. Betonové řešení D.fab, umožňující výrazné úspory nákladů, je významným krokem ve směru řádné komercializace technologie a stává se funkčním řešením ve stavebním průmyslu. Řešení suchých maltových směsí „Ready-to-mix“ lze snadno aplikovat v různých 3D tiskárnách a demonstračních projektech [\[44\]](#). Navzdory výhodám 3D konstrukčního tisku s použitím materiálů na bázi cementu je stále třeba překonat určité výzvy. Mezi ně se řadí závislost na předbalených/suchých maltových směších, vysoký obsah cementu v těchto materiálech, vysoká cena za předmíchání směsi, vysoké náklady na dopravu suché směsi na místo tisku či specifičnost receptury, která je pro 3D tisk tak typická [\[45\]](#).

a) Betonové řešení D.fab

Průlomem v navrhovaném řešení je patentovaný systém přísad patřící do rodiny přísad CEMEX D.fab určený pro digitální (D) výrobu (fab) betonu. Systém D.fab ve spojení s funkcemi 3D tiskového stroje činí technologii betonu velmi robustní nezávisle na použitém cementu, písku, doplňkových cementových materiálech (např. struska nebo popílek) nebo šterku. Beton splňuje kritéria čerstvosti, tvrdosti i trvanlivosti, požadovaných pro 3D tisk. Tento beton je z 99 % tvořen klasickým betonem (cement, voda a písek nebo šterk) a z 1 % Dfab přísadami. Těmito přísadami jsou superplastifikátor, prodlužující dobu zpracovatelnosti a zlepšující konzistenci betonu pro jeho přepravu systémem do doby, než je tiskovou hlavou nanесena další vrstva. Druhou přísadou je tužidlo, jehož účelem je právě po nanесení této další vrstvy transformovat strukturu betonu tak, aby zachoval svůj objem a zároveň navýšil svoji pevnost, což umožňuje okamžité nanесení následné tiskové vrstvy, čímž se urychlí proces tisku a šetří se materiál [\[45\]](#).



Obr. 48) Okamžitá transformace betonové směsi [45]

Mechanické vlastnosti betonu D.fab jsou srovnatelné s běžným betonem. Může být také akcelerován za účelem zvýšení pevnosti v raných fázích tisku, a to zejména v prvních 4 hodinách, kdy se pak pevnost akcelerovaného betonu přibližuje k 5 MPa, či až do 24 hodin, kdy namísto původních 12 MPa může pevnost dosahovat až 35 MPa. Trvanlivost je jednou z hlavních vlastností betonu. Systém přísad D.fab zlepšuje smršťovací vlastnosti betonu ve srovnání s konvenčním betonem o 22 % a až o 49 % ve srovnání se suchou maltovou směsí, díky čemuž je 3D tištěný beton odolnější. Pokud jde o poškození mrazem a rozmrazováním, zkoušky prokázaly minimální degradaci materiálu, z důvodu velmi malého množství nakumulovaného odpadu oproti konvenčnímu betonu. Dalším důležitým parametrem trvanlivosti betonu je jeho schopnost odolávat vodě. Použití hydroizolační přísady interně nebo externě zlepšuje vodotěsnost a trvanlivost 3D tištěného betonu. V poslední řadě, řešení D.fab nabízí ekologičtější řešení, jelikož stopa CO₂ je 1,5krát nižší než u malty běžné používané při 3D tisku a je tak cestou k nabídce udržitelnějšího a životaschopnějšího materiálového řešení [45].

b) Řešení suché maltové směsi

Jednoduché a pohodlné řešení 3D tisku s maltou se nejlépe hodí pro ukázkou technologie a stavební projekty menších měřítek. Materiál je výrazně dražší, a to 5-10 krát, než skutečný beton, ale může sloužit jako perfektní prostředek pro budoucí 3D konstrukční tisk. Malty umožňují hladší konzistenci materiálu při tisku s menší velikostí zrn a dávají 3D tištěným stěnám esteticky příjemný vzhled a dojem, zatímco betonové řešení D.fab má vzhled drsnější [46].

c) Srovnání betonu a malty

Betonové řešení D.fab je adaptabilním materiálovým řešením. Receptura může být změněna dle klimatu a dostupných surovin, zatímco recepturu suché směsi neboli malty nelze měnit a je vždy totožná. D.fab je vyvinut pro venkovní konstrukce, protože obsahuje šterk, který odolává praskání způsobenému vysycháním. Naopak suchá směs při umístění venku praská, jelikož šterk neobsahuje. Dále je D.fab určen pro velkoobjemové stavby, protože až z 99% využívá suroviny z místních zdrojů. Suché směsi lze aplikovat především v menších projektech, protože jsou velmi drahé [45].

3.4.4 Systém dopravy materiálu

Pro zajištění plynulého provozu 3D tiskárny BOD2 je využíváno externího systému dopravy tiskového materiálu, tvořeného kombinací zásobníku cementu, mini dávkovacího zařízení

a dvouválcového pístového čerpadla. Suchý cement je skladován ve speciálním silu umístěném v těsné blízkosti staveniště. Odtud následně putuje do mísiče, kde je smíchán s vodou, kamenivem a chemickými přísadami. Směs je následně dopravena do tiskové hlavy prostřednictvím hydraulického čerpadla, které pracuje s vysokým tlakem a reguluje tok materiálu na základě požadovaného množství v tiskové trysce. Celý systém je navržen tak, aby umožnil využití lokálně dostupných betonových surovin, čímž výrazně snižuje logistické nároky i náklady na materiál, a zároveň podporuje udržitelnost stavebních projektů [47], [48], [49].



Obr. 49) Vlevo se nachází silo pro skladování suchého cementu, uprostřed dvouválcové hydraulické pístové čerpadlo a vpravo dávkovací zařízení směsi [50]

3.4.5 Porovnání portálové 3D tiskárny a řešení s robotickým ramenem

Při volbě technologie pro 3D tisk ve stavebnictví existují dvě hlavní koncepce konstrukčního řešení – portálová (gantry) konstrukce a robotické rameno. Každé z těchto řešení má své výhody i omezení. Zatímco portálová 3D tiskárna nabízí vyšší přesnost, lepší stabilitu při tisku větších struktur, možnost škálování tiskového prostoru podle potřeby a její konstrukce je méně náchylná k odchylkám při dlouhém tisku a umožňuje vyšší rychlost a opakovatelnost, tak robotické rameno vyniká vyšší flexibilitou pohybu, snadnější přepravitelností a schopností tisku i složitějších křivočarých geometrií. Je však omezené dosahem a přesností v porovnání s gantry systémem. Z hlediska výstavby plnohodnotných betonových staveb se portálové systémy ukazují jako efektivnější volba, zejména pokud je cílem tisk rozsáhlých a vysokých konstrukcí [51].

3.5 BOD3

Technologie 3D tisku stavebních konstrukcí v posledních letech zaznamenala výrazný pokrok, a to především díky inovacím směřujícím ke zvýšení efektivity, přesnosti a adaptability

stavebních procesů. Významným milníkem v tomto vývoji je představení nové generace 3D stavební tiskárny BOD3, která představuje zásadní technologický posun oproti předchozímu modelu BOD2. Nová konstrukce a technické vylepšení této tiskárny otevírají další možnosti pro rozvoj robotizace ve stavebnictví a přispívají k širšímu uplatnění automatizovaných systémů ve stavební výrobě [\[52\]](#).



Obr. 50) Nová generace stavební 3D tiskárny BOD3 včetně přidruženého systému dopravy materiálu [\[53\]](#)

3.5.1 Hlavní vylepšení oproti modelu BOD2

a) Přejít na pozemní kolejnicový systém

Zásadní konstrukční inovací je nahrazení modulárního rámu pozemním kolejnicovým systémem, který umožňuje snadné a prakticky neomezené prodlužování tiskové oblasti. Narozdíl od předchozího modelu BOD2, kde bylo nezbytné přidávat nové vertikální moduly, lze u BOD3 dosáhnout rozšíření tiskové délky pouhým přidáním kolejnic, což významně zkracuje čas potřebný pro instalaci a snižuje náklady na montáž [\[52\]](#).

b) Nepřetržitý tisk více budov

Implementace pozemního kolejnicového systému umožňuje nepřetržitý tisk více objektů bez nutnosti demontáže a opětovného nastavování tiskárny. Tisková hlava se plynule přesouvá mezi jednotlivými základovými plochami, což výrazně zvyšuje produktivitu zařízení a zkracuje celkovou dobu realizace stavebních projektů [\[52\]](#).

c) Pokročilý systém řízení hadic (AHMS)

Model BOD3 je vybaven pokročilým systémem řízení hadic (AHMS), který optimalizuje tok tiskového materiálu a umožňuje přímé dávkování aditiv přímo do tiskové směsi. Tento systém zajišťuje konstantní kvalitu materiálu během celého procesu tisku a umožňuje jeho adaptaci na aktuální provozní a klimatické podmínky na staveništi [\[52\]](#).

d) Univerzální X-nosník

Významnou konstrukční změnou je použití univerzálního X-nosníku, který slouží jako hlavní vodící prvek pro pohyb tiskové hlavy v ose X. Tento nosník je navržen s ohledem na budoucí rozšiřitelnost tiskárny, umožňující integraci nových technologických nástrojů. Tím je zajištěna vysoká flexibilita systému bez nutnosti zásadních konstrukčních zásahů [52].

e) Centralizované ovládací stanoviště

Tiskárna BOD3 je nově vybavena centralizovaným ovládacím stanovištěm, které umožňuje komplexní řízení všech funkcí tiskárny z jednoho místa. Tento prvek přispívá ke zvýšení uživatelského komfortu a výrazně zjednodušuje koordinaci a správu tiskových operací v průběhu celého stavebního procesu [52].

3.5.2 Význam pro rozvoj stavební robotizace

Zavedení modelu BOD3 představuje významný milník v rozvoji průmyslového využití 3D tisku ve stavebnictví, zejména v oblasti realizace rozsáhlejších a konstrukčně složitějších stavebních projektů. Tento systém umožňuje dosažení vyšší efektivity výstavby, snižuje závislost na lidské pracovní síle a podporuje standardizaci výrobních procesů v rámci jednotlivých stavebních fází. Díky flexibilnímu konstrukčnímu řešení je tiskárna BOD3 vhodná jak pro individuální projekty, tak pro sériovou výstavbu obytných a komerčních objektů [52].

3.6 Modulární tiskové řešení společnosti XtreeE

Francouzská společnost XtreeE se zaměřuje na velkoformátový 3D tisk betonových konstrukcí za použití šesti osých průmyslových robotických ramen od firmy ABB. Nasazením této technologie je možné realizovat geometricky složité tvary s vysokou mírou přesnosti a materiálové úspornosti, čímž se otevírá prostor pro nové architektonické a konstrukční přístupy ve stavebnictví. Systém disponuje pokročilým senzorem síly a poziční zpětnou vazbou, která umožňuje adaptaci trajektorie v reálném čase. Tisk je řízen digitálně pomocí softwarové nadstavby založené na kombinaci CAD/CAM a vizuálního programování. Systém lze synchronizovat s digitálním dvojčtem stavby a integrovat do pracovních toků založených na metodě BIM [54].

3.6.1 Technické parametry

Nejčastěji jsou využívány modely ABB IRB 8700 nebo obdobné typy s vysokou nosností a dosahem ramene až 3,5 metru. Tisková hlavička je připojena k externímu mísicímu a čerpacímu zařízení, přičemž systém umožňuje extruzi směsí s řízenou reologií. Pracovní rozlišení nanášení vrstev se pohybuje v rozmezí 5–20 mm, podle typu trysky a geometrické složitosti výtisku. Tisk je realizován ve vrstvách o výšce přibližně 10 mm, s rychlostí až 300 mm/s [54].

3.6.2 Tiskové hlavy

Společnost XtreeE rozlišuje tři základní typy tiskových hlav – 1K, 2K a 3K+, které se odlišují především v oblasti výkonových parametrů, průtočného objemu a míry přizpůsobení různým typům betonových směsí. Nejvýkonnější varianta 3K+ je navržena pro vysokorychlostní tisk s použitím směsí s nízkým vodním součinitelem a vysokou reologickou stabilitou, což umožňuje dosažení přesné geometrie i u náročnějších struktur. Celý systém je koncipován jako

otevřený vůči různorodým typům cementových kompozitů, včetně nízkouhlíkových betonů, geopolymerních směsí, sádrových kompozitů nebo alternativních materiálů na bázi jílu [55].



Obr. 51) Na obrázku jsou znázorněna schémata tři základních tiskových hlav, zleva 1K, 2K, 3K+ [55]

- 1K – Nejjednodušší, nejlevnější a nejpřímochařejší typ tiskárny. Je určen pro výrobu relativně velkých a jednoduchých geometrických tvarů vysokou rychlostí s využitím speciálně upravených cementových směsí.
- 2K – Navržen pro firmy, které chtějí rychle a jednoduše dosáhnout vysoké úrovně 3D tisku s použitím specializovaných cementových materiálů za přijatelnou cenu.
- 3K+ – Nejvyspělejší velkoformátová technologie současnosti. Jediný způsob, jak spojit vysokou produktivitu s komplexními návrhy při použití materiálů s vysokou pevností a nízkým dopadem na životní prostředí [55].

3.6.3 Základna robotu

a) Lineární pojezd

Robotická ramena XtreeE mohou být osazena na lineární pojezdové dráze, jejíž délka se typicky pohybuje v rozmezí 4 až 12 metrů. Toto uspořádání umožňuje podélný pohyb robotu během tisku a výrazně rozšiřuje jeho pracovní dosah. Pro optimalizaci výškového umístění může být mezi robotem a pojezdovou jednotkou integrován výškový podstavec o rozměru 500 mm [56].

b) Statický podstavec

Alternativně může být robot instalován na pevný základový podstavec, který slouží k fixaci robotu na konkrétní místo bez možnosti horizontálního posuvu. Tato varianta je vhodná zejména pro tisk menších objektů nebo v případě, kdy není nutný rozšířený pracovní rozsah [56].



Obr. 52) Vlevo robotické rameno ABB na lineárním pojezdu a vpravo na statickém podstavci [56]

3.6.4 Používané materiály a pojiva

Základním materiálem je speciálně upravená cementová nebo geopolymerní směs s řízenými viskózními vlastnostmi. XtreeE klade důraz na vývoj ekologických alternativ – včetně nízkouhlíkových betonů, popílkových kompozitů a experimentálních směsí bez tradičního cementu. Pojivový systém je navržen tak, aby umožňoval rychlé tuhnutí bez segregace nebo deformace vytištěné vrstvy. V některých aplikacích je využívána kombinace tisknutého obalu a zalití vnitřního prostoru standardním betonem [54].

3.6.5 Sekvence pracovního cyklu

Pracovní cyklus začíná digitálním návrhem konstrukce, který je převeden do G-kódu s ohledem na trajektorii, rychlost tisku a parametry vrstvení. Následuje mísení materiálu, kontinuální doprava k trysce a samotný tisk v předem definovaných vrstvách. Robot se pohybuje podle optimalizované trajektorie a současně upravuje výšku trysky, tlak a tok materiálu dle zpětné vazby ze senzorů. V případě vícekomorového systému lze využít více směsí současně (např. jádro a obal konstrukce) [54].

3.6.6 Software

Softwarový ekosystém XtreeE tvoří komplexní nástrojové prostředí určené pro podporu celého procesu velkoformátového 3D tisku betonových konstrukcí – od návrhu geometrie až po monitorování průběhu realizace. Základním prvkem je modul XtreeE Slice, sloužící pro převod digitálních modelů na tiskové trajektorie. Na něj navazuje XtreeE Simulate, který pomocí metody konečných prvků umožňuje ověřit tisknutelnost a identifikovat možná konstrukční rizika. Pro samotné řízení procesu je určen XtreeE Control, umožňující nastavování parametrů tisku v reálném čase. Modul XtreeE Supervise poskytuje nástroje pro sledování tiskových dat, výkonových ukazatelů a generování dokumentace. Systém doplňuje knihovna XtreeE Library s předpřipravenými návrhy optimalizovanými pro tisk. Celé řešení je navrženo s důrazem na uživatelskou přívětivost, modularitu a možnost integrace s ostatními nástroji digitálního návrhu a řízení výstavby [57].

3.6.7 Vhodné konstrukční aplikace

Technologie je vhodná pro tisk:

- komplexně tvarovaných architektonických prvků (sloupy, panely)
- komponent technické infrastruktury (šachty, komory, potrubní uzly)
- nestandardních bednění a forem pro následnou výplň betonem
- designových prvků městského mobiliáře nebo nosných segmentů mostních konstrukcí

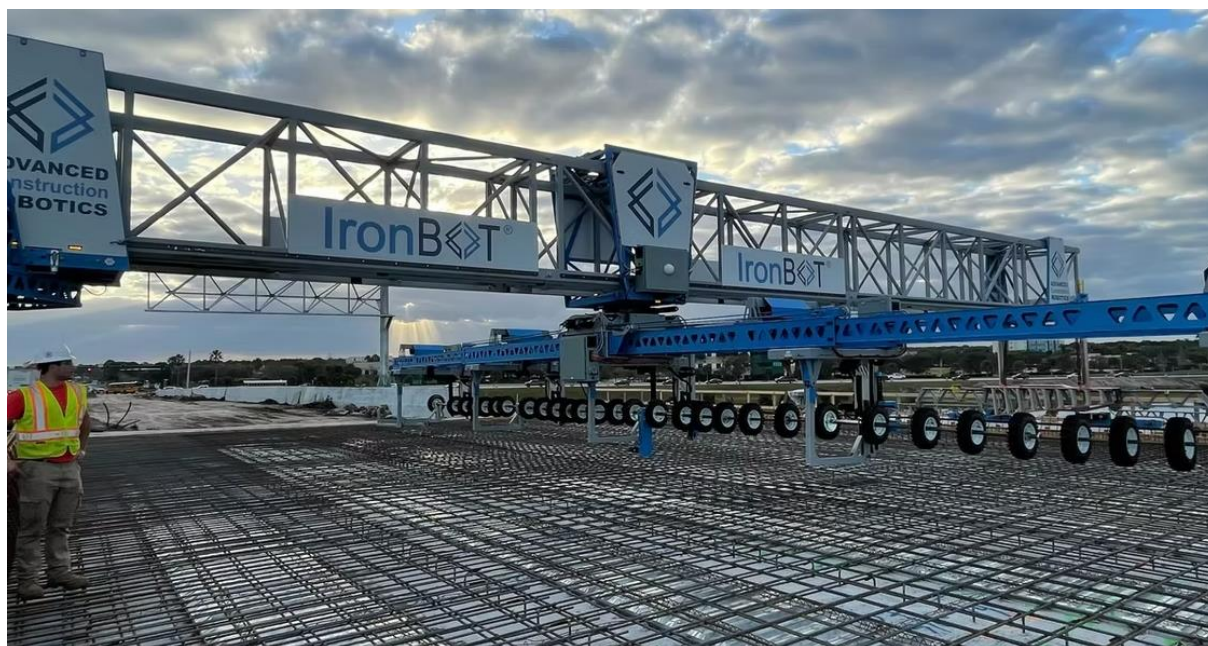
Vysoká přesnost a schopnost přizpůsobit geometrii v reálném čase umožňuje výrobu tvarově náročných komponent bez použití klasického bednění [\[54\]](#).

3.6.8 Perspektivy a technologické výzvy

Systém XtreeE představuje jedno z nejpokročilejších komerčně dostupných řešení pro robotický 3D tisk ve stavebnictví. Mezi aktuální výzvy patří zvyšování produktivity tisku, zajištění kompatibility s výztužnými systémy (např. integrace vláken nebo pokládka výztuže) a rozšíření směsových variant pro různé klimatické podmínky. Dalším směrem vývoje je posílení mobility systému a jeho adaptace na reálné podmínky staveniště mimo kontrolované prostředí haly. XtreeE zároveň aktivně spolupracuje s akademickými a průmyslovými partnery na vývoji tiskových protokolů a normativních rámců pro aditivní výrobu ve stavebnictví [\[54\]](#).

3.7 IRONBOT

S postupující automatizací stavebních procesů v souladu s principy Průmyslu 4.0 dochází k rozvoji pokročilých robotických systémů specializovaných na manipulaci se stavebními materiály. Významným představitelem této skupiny je IronBOT, robotický systém vyvinutý společností Advanced Construction Robotics (ACR), jehož primárním účelem je automatizace manipulace s těžkými výztužnými pruty přímo na staveništi [\[58\]](#).



Obr. 53) Robotický systém IronBOT při automatizované pokládce výztužných prutů na stavbě [\[58\]](#)

3.7.1 Konstrukce a princip činnosti

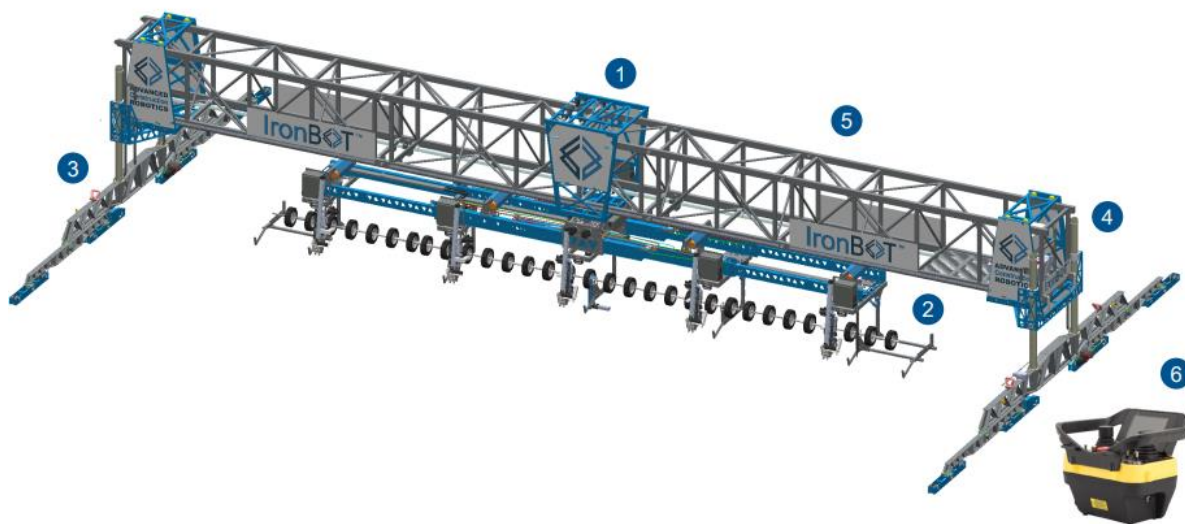
IronBOT je koncipován jako autonomní mobilní jednotka schopná přepravovat, polohovat a pokládat armovací pruty přímo na staveništi. Je vybaven robustní portálovou konstrukcí, která nese několik podsystémů:

- Manipulační zařízení – umožňující uchopení a přesné polohování jednotlivých prutů
- Integrované kamerové a senzorové systémy – pro detekci pracovního prostoru a orientaci v reálném čase
- Řídící jednotka – autonomně koordinuje pohyb robotu a jednotlivé manipulační operace v návaznosti na aktuální stav konstrukce
- Pojízdné jednotky – schopné pohybu po předem definovaných kolejnicích nebo přímo po zpevněném povrchu staveniště

Tento robotický systém je navržen tak, aby spolehlivě zvládal manipulaci s těžkými výztužnými pruty o hmotnosti až několika desítek kilogramů. Tím významně odlehčuje lidské pracovní síle a eliminuje potřebu ruční manipulace, zejména v těžko dostupných nebo rizikových oblastech staveniště.

V rámci stavebních operací IronBOT autonomně odebírá pruty ze zásobníku a následně je ukládá na přesně definované pozice podle projektové dokumentace. Polohování jednotlivých prutů probíhá s vysokou přesností, přičemž robotický systém průběžně vyhodnocuje aktuální polohu a neustále ji porovnává s plánovanými souřadnicemi. Celý proces je realizován s minimálním zásahem lidské obsluhy, jejíž role je omezena na dohledové a koordinační činnosti.

IronBOT může být nasazen jako samostatná jednotka, nebo může pracovat v kombinaci s robotickým systémem TyBOT, který na připravených průsečících výztužných prutů provádí automatizované vázání [59].



Obr. 54) Hlavní části PR IronBOT [58]

- 1) Vozík (tram) a otočné ložisko
-umožňuje boční a rotační nastavení pro přizpůsobení různým požadavkům staveniště
- 2) Výložník pro pokládku

- zdvihá a odděluje svazky výztuže pro pokládku

- umožňuje umístění podélných a příčných prutů

3) Nohy a pojezdové jednotky

- nastavitelná konstrukce nohou umožňuje přizpůsobení různým šířkám, výškám, příčným sklonům a úhlovým odchylkám

- pojezdové jednotky se pohybují po stávajících nebo dodaných kolejnicích

4) Napájení

- jeden generátor zajišťuje nepřetržitý provoz po dobu více než 50 hodin bez nutnosti doplňování paliva

5) Portálový systém

- odolná, lehká a snadno přepravitelná konstrukce

- snadná montáž na staveništi během 4–8 hodin

6) Vysílač „Belly Box“

- mobilní řídicí jednotka robotu umožňující komunikaci mezi robotem a supervizorem

[\[58\]](#)

3.7.2 Omezení a specifika využití

Přestože nasazení systému IronBOT představuje významný pokrok v oblasti automatizace stavebních prací, jeho efektivní využití je podmíněno splněním určitých technických a organizačních požadavků. Robotický systém vyžaduje dostatečně připravené pracovní prostředí s adekvátně upravenými povrchy umožňujícími bezpečný a plynulý pohyb, stejně jako zásobníky výztužných prutů vhodné pro automatizovanou manipulaci. V případě nepravidelných nebo konstrukčně složitých struktur může být nezbytné přizpůsobit proces pokládky specifickým podmínkám, případně zajistit asistenci lidské obsluhy k zajištění plynulého průběhu prací [\[58\]](#).

3.8 TYBOT

Automatizace stavebních procesů již dávno nepokrývá pouze oblasti, jako je pokládka cihel nebo 3D tisk konstrukcí, ale postupně proniká i do činností, které byly dosud považovány za výhradně manuální. Významným příkladem je automatizace vázání výztužných prutů, kde nachází uplatnění PR TyBOT, vyvinutý stejně jako IronBOT společností Advanced Construction Robotics (ACR). Tento robotický systém představuje pokrokové řešení umožňující urychlení a standardizaci procesu přípravy výztuží na staveništích, zejména v rámci infrastrukturních projektů, jako jsou mostní konstrukce, základové desky a betonové plochy [\[59\]](#).



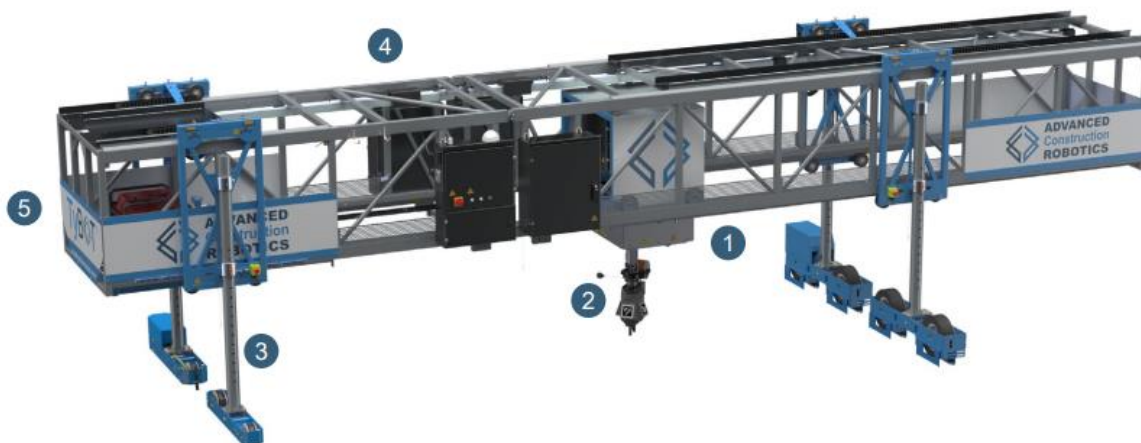
Obr. 55) Nasazení PR TyBOT pro automatizaci vázání výztuže při výstavbě mostu přes řeku Susquehanna [61]

3.8.1 Konstrukce a princip činnosti

TyBOT je koncipován jako automatizovaný systém instalovaný na portálové konstrukci, která se pohybuje nad připravenou armovací výztuží a jeho konstrukční řešení zahrnuje:

- Vázací mechanismus – pro aplikaci vázacího drátu kolem míst jejich křížení a vytvoření pevných spojů
- Přesné polohovací zařízení – umožňující lokalizaci jednotlivých průsečíků výztužných prutů
- Integrovaný kamerový a senzorový systém – detekuje polohu výztuže bez nutnosti předem definovaného digitálního modelu
- Řídící jednotka systému – zajišťuje adaptivní plánování pracovních operací v reálném čase a umožňuje robotu pružně reagovat na aktuální podmínky na stavbě
- Pojízdné jednotky – schopné pohybu po předem definovaných kolejnicích nebo přímo po zpevněném povrchu staveniště

Během provozu se TyBOT autonomně pohybuje nad pracovní plochou, samostatně identifikuje místa vázání a v detekovaných uzlech provádí aplikaci vázacího drátu. Po dokončení úkonu robot plynule přechází k dalšímu bodu, přičemž celý proces probíhá s minimální potřebou zásahu lidské obsluhy. Tento způsob práce přispívá nejen ke zvýšení efektivity a přesnosti armovacích prací, ale zároveň výrazně podporuje koncept autonomní stavební výroby v souladu se zásadami Průmyslu 4.0. [59].



Obr. 56) Hlavní části PR TyBOT [62]

1) Vozík (tram)

- obsahuje komponenty systému TyBOT umožňující schopnosti „vidět, myslet a jednat“
- je vybaven duálním kamerovým systémem pro autonomní identifikaci průsečíků výztuže
- pohybuje se po plně integrovaném kolejovém systému
- vázací modul je autonomně polohován během provozu

2) Vázací modul

- autonomně provádí vázání průsečíků výztuže
- umožňuje volbu hustoty vázání s pokrytím 100 %, 50 % nebo 33 %
- vázání je realizováno jak na spodní, tak na horní vrstvě armovací sítě

3) Nohy a pojezdové jednotky

- nastavitelné portálové nohy umožňují přizpůsobení různým šířkám a výškám pracovní plochy
- systém je schopen se přizpůsobit příčným sklonům, podélným sklonům a úhlovým odchylkám
- pojezdové jednotky se pohybují po stávajících kolejnicích finálních lišt, po přenosných kolejnicích nebo přímo po okrajových bednicích prvcích

4) Portálový systém

- konstrukce je odolná, lehká a snadno přepravitelná
- zatížení systému je výrazně nižší než u systému IronBOT, a proto není portálová konstrukce tak robustní
- součástí systému je integrovaný úložný prostor pro vázací modul a cívky s vázacím drátem

5) Napájení

- invertorový generátor Predator 8750 umožňuje nepřetržitý provoz až po dobu 10 hodin bez nutnosti doplňování paliva
- generátor je umístěn na výsuvné platformě integrované v portálové konstrukci
- konstrukce umožňuje snadný přístup ke generátoru pro obsluhu a údržbu [62]

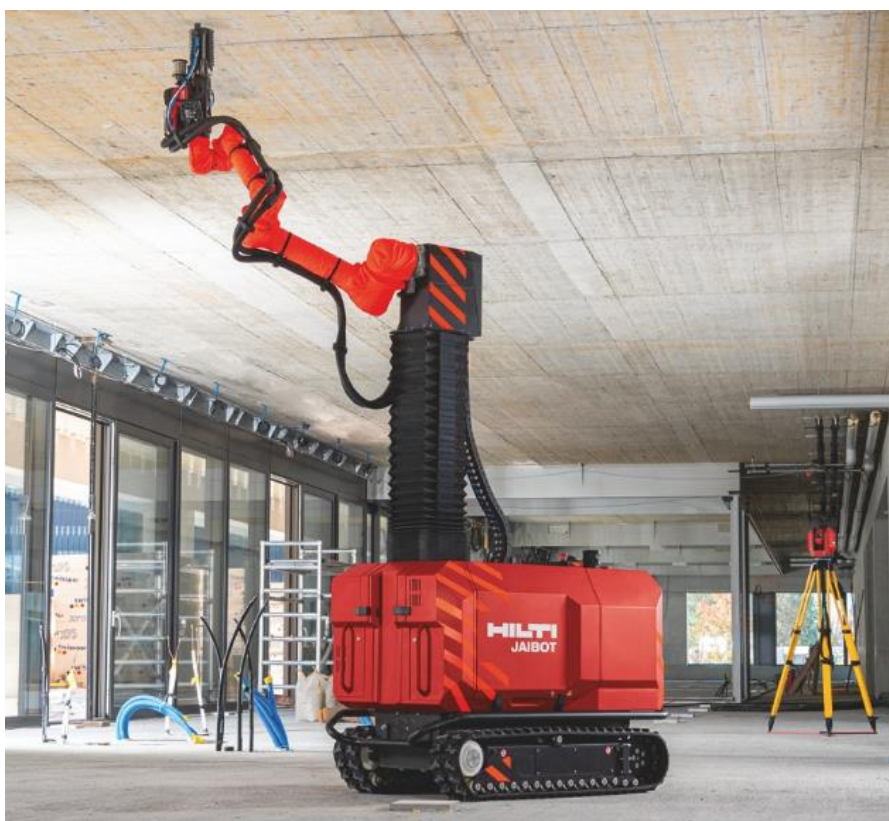
3.8.2 Omezení a specifika využití

Přestože nasazení systému TyBOT přináší řadu významných přínosů, jeho použití je spojeno také s určitými omezeními, která je nutné při plánování stavebních operací zohlednit. Robotický systém vyžaduje dostatečně připravené armovací sítě s přesně definovaným rozmístěním prutů, což může představovat komplikaci u složitějších nebo nepravidelných výztužných struktur. Adaptace TyBOTu na extrémně nepravidelné nebo atypické výztužné konfigurace je omezená, a v těchto případech může být nutné přistoupit k ručnímu vázání.

Dalším technickým omezením je potřeba správného rozměrového nastavení portálové konstrukce vzhledem k velikosti a geometrii pracovní plochy, aby bylo zajištěno optimální pokrytí vázací oblasti. V některých situacích je rovněž nezbytná přítomnost lidské asistence, zejména při přípravě armovacích sítí nebo při koordinaci více robotických jednotek pracujících současně na jednom staveništi [59].

3.9 JAIBOT

V souvislosti s postupující digitalizací a robotizací stavebních procesů v rámci konceptu Průmyslu 4.0 dochází k rozšiřování nasazení autonomních systémů přímo na staveništích. Jedním z významných představitelů této transformace je Hilti Jaibot, autonomní stavební robot vyvinutý společností Hilti Group, určený k efektivnímu a přesnému provádění vrtacích operací v betonových a ocelových konstrukcích [63].



Obr. 57) Nasazení robotu Hilti Jaibot při autonomním vrtání otvorů do stropní konstrukce [63]

3.9.1 Konstrukční řešení a hlavní subsystémy

Tento PR je navržen jako mobilní autonomní systém, jehož konstrukce zahrnuje následující komponenty:

- Mobilní platforma s vlastním pohonem – zajišťuje volný pohyb po staveništi
- Rameno s vrtacím mechanismem – pro přesné umístění a provádění vrtů do stropních i svislých konstrukcí
- Navigační a senzorický systém – využívá laserovou a kamerovou technologii pro autonomní orientaci v prostoru bez nutnosti fyzického značení
- Řídicí jednotka – je integrována s daty digitálního stavebního modelu (BIM)
- Napájecí systém – kombinuje přímé napájení ze sítě s akumulátorovým režimem pro krátkodobou autonomii [63]

3.9.2 Pracovní proces a způsob ovládání

Jaibot pracuje v úzké návaznosti na digitální model stavby v prostředí Building Information Modeling (BIM), který slouží jako hlavní zdroj dat pro jeho činnost. Po načtení stavebního modelu robot autonomně provádí vrtací operace na základě přesně definovaných souřadnic jednotlivých vrtů, čímž zajišťuje vysokou přesnost a konzistenci prováděných úkonů.

Role obsluhy je v tomto procesu minimální a spočívá především v monitorování průběhu prací a případném nastavování parametrů prostřednictvím mobilního ovládacího panelu (tabletu). Tento panel umožňuje nejen sledování aktuálního stavu operací, ale také správu realizovaných vrtů a v případě potřeby úpravy vrtacích strategií v reálném čase.

Nedílnou součástí pracovního procesu je automatická dokumentace všech provedených operací, která významně usnadňuje zpětnou kontrolu kvality, podporuje transparentnost prováděných prací a poskytuje důležité podklady pro efektivní řízení stavebního projektu [63].

3.9.3 Přínosy nasazení systému

Použití robotického systému Jaibot přináší na staveništích řadu zásadních výhod, které významně ovlivňují efektivitu a kvalitu realizovaných prací. Díky automatizovanému provádění vrtacích operací dochází k výraznému zvýšení produktivity a k podstatné časové úspoře oproti tradičním metodám. Robot zajišťuje vysokou přesnost polohování jednotlivých vrtů a minimalizaci chyb díky plné integraci s digitálním řízením na základě dat z BIM modelu. Nasazení Jaibotu zároveň vede k významnému snížení fyzické zátěže pracovníků, čímž přispívá ke zvýšení bezpečnosti práce na staveništi. Neoddělitelnou součástí provozu je také komplexní dokumentace všech provedených operací v reálném čase, což výrazně usnadňuje zpětnou kontrolu a řízení kvality stavebního procesu. Díky automatizaci základních úkonů dochází rovněž k optimalizaci využití lidských zdrojů, které mohou být následně nasazeny na odbornější a komplexnější činnosti v rámci projektu [63].

3.9.4 Limity a podmínky efektivního nasazení

Pro optimální využití robotického systému Hilti Jaibot je nezbytné splnit několik podmínek, které přímo ovlivňují efektivitu jeho nasazení na staveništi. Základním předpokladem je přesná příprava BIM modelu, který musí obsahovat veškeré relevantní vrtací body a odpovídat skutečnému stavu stavby. Dále je nutné zajistit rovný a dostatečně únosný povrch, který umožní bezpečný a plynulý pohyb robotu v rámci pracovního prostoru. V případech výskytu stísněných nebo členitých prostor je třeba pečlivě plánovat trajektorie pohybu a vhodně nastavit pracovní sekvence tak, aby bylo možné efektivně využít schopnosti robotu. Nedílnou součástí přípravy

je také počáteční investice do zařízení a odpovídající školení personálu, zaměřené především na práci s digitálními modely a obsluhu autonomního systému, aby byla zajištěna jeho správná integrace do stavebních procesů [\[63\]](#).

4 REŠERŠE VHODNÝCH STAVEBNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO POUŽITÍ V RÁMCI ROBOTIZACE STAVEBNÍCH ČINNOSTÍ

S postupujícím rozvojem koncepce Průmyslu 4.0 ve stavebnictví dochází k intenzivnímu vývoji a implementaci pokročilých technologií umožňujících automatizaci a robotizaci tradičních stavebních procesů. Cílem této kapitoly je provést rešerši vybraných technologií, které se jeví jako nejvhodnější pro integraci do robotizovaných systémů realizujících stavební činnosti.

4.1 Robotické zdění

Robotické zdění představuje jednu z nejpokročilejších oblastí automatizace stavebních procesů, která výrazně mění tradiční přístupy k realizaci zděných konstrukcí. Tato technologie je založena na nasazení specializovaných stavebních robotů, vybavených pokročilými manipulačními rameny, přesnými polohovacími systémy a řídicími jednotkami, které umožňují autonomní pokládku stavebních prvků, jako jsou cihly, tvárnice nebo prefabrikované bloky.

4.1.1 Princip technologie

V rámci robotického zdění robot využívá digitální stavební podklady, ze kterých získává informace o přesném rozmístění jednotlivých stavebních prvků. V praxi existují dva základní přístupy k řízení robotických zděných operací:

V pokročilejších systémech, jako je například Hadrian X, je robot přímo napojen na Building Information Modeling (BIM). V tomto případě robot načítá kompletní digitální model stavby, ze kterého v reálném čase odvozuje trajektorii pohybu, polohu jednotlivých cihel nebo bloků a optimalizuje pracovní sekvenci pokládky. Tento způsob umožňuje vysokou míru autonomie, adaptace na případné změny projektu a minimální nutnost lidského zásahu.

Naopak u systémů, jako je WLTR, je proces řízení robotického zdění založen na digitálních plánech např. ve formátu DWG, které jsou potom převedeny do jeho vlastního formátu zadání. WLTR tedy nepracuje přímo s plně strukturovaným BIM modelem, ale využívá zjednodušené datové podklady obsahující zásadní informace o rozměrech, geometrii a rozmístění zdiva. Tento přístup je méně flexibilní při změnách projektové dokumentace, nicméně umožňuje efektivní automatizaci zděných operací při zachování vysoké kvality provedení.

Na základě těchto dat robot autonomně vykonává sérii pracovních operací:

- manipulaci se stavebním materiálem
- aplikaci potřebného množství pojiva (malty nebo lepidla)
- polohování a přesnou pokládku cihly či bloku do konstrukce

Proces je optimalizován tak, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti rozměrů, konstantní kvality spár a minimálních odchylek od projektového návrhu [\[39\]](#).



Obr. 58) Dva základní přístupy k řízení robotického zdění [64], [65], [66], [67], [68]

4.1.2 Výhody technologie

Implementace robotického zdění přináší řadu významných výhod, které se zásadním způsobem promítají do efektivity a kvality realizace stavebních prací. Především dochází ke zvýšení produktivity, a to díky schopnosti robotických systémů pracovat v režimu nepřetržitého provozu s konstantním výkonem bez vlivu únavy, jak je běžné u lidské pracovní síly. Zároveň je zajištěna konzistentní kvalita pokládky, kdy jsou jednotlivé cihly nebo bloky ukládány s definovanou přesností a konstantním přítlakem, což minimalizuje technologické odchylky v prováděném zdivu. Významným přínosem je rovněž snížení fyzických nároků na pracovníky na staveništi, což přispívá ke zvýšení bezpečnosti práce a redukci rizik spojených s manuální manipulací se stavebním materiálem. Automatizovaný proces umožňuje také optimalizované dávkování pojiv, čímž dochází ke snížení materiálových ztrát a efektivnějšímu využití vstupních surovin. V neposlední řadě lze konstatovat, že nasazení robotického systému pro zdění vede ke zkrácení celkové doby výstavby, a to zejména u projektů s pravidelně se opakující strukturou konstrukce, kde lze plně využít výhod standardizace pracovního postupu [32], [39].

4.1.3 Typické oblasti použití

Technologie robotického zdění je nejvhodnější pro projekty s pravidelnými a opakujícími se konstrukčními vzory, například:

- bytové domy
- administrativní budovy
- průmyslové haly
- sklady a logistická centra

V těchto případech lze plně využít výhod standardizace pracovního postupu, která je základem efektivního nasazení robotických systémů [32], [39].

4.1.4 Omezení technologie

Přestože robotické zdění představuje významný pokrok v oblasti automatizace stavebních prací, jeho nasazení je spojeno s určitými technickými a provozními omezeními, která je nezbytné při plánování zohlednit. Mezi hlavní limity patří především omezená flexibilita systému při realizaci složitých architektonických detailů, které vyžadují individuální přístup a schopnost adaptace na nepravidelné tvary. V případě pokročilých robotických řešení, jako je Hadrian X,

je nutné disponovat vysoce přesným digitálním modelem stavby, jenž slouží jako výchozí datový podklad pro řízení pracovních operací. Dalším faktorem omezujícím širší implementaci těchto technologií jsou vysoké pořizovací náklady, zahrnující jak samotné zařízení, tak i jeho logistickou a servisní infrastrukturu. Pro zajištění bezproblémového provozu robotického systému je rovněž nutné vytvořit stabilní pracovní prostředí, které zahrnuje rovinný a únosný podklad a zároveň přesně specifikované stavební komponenty odpovídající parametrům robotického zařízení [32], [39].

4.1.5 Perspektivy dalšího vývoje

S dalším rozvojem robotických systémů pro zedění lze v budoucnu očekávat významné pokroky v několika oblastech. Jedním z hlavních směrů bude zvyšování adaptability robotů na realizaci složitějších konstrukčních tvarů, což umožní širší nasazení těchto technologií i u architektonicky náročnějších projektů. Další rozvoj lze předpokládat v oblasti integrace robotů do hybridních stavebních týmů, kde bude důraz kladen na efektivní spolupráci autonomních systémů a lidských pracovníků v rámci společného pracovního procesu. Významný potenciál rozšíření schopností robotických systémů lze spatřovat také v rozvoji komplexnějších funkcí, jako je například automatizovaná instalace výztuží nebo technických rozvodů přímo v průběhu zdicích prací. Robotické zedění tak představuje stěžejní pilíř transformace stavebnictví směrem k plně digitalizovaným a automatizovaným procesům v souladu s principy koncepce Průmyslu 4.0 [32], [39].

4.2 3D tisk stavebních konstrukcí

Technologie 3D tisku představuje významnou transformaci stavebního sektoru, umožňující digitalizaci, automatizaci a zefektivnění tradičních stavebních procesů. Z hlediska zásad Průmyslu 4.0 jde o průlomovou technologii, která spojuje digitální návrh (CAD/BIM), robotizaci a pokročilé materiály s cílem dosáhnout vyšší produktivity, flexibility a udržitelnosti výstavby.

4.2.1 Princip technologie

3D tisk (aditivní výroba) stavebních konstrukcí je proces, při němž jsou stavební materiály vrstveně nanášeny ve formě pásů nebo segmentů, dle digitálního modelu, bez nutnosti klasického bednění. Materiál je vytlačován přes trysku a ukládán do definované trajektorie s vysokou přesností. Zde jsou příklady využívaných materiálů:

a) Betonové směsi

-nejčastější materiál využívaný ve stavebním 3D tisku

-obvykle se jedná o speciálně modifikované cementové směsi s rychlým tuhnutím, příměsemi a chemickými přísadami pro zajištění tekutosti a následné tuhosti vrstvy [44]

b) Stavební malta

-vhodná zejména pro menší objekty a interiérové prvky

-výhodou je snadná manipulace a nižší požadavky na výkon zařízení, či jemnost struktury [44]

c) Polymerbetony a geopolymerní materiály

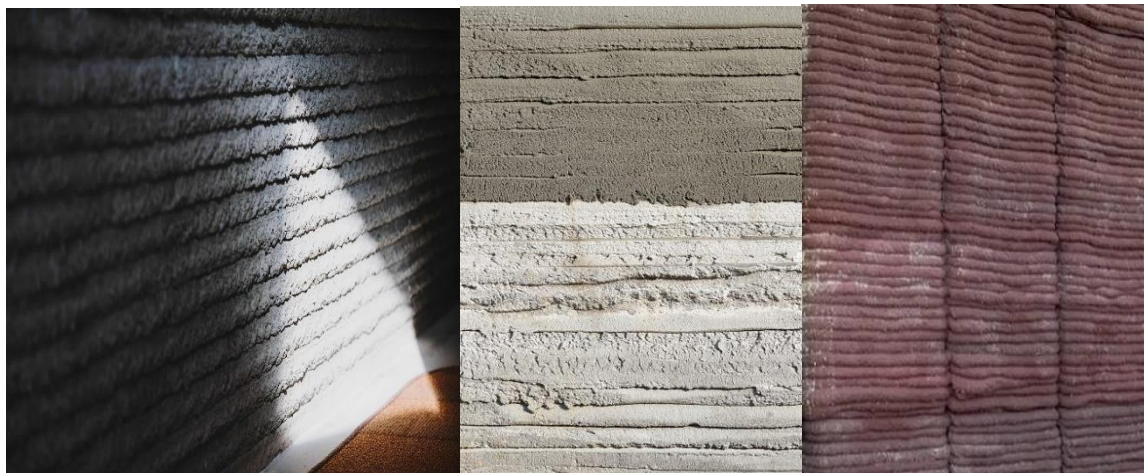
-prozatím pouze ve fázi výzkumných aplikací

-polymerbeton je kompozitní materiál využívající organickou polymerní pryskyřici namísto cementu jako pojiva

-geopolymer je anorganický polymer vznikající reakcí práškového aluminosilikátového materiálu (např. popílek, metakaolin) s alkalickým aktivačním roztokem (např. hydroxid sodný + vodní sklo)

-umožňují tisk konstrukcí s vyšší odolností proti korozi, chemikáliím a teplotám

-zároveň mají nižší ekologickou stopu než klasický beton [7], [1].



Obr. 59) Na obrázku vlevo se nachází ukázka betonové směsi, uprostřed maltové směsi a úplně vpravo pak geopolymerní materiál [44], [69]

4.2.2 Způsoby nanášení materiálu

Materiál je zpravidla přepravován pomocí čerpadla ze zásobníku do trysky tiskového zařízení. Pohyb trysky v prostoru zajišťuje pohybový systém, kterým může být portálová konstrukce nebo robotické rameno. Celý proces je řízen digitálním modelem, typicky ve formátu G-code. Stěžejním parametrem procesu je viskozita tiskové směsi, která musí být dostatečná pro její plynulé vytlačování, avšak zároveň musí zajistit stabilitu a soudržnost již nanesených vrstev. [41].



Obr. 60) Tisková hlavy 3D tiskárny BOD2 společnosti COBOD [70]

4.2.3 Rozšíření a význam jednotlivých technologií

V oblasti 3D tisku stavebních konstrukcí je v současnosti využíváno několik hlavních technologických přístupů, které se od sebe odlišují typem použitých materiálů, způsobem nanášení a charakterem výsledných aplikací. Míra jejich rozšíření na globálním trhu je nerovnoměrná a je ovlivněna úrovní technologického rozvoje, ekonomickými podmínkami a specifickými nároky kladenými na konstrukční řešení.

Na základě dostupných odborných studií a průmyslových analýz lze konstatovat, že v oblasti 3D tisku stavebních konstrukcí dominuje technologie extruze cementových směsí, která konstrukčně vychází z principu Contour Crafting (CC). Tento technologický přístup je uplatňován předními světovými výrobci stavebních 3D tiskáren, mezi něž patří společnosti COBOD, ICON a APIS COR [71], [72].

Tab 3) Rozšíření a použití jednotlivých technologií 3D tisku ve stavebnictví (Autor: Karel Procházka), [71], [72]

Technologie	Odhadované globální využití [%]	Poznámka
Contour Crafting (CC)	cca 60 %	Dominantní technologie pro tisk budov
Concrete Printing (CP)	cca 15 %	Prefabrikace složitějších prvků
Shotcrete 3D Printing (SC3DP)	cca 10 %	Tisk zakřivených a volných forem bez bednění
Reinforced 3D Printing	cca 5 %	Vývojová technologie s integrovanou výztuží
Binder Jetting	cca 4 %	Tisk forem a drobných prvků, nikoliv celých staveb
Mud/Clay Printing	cca 3 %	Udržitelná výstavba v rozvojových oblastech
Foam 3D Printing	cca 2 %	Izolační vrstvy a nenosné konstrukce
Geopolymer Extrusion	cca 1 %	Experimentální ekologická řešení.

Z dostupných údajů vyplývá, že více než tři čtvrtiny realizovaných stavebních projektů využívajících technologii 3D tisku spoléhají na extruzi cementových směsí v různých technologických variantách. Tento stav je plně v souladu s požadavky kladenými na mechanickou robustnost konstrukcí, efektivitu výstavby a návaznost na konvenční stavební technologie.

Na opačném konci spektra se nachází geopolymerní extruze, která se v současné době uplatňuje zejména v experimentálních a výzkumně orientovaných projektech zaměřených na snižování environmentálních dopadů stavebního průmyslu.

Z hlediska dlouhodobého vývoje však lze předpokládat postupné rozšiřování inovativních přístupů, a to především těch, které kombinují využití ekologicky příznivých materiálů, integraci výztužných prvků a vysoký stupeň automatizace v souladu s principy Průmyslu 4.0 [71].

Níže jsou stručně popsány tři nejrozšířenější technologie 3D tisku ve stavebnictví:

a) Contour Crafting (CC)

Technologie Contour Crafting představuje jednu z nejstarších a zároveň nejrozšířenějších metod 3D tisku ve stavebnictví. Směs (typicky cementová pasta) je extrudována ve formě obrysů, které definují tvar konstrukce. Následně je vnitřek vyplněn dalším materiálem. Výhodou je vysoká rychlost výstavby a hladký povrch konstrukce bez nutnosti následných úprav [3].

b) Concrete Printing (CP)

Tato metoda využívá jemnozrnný beton pro přesné vrstvení materiálu podle digitálního modelu. Oproti technologii CC se tato metoda zaměřuje více na strukturální vlastnosti a umožňuje tisk složitějších, zakřivených tvarů. Metoda je vhodná především pro výrobu prefabrikovaných prvků s vysokými nároky na přesnost [73].

c) Shotcrete 3D Printing (SC3DP)

Shotcrete 3D Printing je technologie založená na stříkání betonové směsi pod tlakem, bez nutnosti bednění. Vrstevnice jsou nanášeny roboticky, což umožňuje realizaci zakřivených a volně tvarovaných struktur. Vzhledem k rychlému tuhnutí je tato metoda vhodná i pro výstavbu nosných konstrukcí v náročnějších podmínkách [1].

4.2.4 Přínosy, výzvy a možné směry dalšího rozvoje

Přínosy:

- výrazné snížení materiálového odpadu
- rychlost výstavby
- nižší nároky na pracovní sílu
- možnost produkce složitých tvarů bez bednění
- potenciál pro použití udržitelného a recyklovaného materiálu

Výzvy:

- nedostatečné normativní ukotvení
- omezená nosnost vytištěných konstrukcí (nutnost hybridních řešení s výztuží)
- klimatická závislost (vlhkost, teplota)
- vysoké vstupní náklady na technologii a materiály

Možné směry dalšího rozvoje:

- integrace senzoriky pro online monitoring kvality tisku
- vývoj samoopravných materiálů a chytrých betonů
- propojení s BIM modely a adaptivní řízení tisku v reálném čase

začlenění do plně automatizovaných stavebních procesů v duchu Průmyslu 4.0 [72]

4.3 Pokládka výztužných prutů

Automatizovaná manipulace s výztužnými pruty představuje z pohledu současných technologických možností jeden z procesů, který je mimořádně vhodný pro nasazení robotických systémů. Ruční pokládka výztuže je nejen vysoce fyzicky zatěžující, ale rovněž vykazuje zvýšenou chybovost a omezenou produktivitu, zejména u rozsáhlých a opakujících se

konstrukčních celků. Využití robotizovaných řešení v této oblasti umožňuje výrazně zvýšit efektivitu pracovních operací, zajistit přesné prostorové rozmístění armovacích prvků dle projektové dokumentace a současně zlepšit ergonomii a bezpečnost pracovního prostředí na staveništi [71].

4.3.1 Princip technologie

Základ technologie automatizované pokládky výztužných prvků tvoří robotický systém osazený portálovým uspořádáním, který je schopen přesného ukládání výztuže na základě digitální stavební dokumentace, zpravidla ve formátu informačního modelu budovy (BIM). Mezi nejznámější prakticky nasazované systémy patří IronBOT, vyvíjený společností Advanced Construction Robotics. Jedná se o autonomní zařízení schopné pohybu po připravené armovací ploše, přičemž provádí manipulaci s výztužnými pruty a jejich přesné rozmístění v souladu s geometrickými a rozměrovými parametry dané konstrukce. Tímto způsobem robot zcela nahrazuje konvenční ruční pokládku výztuže a přispívá k jejímu standardizovanému provedení [58].



Obr. 61) Uchopovací systém portálového PR IronBOT [60]

4.3.2 Výhody technologie

Automatizace pokládky výztužných prvků přináší řadu jednoznačných přínosů, které mají přímý dopad na efektivitu, bezpečnost i kvalitu realizace stavebních konstrukcí:

- Zvýšení produktivity – robotické zařízení je schopno pracovat v režimu kontinuálního provozu s vysokou opakovatelností a stabilní úrovní výstupní kvality, nezávisle na vnějších vlivech či únavě obsluhy

- Snížení fyzické zátěže pracovníků – automatizovaný proces eliminuje potřebu ruční manipulace s těžkými výztužnými prvky, čímž přispívá ke snížení rizika muskuloskeletálních onemocnění a pracovních úrazů
- Zvýšení přesnosti pokládky – výztuž je ukládána s vysokou geometrickou přesností dle digitální projektové dokumentace, což snižuje pravděpodobnost vzniku odchylek a technologických vad
- Zvýšení bezpečnosti práce – nasazením robotických systémů dochází k omezení přítomnosti pracovníků v nebezpečných zónách stavenišť, což přispívá ke zvýšení celkové úrovně bezpečnosti pracovního prostředí [58]

4.3.3 Oblasti využití

Technologie robotizované pokládky výztužných prutů nachází uplatnění především u rozsáhlých infrastrukturních staveb, kde se její výhody uplatňují v plném rozsahu jak z hlediska efektivity provádění, tak kvality výsledné konstrukce. Mezi typické oblasti aplikace této technologie patří:

- výstavba mostních konstrukcí a nosných pilířů
- realizace základových desek u výškových a průmyslových objektů
- výroba velkorozměrových železobetonových prefabrikovaných prvků
- podlahové systémy s vysokým požadavkem na armování

V kombinaci s navazující automatizační technologií vázání výztuže (systém TyBOT) je možné realizovat komplexní automatizovaný armovací proces, který významně zkracuje přípravné fáze výstavby železobetonových konstrukcí a současně přispívá ke standardizaci technologického postupu [58].

4.4 Vázání výztužných prutů

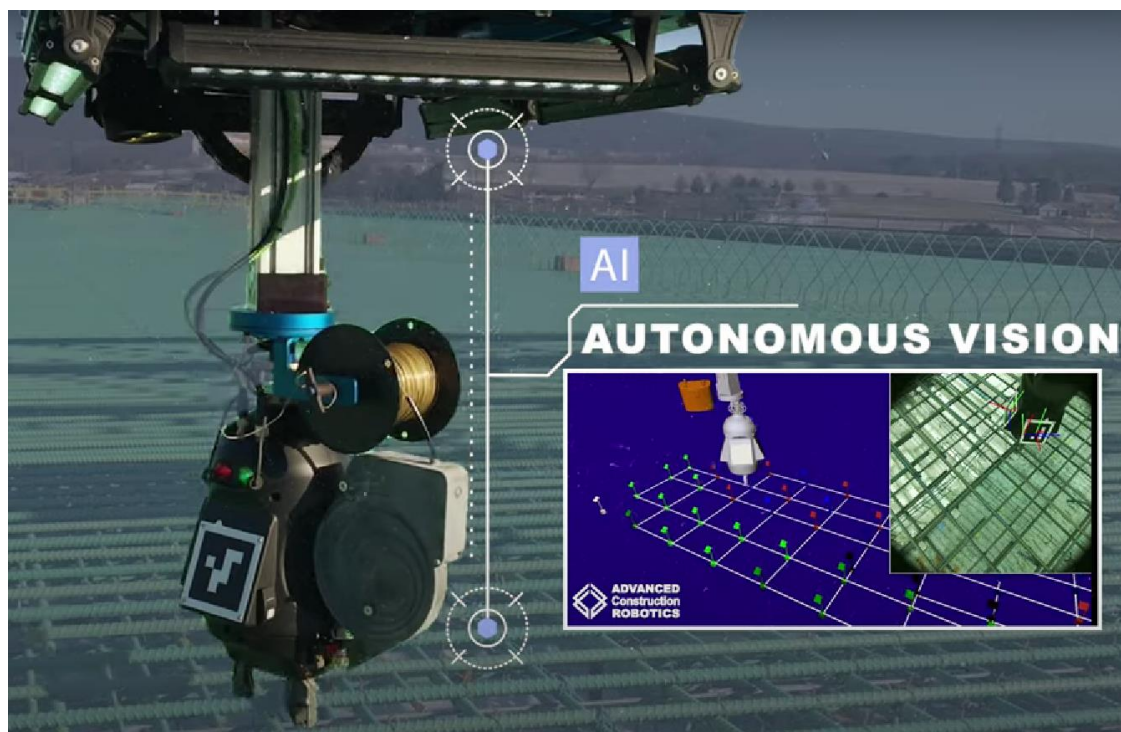
Vázání výztužných prutů tvoří nedílnou součást technologického postupu při realizaci železobetonových konstrukcí, kde slouží k zajištění prostorové tuhosti a stability armovací výztuže před následnou betonáží. Kvalita a správnost provedení této činnosti má zásadní vliv na celkovou přesnost, bezpečnost a technickou integritu výsledné konstrukce. S ohledem na její vysokou pracnost, repetitivní charakter a nároky na časovou efektivitu se vázání výztuže řadí mezi činnosti, které jsou z hlediska robotizace vysoce vhodné pro automatizaci [59].

4.4.1 Princip technologie

Technologie automatizovaného vázání výztužných prutů je založena na použití robotického systému, který prostřednictvím kamerového systému a integrovaných senzorů autonomně detekuje polohu jednotlivých křížení výztuže. V určených uzlových bodech následně provádí cílené a řízené omotání vázacího drátu s kontrolovaným utažením. Důležitým prvkem systému je schopnost zachovat konstantní délku a předpětí vázací smyčky, což má přímý vliv na statickou účinnost výztužné sítě a její proveditelnost v rámci betonáže.

Příkladem pokročilého komerčního řešení je robotický systém TyBOT, vyvíjený společností Advanced Construction Robotics (ACR). Jedná se o autonomní jednotku pracující na portálové konstrukci, vybavenou kamerovou navigací, manipulačním modulem a zásobníkem vázacího

drátu. Zařízení je schopno samostatného provozu přímo na staveništi, bez nutnosti ručního programování jednotlivých úkonů. Systém TyBOT lze efektivně provozovat v kombinaci s paralelně nasazeným robotem IronBOT, čímž vzniká integrovaný robotický celek pro pokládku a fixaci výztužných prvků ve fázi před betonáží [59].



Obr. 62) Autonomní vázací systém TyBOT využívající strojové vidění a AI pro detekci spojů výztuže [60]

4.4.2 Výhody technologie

Nasazení robotických systémů pro vázání výztužných prvků přináší řadu zásadních výhod, které se přímo promítají do zvýšení kvality, produktivity a bezpečnosti stavebního procesu:

- Zvýšení produktivity – automatizované zařízení je schopno realizovat několik tisíc spojů denně v režimu kontinuálního provozu, čímž dochází k výraznému zrychlení přípravné fáze před betonáží
- Eliminace fyzicky zatěžující práce – ruční vázání výztuže představuje jednu z nejvíce ergonomicky nevhodných činností na staveništi. Automatizace této operace významně snižuje míru fyzického zatížení pracovníků a eliminuje související rizika pracovních úrazů a únavy
- Zajištění standardizované kvality spojů – každý vázací spoj je proveden s konstantní délkou drátu a definovaným předpětím, což zvyšuje spolehlivost a strukturální integritu celé armovací sestavy
- Zvýšení úrovně bezpečnosti práce – snížení potřeby fyzické přítomnosti pracovníků v hustě armovaných oblastech stavby přispívá k omezení rizikových situací a zvyšuje celkovou bezpečnost pracovního prostředí [59]

4.4.3 Oblasti využití

Technologie automatizovaného vázání výztužných prutů nachází uplatnění především u konstrukčních celků s vysokou mírou armování a opakovatelností geometrického uspořádání. Typické oblasti využití zahrnují:

- mostní konstrukce, piloty a nájezdové rampy
- základové desky a rozsáhlé průmyslové podlahové systémy
- prefabrikované železobetonové dílce s požadavkem na přesné prostorové umístění výztuže
- armovací rohože pro modulární a sériově vyráběné stavební systémy

Díky své konstrukční variabilitě a vysoké provozní flexibilitě je robotický systém TyBOT schopen provozu jak v podmínkách prefabrikace v halových provozech, tak přímo na staveništi, včetně prostředí s proměnlivými klimatickými a provozními podmínkami [59].

4.5 Robotické vrtání

Vrtání otvorů do stavebních konstrukcí představuje opakovanou, technologicky náročnou a z hlediska přesnosti kritickou operaci, která je nedílnou součástí pro instalaci kotevních prvků, montáž prefabrikovaných dílců a přípravu prostupů pro technická zařízení a rozvody. Konvenčně prováděné ruční vrtání je spojeno s vysokou fyzickou zátěží pracovníků, zvýšeným rizikem pracovních úrazů a omezenou geometrickou přesností výsledných otvorů. V tomto kontextu se nasazení robotických systémů pro vrtací operace jeví jako efektivní nástroj ke zvýšení prostorové přesnosti, provozní bezpečnosti a celkové časové efektivity realizace stavebních konstrukcí [63].

4.5.1 Princip technologie

Robotické systémy určené pro vrtací operace kombinují mobilní podvozkovou platformu, lineární pohonné jednotky, automatizovanou vrtací hlavici a v neposlední řadě také systémy vizuální nebo laserové navigace. Řídicí jednotka využívá digitální projektová data, typicky ve formátu BIM modelu, pro přesnou lokalizaci vrtaných bodů a definici hloubky i sklonu otvoru. Moderní vrtací zařízení jsou navíc schopna adaptivně upravovat technologické parametry vrtání – otáčky, přítlak, rychlost posuvu – na základě rozpoznaných vlastností podkladového materiálu (beton, zdivo, kámen) a zpětné vazby získané z integrovaných senzorů zatížení, vibrací nebo akustického signálu [63].



Obr. 63) Vrt provedený PR JAIBOT a následné označení jeho pozice pomocí značkovací jednotky robotu [\[74\]](#)

4.5.2 Výhody technologie

Nasazení robotických systémů pro realizaci vrtacích operací přináší řadu významných výhod, které se uplatňují především ve fázi hrubé výstavby a při instalaci technických a kotevních systémů:

- Vysoká geometrická přesnost – robotizované vrtání zajišťuje přesné vedení osy otvoru i dodržení hloubky v souladu s návrhovými daty, čímž dochází k eliminaci odchylek od projektované geometrie
- Zvýšení produktivity – automatizované systémy umožňují kontinuální provoz bez nutnosti přerušení, včetně paralelního provádění více otvorů s vysokou opakovatelností
- Minimalizace fyzického zatížení a rizik – vyloučením nutnosti ručního vrtání dochází k eliminaci vystavení pracovníků vibracím, hluku, prachu a nadměrné fyzické námaze spojené s manipulací s těžkým náradím
- Zajištění konstantní kvality – vrtání probíhá za definovaných technologických podmínek s kontrolovaným přtlakem a otáčkami, což zajišťuje jednotnou kvalitu a opakovatelnost výsledného otvoru [\[63\]](#)

4.5.3 Oblasti využití

Robotické vrtací technologie nacházejí uplatnění v širokém spektru stavebních aplikací, přičemž jejich přínosy se nejvýrazněji projevují v následujících oblastech:

- vrtání kotevních otvorů v betonových i ocelových konstrukčních prvcích

- příprava prostupů pro technická zařízení a systémy technického zabezpečení budov (TZB)
 - vrtání otvorů pro injektážní práce (trhliny a dutiny ve zdivu) nebo vedení předpínacích kabelů (zvyšují únosnost, tuhost a životnost stavebních konstrukcí)
 - sanace a rekonstrukce železobetonových konstrukcí, kde je nutná přesná dodatečná perforace (odborné stavební zásahy vrtáním do již existujícího železobetonového prvku)
- [\[63\]](#)

Specifickým přínosem robotizace vrtacích operací je možnost efektivního nasazení v obtížně přístupných, rizikových či jinak omezených prostředích, jako jsou například tunelové profily, výškové stavby, jaderné objekty nebo průmyslové zóny s omezeným pohybem pracovníků. V těchto podmínkách umožňuje nasazení autonomního zařízení výrazné snížení vystavení lidských pracovníků vůči bezpečnostním a ergonomickým rizikům.

5 TRENDY V OBLASTI NOVÝCH, POKROKOVÝCH ZPŮSOBŮ V OBLASTI KONSTRUKCE A APLIKACE PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE STAVEBNICTVÍ

Rozvoj průmyslové robotiky ve stavebnictví je úzce provázán s aktuálním vývojem v oblasti digitálních technologií, pokročilé sensoriky, automatizovaných řídicích systémů a aplikace umělé inteligence. Ačkoli řada těchto technologií je již technicky dostupná a v omezené míře implementována do vybraných stavebních procesů, jejich plošné nasazení, standardizace a začlenění do každodenní praxe zatím nedosahují úrovně systematické průmyslové aplikace. Následující kapitola se proto zaměřuje na vybrané směry rozvoje, které vykazují nejvyšší potenciál pro další implementaci – jak ve smyslu postupného rozšíření současných řešení, tak ve formě nových, dosud nepoužívaných přístupů [\[71\]](#).

5.1 Rozšíření robotických aplikací v dokončovacích a specializovaných stavebních operacích

V současné době nachází stavební robotika své hlavní uplatnění především ve fázích hrubé výstavby – typicky v procesech, jako je 3D tisk konstrukcí, pokládka výztužných prvků, robotické zdění nebo vrtací operace. Naproti tomu většina navazujících činností, zejména dokončovací práce, zůstává i nadále závislá na ručním zpracování. Vývojový trend však jednoznačně směřuje k postupnému rozšíření PR také do těchto technologicky méně automatizovaných oblastí, jako jsou:

- montáž a instalace technických zařízení budov (TZB)
- nanášení interiérových povrchových úprav, stěrkování a malování
- aplikace tepelných, akustických a hydroizolačních vrstev
- zabudování výplňových stavebních otvorů (oken a dveří)
- čištění, kontrola a údržba fasád stavebních objektů

Přestože robotické nebo poloautomatizované systémy pro tyto činnosti již existují, nelze je v současné fázi vývoje považovat za plnohodnotné PR ve smyslu plné autonomie, adaptivního řízení a provozní integrace. Ve většině případů se jedná o speciálně navržené, částečně mechanizované systémy, jejichž praktické nasazení je omezeno na úzce definované úlohy a předem připravené pracovní prostředí. Míra adaptace těchto zařízení na reálné a proměnlivé podmínky staveniště zůstává prozatím nízká [\[71\]](#), [\[75\]](#).

5.2 BIM jako nástroj integrace

Metoda Building Information Modeling (BIM) představuje dnes běžně aplikovaný nástroj především v rámci rozsáhlejších a infrastrukturních nebo veřejně financovaných projektů. Mezi standardně využívané funkce patří:

- sledování aktuálního stavu výstavby pomocí prostorového skenování (např. metodou laserového či fotogrammetrického snímání)
- řízení časové osy výstavby na základě integrovaných harmonogramů
- prostorové rozvržení stavebních prvků v souladu s datovým modelem

Tyto aplikace jsou technicky zvládnuté a prakticky nasazované, avšak pouze ve formě podpůrných nástrojů řízených člověkem. Přímé napojení BIM modelu na autonomní řídicí logiku robotických systémů v reálném čase, které by umožnilo PR samostatně interpretovat digitální stavební výkres a vykonávat na jeho základě konkrétní operace, je stále ve fázi technologického vývoje [71], [75].

Podobně je tomu i v případě tzv. 4D (3D model + čas) a 5D (4D model + náklady) BIM, které sice umožňují vizualizaci stavebního postupu v čase, případně včetně nákladových aspektů, avšak ve své aktuální podobě slouží spíše pro projektový management než jako funkční digitální dvojče schopné přímo generovat technologické trajektorie, pracovní sekvence nebo adaptivní plánování činností pro robotické jednotky. Plně automatizované řízení robotických operací na základě BIM dat zůstává prozatím předmětem výzkumných a experimentálních aplikací [71].

5.3 Autonomní navigace, strojové vidění a vnímání prostředí

Pokročilé systémy strojového vidění, LIDAR skenování a lokalizační technologie dnes tvoří základní výbavu moderních mobilních robotických jednotek, autonomních transportních prostředků a bezpilotních leteckých platform. Umožňují robotickým systémům detekovat objekty, orientovat se v prostoru a do určité míry reagovat na aktuální uspořádání staveništního prostředí. Tyto technologie jsou komerčně dostupné a ve specifických aplikacích již prakticky nasazované [71], [75].

Přesto však plnohodnotná a robustní autonomní navigace v nestrukturovaném a dynamickém prostředí stavebního provozu, tj. za podmínek proměnlivého terénu, výskytu nepředvídatelných překážek a pohybu pracovníků či techniky, zůstává technologicky velmi náročným problémem. Většina současných průmyslových robotických zařízení je i nadále závislá na předem definovaném pracovním prostoru, který je upraven s ohledem na jejich provozní limity. Schopnost adaptivní lokalizace a trajektorie řízené v reálném čase podle okolního prostředí zatím běžnou výbavou stavebních robotů není [71].

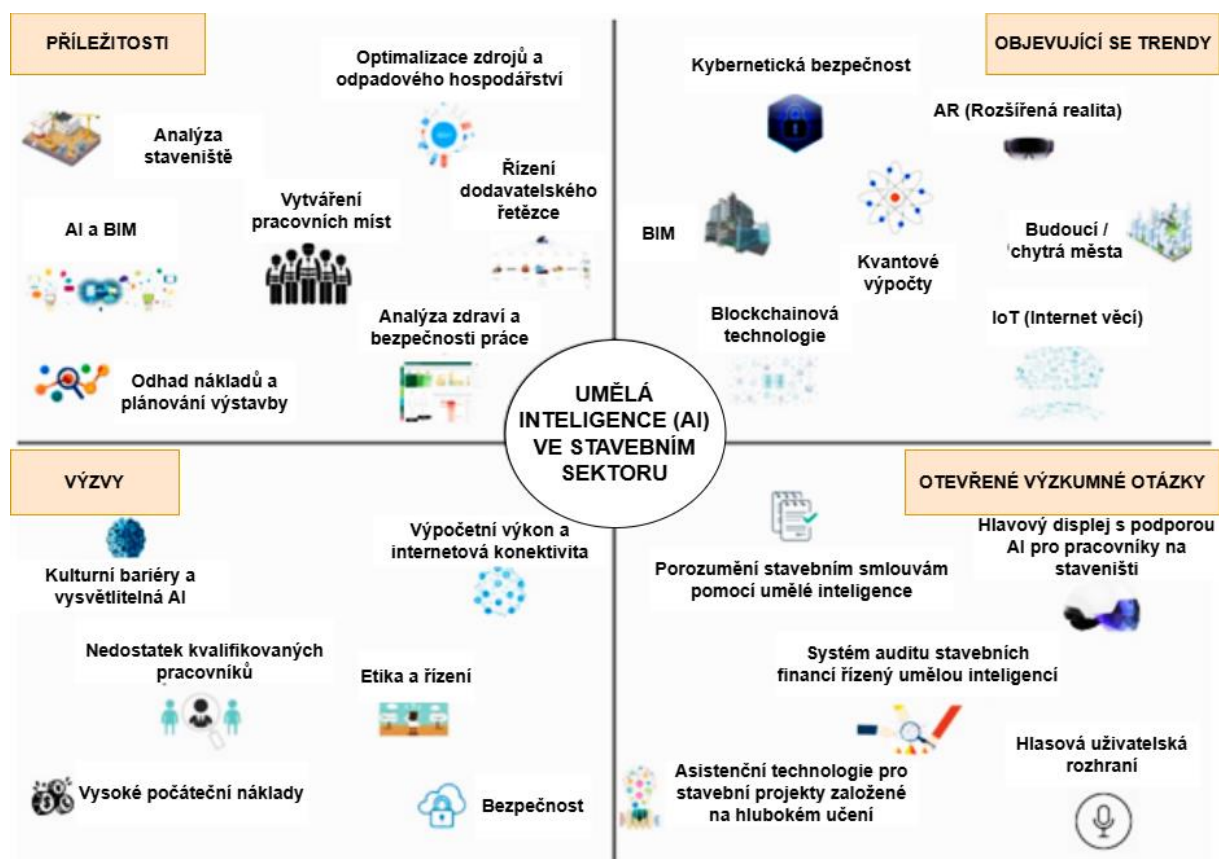
5.4 Umělá inteligence v adaptivním řízení a plánování

Aplikace algoritmů strojového učení a umělých neuronových sítí se v oblasti robotiky uplatňuje stále intenzivněji, zejména v oblastech strojového vidění a rozpoznávání objektů, detekce anomálií a adaptivního řízení. Ve stavebnictví je však přímá integrace systémů umělé inteligence (AI) do autonomního řízení PR zatím spíše výjimkou než standardní praxí [71], [75].

Existují sice experimentální implementace, které umožňují robotickým jednotkám například:

- rozpoznávat výskyt trhlin a povrchových defektů
- vyhodnocovat kvalitu zpracování materiálů
- optimalizovat trajektorii nástroje v závislosti na změnách okolního prostředí

Avšak jejich reálné nasazení ve stavební výrobě je prozatím velmi omezené. Tyto technologie se nacházejí převážně ve stádiu laboratorních testů nebo výzkumných projektů, přičemž úroveň jejich autonomie a schopnosti reálné adaptace na provozní podmínky staveniště je stále předmětem intenzivního vývoje. Vize robotických systémů s pokročilými funkcemi samoučení, kontextového rozhodování a procesní optimalizace v reálném čase s využitím provozních dat sice existuje, avšak její praktická implementace zůstává otázkou budoucnosti [71].



Obr. 64) Umělá inteligence (AI) ve stavebním sektoru [76]

5.5 Decentralizované a kolaborativní robotické systémy

Koncepty autonomně spolupracujících robotických systémů bez nutnosti centrálního řízení jsou aktuálně předmětem intenzivního výzkumu a experimentální validace. Tyto systémy jsou navrhovány tak, aby umožňovaly:

- provádění stavebních operací bez přímé lidské asistence
- dynamické rozdělování úloh mezi jednotlivé roboty v závislosti na aktuální situaci
- decentralizované koordinační chování na základě principů podobných rojové inteligenci nebo adaptivní kolaboraci bez pevně definovaného skriptu

Ačkoli teoretické přínosy tohoto přístupu jsou nesporné, praktická aplikace těchto systémů v reálném prostředí staveniště se zatím v běžné praxi neuplatňuje. Důvodem je především extrémní náročnost na senzorickou výbavu, výpočetní výkon a autonomní rozhodovací logiku, které jsou nutné pro bezpečné, efektivní a spolehlivé fungování více robotických jednotek v proměnlivém, nestrukturovaném a neustále se měnícím prostředí stavební výroby [71].

5.6 Shrnutí

Řada z aktuálně diskutovaných trendů v oblasti robotizace stavebních procesů má již dnes své technické ekvivalenty, přičemž některé z těchto technologií jsou částečně implementovány v praxi, jiné se nacházejí ve fázi experimentální validace či prototypového testování. Jejich širší průmyslové nasazení je však prozatím omezeno faktory jako jsou nedostatečná standardizace, vysoké náklady, nízká provozní odolnost a omezená adaptabilita k reálným podmínkám staveniště [71], [75].

Pozitivní výhled do budoucna však nabízí rychlý vývoj v oblastech datové infrastruktury, síťové konektivity, miniaturizace senzorických systémů a zvyšování výpočetního výkonu, což v kombinaci s rozvojem metod umělé inteligence a digitálních modelovacích nástrojů významně zvyšuje reálnou pravděpodobnost nástupu plně autonomních, datově řízených robotických systémů. Tyto technologie, integrované v rámci digitálního řetězce navrhování, řízení a realizace stavebních objektů, mají potenciál stát se zásadním prvkem transformace stavebnictví v konceptu Průmyslu 4.0 v horizontu několika následujících dekád [\[71\]](#), [\[2\]](#).

6 ZAČLENĚNÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ VE STAVEBNICTVÍ V RÁMCI ZÁSAD PRŮMYSLU 4.0

V posledních letech se integrace robotiky stala klíčovým prvkem transformace napříč průmyslovými odvětvími, včetně stavebnictví. Automatizace pomocí PR přináší zásadní zvýšení efektivity, preciznosti a bezpečnosti stavebních procesů. Tento trend je součástí širšího konceptu Průmyslu 4.0, který zahrnuje digitální propojení, decentralizované řízení a integraci kyber-fyzikálních systémů. Ve stavebnictví se tyto principy odrážejí v konceptu Stavebnictví 4.0, kde právě PR hrají nezpochybnitelnou roli při propojení fyzických stavebních procesů s digitálními technologiemi.

Na rozdíl od jiných průmyslových odvětví čelí stavebnictví specifickým výzvám, jako je dynamické a nepředvídatelné prostředí stavenišť, různorodost prováděných prací a potřeba vysoké adaptability robotických systémů. Využití PR ve stavebnictví se proto neomezuje pouze na automatizaci rutinních činností, ale zahrnuje i schopnost autonomního rozhodování a adaptace na měnící se podmínky [\[17\]](#).

6.1 Významné technologie průmyslových robotů v rámci Průmyslu 4.0

Moderní PR využívají pokročilé technologie, které umožňují jejich plnou autonomii a efektivní integraci do stavebních procesů [\[17\]](#).

6.1.1 Pokročilá senzorika a autonomní navigace

Senzorické systémy umožňují robotům vnímat své okolí a přizpůsobit svůj pohyb a operace podmínkám stavenišť. Díky pokročilým algoritmům dokážou roboty autonomně navigovat a vykonávat úkoly s vysokou přesností [\[17\]](#).

6.1.2 Umělá inteligence a adaptivní řízení

Moderní PR využívají strojové učení k optimalizaci svých pohybů a pracovních operací. AI jim umožňuje reagovat na změny v materiálových vlastnostech, vnější podmínky nebo odchylky v geometrii konstrukce [\[17\]](#).

6.1.3 Digitální dvojčata a simulace stavebních operací

Robotické systémy jsou propojeny s digitálními dvojčaty stavebních projektů, což umožňuje přesnou simulaci a optimalizaci procesů před jejich samotnou realizací. To vede k efektivnějšímu plánování a eliminaci chyb [\[17\]](#).

6.1.4 Automatizované manipulační a montážní systémy

PR jsou vybaveny sofistikovanými manipulátory, které umožňují precizní manipulaci s materiály a automatizovanou montáž stavebních prvků [\[17\]](#).

6.2 Výhody integrace průmyslových robotů do stavebnictví

PR přinášejí do stavebnictví řadu výhod, které výrazně zvyšují efektivitu a bezpečnost práce. Díky své schopnosti nepřetržitého provozu dosahují stabilně vysoké kvality výstupů, čímž zajišťují vysokou produktivitu. Současně jejich preciznost a opakovatelnost eliminují riziko chyb způsobených lidským faktorem a minimalizují materiálový odpad. Automatizace stavebních procesů navíc přináší významné úspory na pracovní síle a optimalizuje spotřebu surovin, což vede ke snížení provozních nákladů. V neposlední řadě přispívají PR roboty

k vyšší bezpečnosti na staveništi, jelikož mohou pracovat v nebezpečných podmínkách, kde by byl zásah člověka riskantní [17].

6.3 Výzvy a překážky při implementaci průmyslových robotů

Navzdory pokroku ve vývoji robotických systémů přetrvává několik zásadních výzev, které omezují jejich širší implementaci ve stavebnictví [1].

Tab 4) Prioritizace strategií pro podporu implementace automatizace ve Stavebnictví 4.0 na základě průměrného indexu relativní shody, kde vyšší hodnota vyjadřuje vyšší prioritu [77]

Strategie	Průměrný index relativní shody	Pořadí
Internet věcí (IoT)	4,475	1.
Aplikace fyzických a kybernetických řídicích systémů	4,465	2.
Zavedení BIM (Building Information Modeling)	4,45	3.
Cloud computing	4,415	4.
Využití 4D a 5D v návrhu a stavebnictví	4,375	5.
Aplikace umělé inteligence a infromatických systémů	4,265	6.
Zavedení aditivní výroby (3D tisk)	4,05	7.
Rozvoj virtuální reality a rozšíření znalostí	3,82	8.

Tab 5) Zásadní překážky a výzvy bránící efektivní implementaci automatizace ve Stavebnictví 4.0 na základě průměrného indexu relativní shody, kde vyšší hodnota vyjadřuje vyšší prioritu [77]

Problémy a výzvy	Průměrný index relativní shody	Pořadí
Psychologická připoutanost lidí ke starým způsobům práce	4,445	1.
Digitální propast	4,375	2.
Nedostatečné vzdělání	3,930	3.
Výzvy spojené s kybernetikou	3,825	4.
Neochota předávat dovednosti novým pracovníkům na projektech	3,655	5.
Vládní politika	3,655	5.
Hrozby hackerů a kybernetických podvodů	3,655	5.
Nestabilní dodávky elektrické energie	3,765	8.
Regionální a kontinentální politické a ekonomické překážky	3,475	9.
Odmítání stavebních odborníků učit se nové technologie	3,265	10.

Nepřipravenost stavebního průmyslu na digitalizaci	3,160	11.
Společenské a kulturní zvyklosti	3,155	12.
Omezení související s internetem věcí	2,865	13.

6.3.1 Vysoké pořizovací náklady

Jednou z hlavních bariér jsou vysoké pořizovací náklady, jelikož pořízení robotických systémů a jejich integrace do stavebních projektů představuje značnou finanční investici [4].

6.3.2 Integrace robotů do dynamického prostředí staveníšť

Dalším problémem je složitá integrace robotů do dynamického prostředí staveníšť, která se na rozdíl od průmyslové výroby vyznačují neustále se měnícími podmínkami. PR vyžadují precizní plánování a predikci pohybu, což je v nestabilním stavebním prostředí značně komplikované. K tomu se přidává i nedostatečná flexibilita současných robotických systémů, které jsou většinou navrženy pro stacionární úlohy, což omezuje jejich praktické využití v proměnlivých podmínkách stavby [17].

6.3.3 Požadavky na odbornost a kvalifikaci při implementaci robotických řešení

Stavební inženýři často nemají zkušenosti s robotikou, ani dostačující vzdělání, což komplikuje návrh a implementaci vlastních robotických řešení. Další výzvou jsou požadavky na odbornou údržbu a programování, neboť robotické systémy vyžadují pravidelnou údržbu a kvalifikovaný personál pro jejich efektivní řízení a optimalizaci [17], [77].

6.3.4 Psychologická bariéra a konzervativní přístup k technologickým inovacím

Jedním z hlavních faktorů zpomalujících implementaci robotických systémů ve stavebnictví je psychologická setrvačnost pracovníků, kteří jsou zvyklí na tradiční způsoby práce. Přirozený odpor k technologickým změnám vychází nejen z dlouhodobě osvojených postupů, ale i z obav o zachování pracovních míst. Automatizace stavebních procesů je tak vnímána jako potenciální ohrožení stávajícího pracovního trhu, což vede k negativnímu postoji vůči jejímu zavádění [77].

6.3.5 Regulační a legislativní překážky

Zavádění autonomních robotických systémů ve stavebnictví je v mnoha regionech limitováno neexistencí jasného legislativního rámce. Regulační normy často zaostávají za technologickým vývojem, což způsobuje právní nejistotu při využívání robotů na staveníštích. Nejednotná pravidla a absence standardizovaných bezpečnostních protokolů představují další bariéru, která zpomaluje širší implementaci robotiky v praxi [77].

6.3.6 Digitální propast a nerovnoměrná dostupnost technologií

Různorodá úroveň digitalizace napříč regiony EU, ale i ve světě vede k nerovnoměrnému rozvoji robotizace ve stavebnictví. Zatímco v některých zemích už je využívání digitálních systémů pevně zakořeněno, jinde je její zavádění do praxe teprve na začátku a převažují zde stále tradiční metody stavitelství. To brání širší adopci Průmyslu 4.0 ve stavebnictví a komplikuje vzájemnou spolupráci mezinárodních subjektů a stojí v cestě rozmachu globálního trhu s robotickými technologiemi [18].

6.3.7 Kybernetická rizika a zranitelnost digitálních systémů

S rostoucí mírou digitalizace stavebních procesů se objevuje také zvýšené riziko kybernetických útoků. Robotické systémy využívající internet věcí (IoT) a cloudové technologie jsou potenciálním terčem hackerů, kteří mohou manipulovat s jejich funkcemi nebo

neoprávněně získat citlivá data o stavebních projektech. Zajištění kybernetické bezpečnosti se tak stává klíčovým faktorem pro udržitelný rozvoj robotiky ve stavebnictví [8], [78].

6.3.8 Nestabilní dodávky elektrické energie jako limitující faktor automatizace

Automatizované stavební technologie, jež jsou v rámci zásad Průmyslu 4.0 a Stavebnictví 4.0 hojně využívány, vyžadují stabilní přísun elektrické energie. To může být problém v zemích či regionech s nestabilní energetickou infrastrukturou, kde může docházet k výpadkům, což narušuje plynulost stavebních prací a vede k neplánovaným prodlevám v rámci realizace projektu [77].

6.3.9 Regionální a globální politicko-ekonomické překážky

Politická a ekonomická situace v jednotlivých regionech ovlivňuje rychlost a rozsah implementace robotických technologií. Některé státy aktivně podporují digitalizaci a automatizaci stavebnictví prostřednictvím dotačních programů a legislativních reforem, zatímco jiné zůstávají vůči těmto změnám pasivní. Celní bariéry, byrokratická omezení a nejednotná regulační politika zpomalují globální rozvoj robotizace ve stavebnictví [7].

6.3.10 Omezení související s internetem věcí (IoT) ve stavebnictví

Internet věcí představuje stěžejní prvek Průmyslu 4.0, který umožňuje propojení různých stavebních strojů, senzorů a robotických systémů. Nicméně v některých regionech naráží využití těchto technologií na technická a legislativní omezení. Nedostatečná síťová infrastruktura, obavy o ochranu dat a absence standardizovaných komunikačních protokolů komplikují jejich širší implementaci ve stavebním sektoru [78].

7 VLASTNÍ POZNATKY A NOVINKY NA MEZINÁRODNÍM STROJÍRENSKÉM VELETRHU 2024

Tato kapitola je věnována osobním poznatkům a novinkám získaným během návštěvy Mezinárodního strojírenského veletrhu 2024 v Brně, jednoho z nejvýznamnějších průmyslových veletrhů ve středoevropském prostoru. Pozornost je zde zaměřena na nejnovější trendy a řešení v oblasti průmyslové automatizace, robotizace a digitalizace výrobních procesů.

Součástí kapitoly je stručná analýza vybraných exponátů a technologií prezentovaných předními světovými výrobci průmyslových a kolaborativních robotů, mezi které patří zejména společnosti FANUC, YASKAWA, ABB, KUKA, MITSUBISHI ELECTRIC a STÄUBLI. Popsány jsou zde konkrétní vystavované robotické systémy, jejich aplikační možnosti a inovace.

7.1 FANUC (Japonsko)



Obr. 65) Kolaborativní roboty CRX-5iA (Autor: Karel Procházka)



Obr. 66) Kolaborativní roboty CRX-10iA (Autor: Karel Procházka)

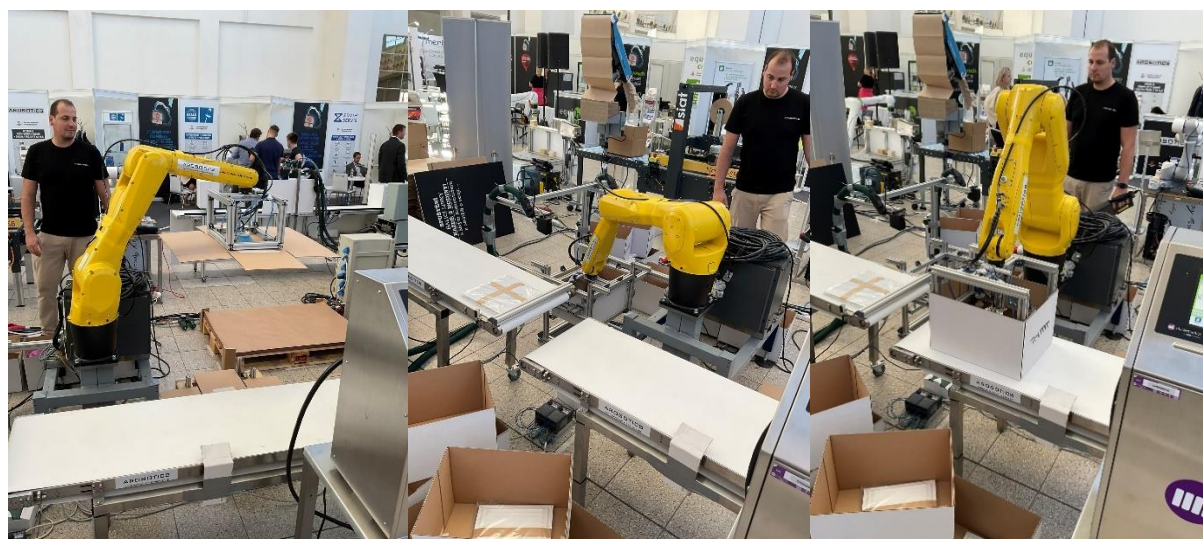


Obr. 67) Kolaborativní robot CRX-10iA vybaven bezpečnostní závorou (Autor: Karel Procházka)

Kolaborativní robot CRX-10iA je vybaven bezpečnostní závorou, která na základě senzorů sleduje přiblížení osoby. Při překročení předem definované vzdálenosti je do řídicí jednotky odeslán signál – v závislosti na zóně dojde buď ke zpomalení pohybu (při vstupu do oblasti označené oranžovou páskou), nebo k úplnému zastavení robotu (při překročení červené pásky).

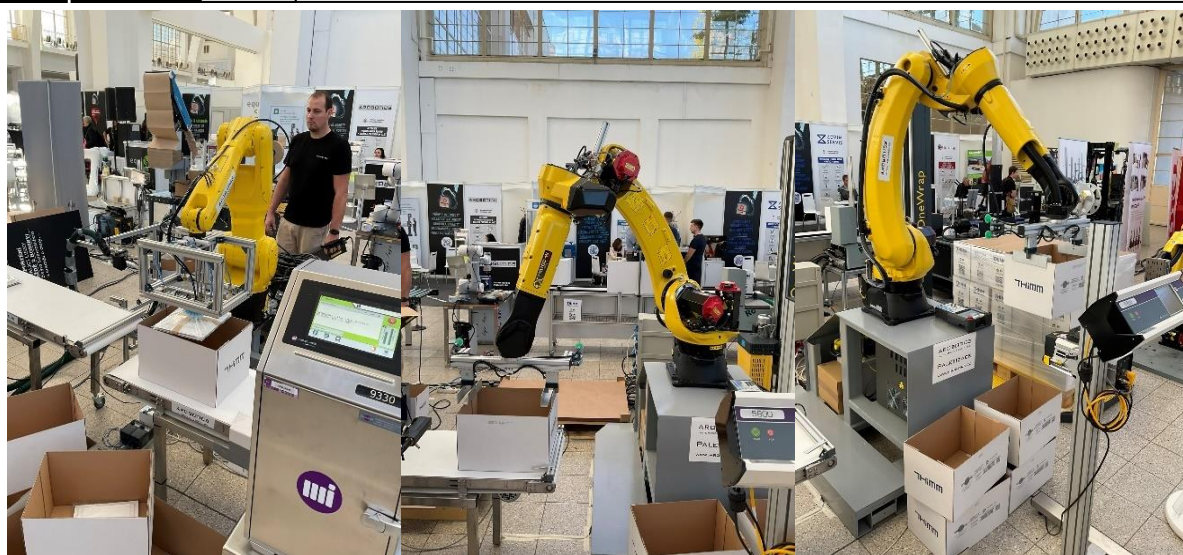


Obr. 68) Kolaborativní roboty CRX-10iA/L (Autor: Karel Procházka)



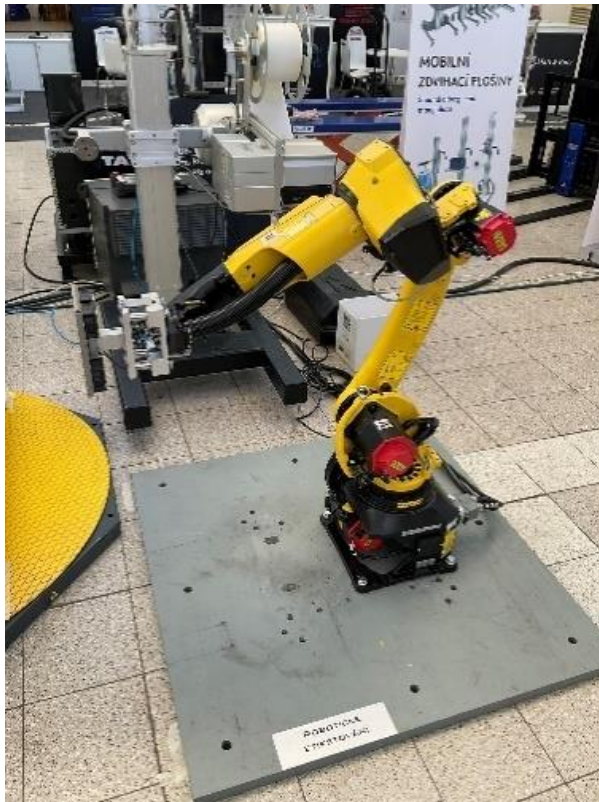
Obr. 69) Kloubový robot LR-10iA10 integrovaný do výrobní linky pro skládání a lepení papírových krabic, balení výrobků, paletizaci a aplikaci etiket (Autor: Karel Procházka)

Na fotografiích zleva doprava je zachycen proces, při kterém je papírová krabice nejprve uchopena koncovým efektolem kloubového robotu LR-10iA10, následně je vsazena do přípravku pro její vytvarování, poté jsou její hrany zalepeny pomocí efektoru s integrovaným lepidlem, a nakonec je krabice připravena k naplnění výrobkem.



Obr. 70) Kloubové roboty LR-10iA10 (vlevo) a M-20iD35 (uprostřed a vpravo) integrované do výrobní linky pro skládání a lepení papírových krabic, balení výrobků, paletizaci a aplikaci etiket (Autor: Karel Procházka)

Při pohledu na fotografie zleva doprava je patrné plnění papírové krabice kloubovým robotem LR-10iA10 výrobkem, dále pak uchopení krabice i s výrobkem pomocí kloubového robotu M-20iD/35 a následné přemístění předmětu směrem k tiskárně, posledním krokem je paletizace, kdy krabice je umístěna na paletu, zabalena fólií, je natisknuta etiketa a paleta je připravena k transportu.



Obr. 71) Robotická etiketace kloubovým robotem LR-10iA10 (Autor: Karel Procházka)



Obr. 72) Kloubové roboty LR-10iA10 (Autor: Karel Procházka)

Kloubové roboty typu LR-10iA10. Na fotografii vpravo lze vidět tento typ robotu integrovaný s lineárním pojezdem značky HIWIN. Pohyb pojezdu je realizován pomocí hřebenového převodu s přímým ozubením a pastorkem servopohonu. Celé robotické pracoviště je zabezpečeno bezpečnostní klecí zamezující vstupu obsluhy do pracovního prostoru během provozu.



Obr. 73) Převod pomocí hřebene s přímým ozubením a ozubeného kola (pastorku) firmy APEX DYNAMICS, INC., využívané pro pojezdy firmy HIWIN [\[79\]](#)



Obr. 74) Kloubový robot M20iA v kombinaci se skenerem ATOS 5 snímající plechový výrobek (Autor: Karel Procházka)



Obr. 75) PR typu M-20iD/25 (Food grade) integrovaný firmou MAZAK a určený pro manipulaci s obrobky nebo polotovary (Autor: Karel Procházka)

Společnost MAZAK se nezaobírá přímo výrobou ani vývojem robotických systémů, ale primárně výrobou CNC obráběcích strojů, do kterých běžně implementuje roboty firem jako jsou FANUC nebo YASKAWA [80], [81].

Na základě analýzy tohoto robotického systému určeného pro manipulaci s polotovary nebo obrobky jsem dle podobnosti konstrukce s modely M10iD/12 (Food grade), M-20iD/25 (Food grade) či CR35iB firmy FANUC usoudil, že by se mohlo jednat o právě jeden z těchto modelů. Po následném detailním pozorování konstrukce všech zmíněných typů robotů jsem došel k závěru, že se jedná právě o model M-20iD/25 (Food grade).



Obr. 76) CNC obráběcí centrum osazené PR z řady M-20 určeným pro manipulaci s obrobky nebo polotovary (Autor: Karel Procházka)

Společnost HALTER se specializuje na vývoj a výrobu automatizačních systémů pro obsluhu CNC strojů, známých jako HALTER LoadAssistant. Tento systém pro manipulaci s materiálem integruje robotické rameno od společnosti FANUC [82].

7.2 YASKAWA (Japonsko)



Obr. 77) Vlevo šestiosý vertikální kloubový robot MotoMINI, vpravo kolaborativní robot HC20DTP (Autor: Karel Procházka)

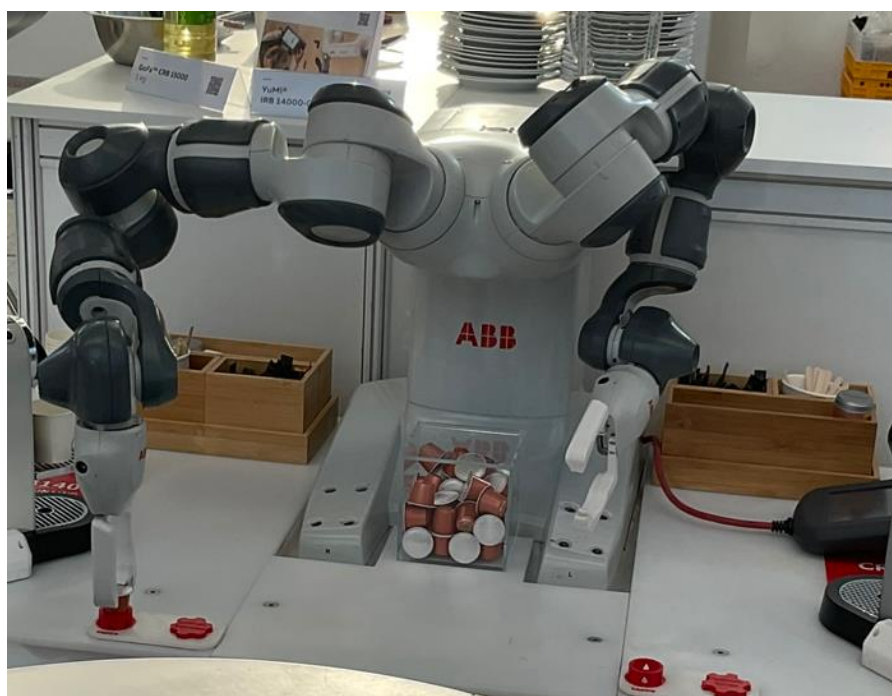
7.3 ABB (Švýcarsko/Švédsko)



Obr. 78) Kolaborativní roboty CRB 1300 SWIFTI (Autor: Karel Procházka)

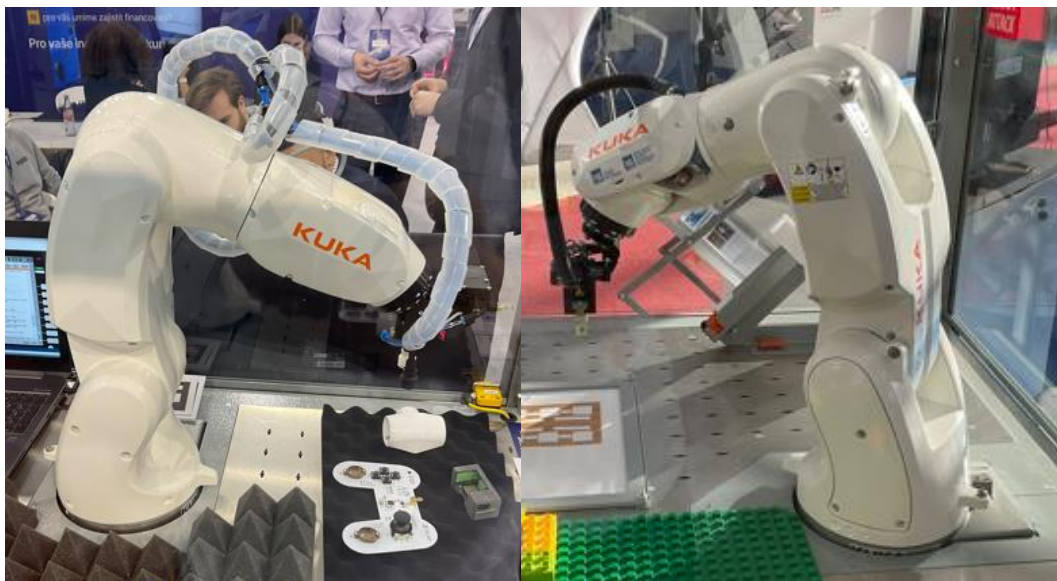


Obr. 79) Na prvních dvou obrázcích zleva se nachází kolaborativní robot CRB15000 GoFa sloužící pro postřik střešních tašek, na obrázku vpravo ten samý robot upravený pro smažení palačinek (Autor: Karel Procházka)



Obr. 80) Kolaborativní robot YuMi (IRB 14000) obsluhující kávovary (Autor: Karel Procházka)

7.4 KUKA (Německo)



Obr. 81) PR typu KR 4 R600 (Autor: Karel Procházka)



Obr. 82) Robot typu SCARA KR 6 R500 Z200 včetně pendantu pro ovládání robotu (Autor: Karel Procházka)



Obr. 83) Vlevo lze vidět PR typu KR 6 R700 AGILUS implementovaný do robotického pracoviště pro řezání laserem, vlevo se nachází robot KR QUANTEC (Autor: Karel Procházka)



Obr. 84) Na prvních dvou snímcích zleva jsou zobrazeny kolaborativní roboty LBR iiwa 3 R760 s dvoučelistovým pákovým chapadlem a podtlakovým efektozem pro manipulaci s drobnými předměty. Vpravo je vidět verze LBR iiwa 8 R930 určená k uchopení plastových kelímků, jejich naplnění pivem a předání uživateli (Autor: Karel Procházka)

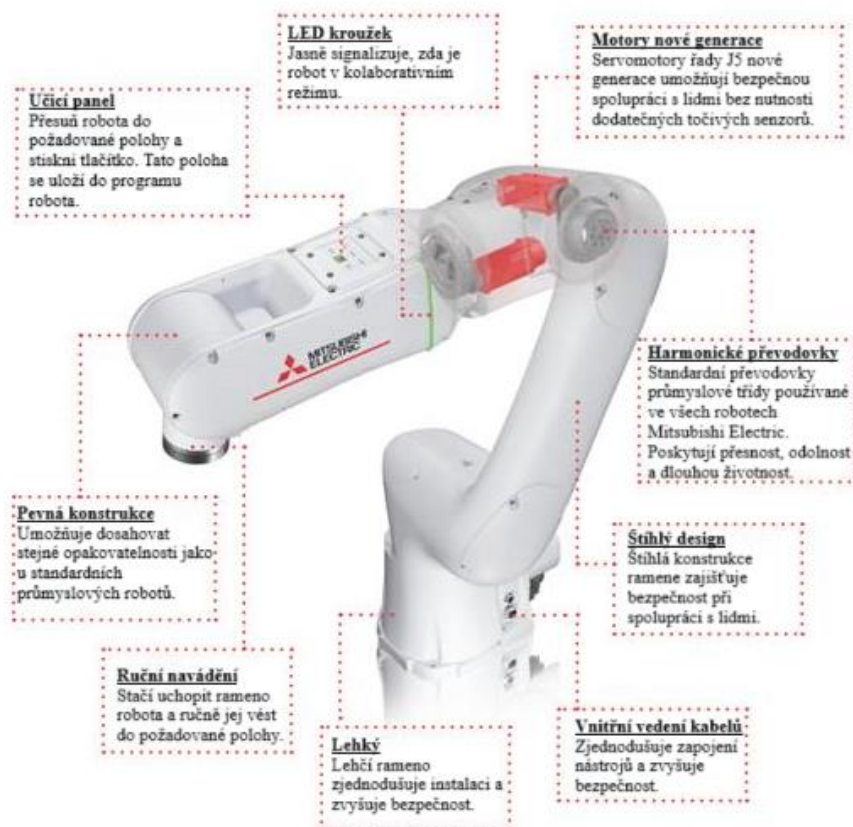


Obr. 85) Modulární robotická buňka kolaborativních robotů LBR iiwa 7 R800 na pracovišti (Autor: Karel Procházka)

7.5 MITSUBISHI (Japonsko)



Obr. 86) Kolaborativní robot MELFA ASSISTA je nejnovějším robotem společnosti Mitsubishi Electric's (Autor: Karel Procházka)



Obr. 87) Konstrukční a funkční prvky kolaborativního robota MELFA Assista od společnosti Mitsubishi Electric [83]

7.6 STÄUBLI (Švýcarsko)



Obr. 88) PR typu TX2-60, vlevo manipulace s pouzdry hodinek tříčelistovým koncovým efektem, uprostřed je využit podtlakový koncový efektor a vpravo robot optimalizovaný pro 3D tisk (Autor: Karel Procházka)



Obr. 89) PR typu TX2-90, vlevo robotické pracoviště pro výrobu kovových vizitek, vpravo robot na lineárním pojezdu firmy Unimotion využívajícím hřebenového převodu a pastorku (Autor: Karel Procházka)



Obr. 90) Výsledná kovová vizitka vypálená laserem pomocí PR typu TX2-90 na robotickém pracovišti viz. výše (Autor: Karel Procházka)



Obr. 91) PR typu TX2-40 umístěn na lineární ose HT-S firmy HIWIN poháněné kuličkovým šroubem, před robotem je dále umístěna lineární osa KK typ F (Autor: Karel Procházka)

7.7 COMAU (Itálie)



Obr. 92) Na všech třech fotografiích je zachycen PR typu SMART ARC, určený pro obloukové svařování metodou MIG/MAG a součástí jeho výbavy je svařovací hořák, podavač drátu a připojení ke svařovacímu zdroji (Autor: Karel Procházka)



Obr. 93) Na fotografii vlevo je zachycen kolaborativní robot z řady S-Family určený pro nasazení v automatizačních procesech, zejména v oblastech manipulace, svařování či montáže, vpravo lze pak pozorovat kolaborativní robot typu Racer5 COBOT, vybaven pneumatickým dvoučelistovým paralelním chápadlem pro standardní manipulace s menšími díly (Autor: Karel Procházka)

7.8 PANASONIC (Japonsko)



Obr. 94) Vlevo na fotografii se nachází univerzální robotický systém typu E-rám (automatizované svařovací pracoviště) s robotem TM 1400 WG3-350A integrovaný firmou Valk Welding, vpravo totožný robot samostatně (Autor: Karel Procházka)

Na obrázku je zachyceno robotické pracoviště, jehož hlavní součástí je kloubové robotické rameno osazené obloukovým svařovacím hořákem využívajícím technologii MIG/MAG. Rameno je instalováno na lineární ose, která umožňuje jeho podélný pohyb v celé délce svařovacího přípravku – tzv. sedmá osa. Nedílnou součástí systému je také polohovadlo sloužící k natáčení obrobku do ideální pracovní polohy, čímž je zajištěna vysoká kvalita svaru i na komplikovaných tvarech. Celé řešení je dodáno a integrováno společností Valk Welding, která se dlouhodobě specializuje na automatizaci svařovacích procesů pomocí robotických systémů Panasonic.

7.9 DOOSAN ROBOTICS (Jižní Korea)



Obr. 95) Vlevo na fotografii se nachází kolaborativní robot řady M-Series v mobilním pracovišti ROBOTICALL pro manipulaci s 3D tištěnými díly, dále vpravo lze vidět robotické pracoviště pro automatizovanou obsluhu CNC stroje, obsluhované kolaborativním robotem řady M-Series, vybaveným dvourstým elektrickým chapadlem OnRobot, kdy toto řešení je realizováno firmou ELTEP ve spolupráci se společnostmi ITAX a HURCO, a představuje pokročilou integraci robotizace ve strojírenské výrobě v souladu s principy Průmyslu 4.0 (Autor: Karel Procházka)

7.10 DOBOT (Čína)



Obr. 96) Úplně vlevo lze pozorovat automatizované pracoviště s kolaborativním robotem CR5 pro manipulaci a aplikaci etiket v rámci balicí linky, dále pak uprostřed obrázku lze vidět kolaborativní robot CR7 s univerzální montážní přírubou pro koncový efektor na konci ramene robotu, a posledně na obrázku vpravo se nachází kolaborativní robot CR10 při demonstraci broušení dřevěného torza těla (Autor: Karel Procházka)



Obr. 97) Na fotografii vlevo je zachycen šestiosý kolaborativní robot typu Magician E6, určený pro výukové a lehké průmyslové aplikace, při manipulaci s barevně rozlišenými objekty pomocí dvoučelistového pneumatického koncového efektoru, vlevo se nachází kolaborativní robot Nova 2 určený k obsluze kávovaru v rámci ukázky zákaznické automatizace (Autor: Karel Procházka)

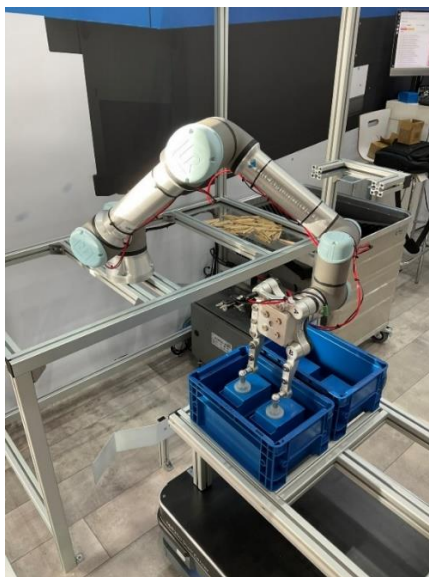
7.11 CLOOS (Německo)



Obr. 98) Svařovací robot QIROX od společnosti CLOOS integrovaný do portálového systému (Autor: Karel Procházka)

Robotický systém QIROX představuje vysoce modulární a technologicky vyspělé řešení určené pro plně automatizované svařovací a řezací aplikace. Díky své stavebnicové konstrukci umožňuje tento systém přesné přizpůsobení konkrétním výrobním podmínkám a požadavkům. Systém integruje jak robotickou techniku, tak i senzorické vybavení, pokročilé polohovací jednotky, bezpečnostní prvky a odpovídající rozhraní pro procesní technologie. Vysoká dynamika, přesnost a opakovatelnost pohybů, možnost využití sedmé lineární osy a dostupnost variant pro podlahovou i závěsnou montáž umožňují efektivní nasazení ve flexibilních výrobních prostředích. Řešení QIROX tak plně odpovídá současným požadavkům průmyslové automatizace v duchu zásad Průmyslu 4.0 [\[84\]](#).

7.12 UNIVERSAL ROBOTS (Dánsko)



Obr. 99) Kolaborativní robot integrovaný společností DREAMLANDROBOTICS, vybavený přísavkovým koncovým efektozem pro přesnou manipulaci s malorozměrovými objekty (Autor: Karel Procházka)



Obr. 100) Vlevo nahoře na obrázku vidíme robotické pracoviště několika kolaborativních robotů UR integrovaných firmou EXACTEC, vpravo nahoře se nachází typ UR20 a oba roboty v dolní části jsou typu UR10e (Autor: Karel Procházka)

7.13 CROBOTP (Čína)



Obr. 101) Vlevo lze pozorovat kolaborativní svařovací robot CRP-RC09-05 pro přesné obloukové svařování, vpravo pak svařovací robot CRP-RH14-10-W s rotačním polohovadlem pro přesnou víceosou manipulaci (Autor: Karel Procházka)

7.14 FRUITCORE ROBOTICS (Německo)



Obr. 102) PR typu HORST600 pro automatizovanou manipulaci s malorozměrovými dílci (Autor: Karel Procházka)

7.15 IGM (Rakousko)



Obr. 103) Svařovací robot IGM RTE 400 s polohovadlem obrobku v automatizované buňce pro obloukové svařování (Autor: Karel Procházka)

Roboty řady IGM RTE 400 představují vysoce pokročilé víceosé robotické systémy konstruované pro automatizaci obloukového svařování v prostředích se střední až vysokou technologickou náročností. Díky modulární konstrukci, umožňující konfiguraci se 6, 7 nebo 8 rotačními osami, kompaktní geometrii ramen a dutým hřídelím pro vedení veškerých médií je dosaženo vysoké míry flexibility, přesnosti a provozní spolehlivosti. Významné výhody těchto systémů spočívají ve vysoké dynamice pohybových jednotek, využití bezúdržbových převodovek typu Cyclo, a dále ve schopnosti integrace kamerových a senzorických prvků. V neposlední řadě lze roboty tohoto typu nasadit nejen pro svařování, ale rovněž pro další technologické operace, jako je řezání, manipulace, předehřev nebo srážení hran [\[85\]](#).

7.16 SCHNEIDER ELECTRIC (Francie)



Obr. 104) Robotické pracoviště ROBOLINE osazené kolaborativním robotem Lexium Cobot (Autor: Karel Procházka)

7.17 IGUS (Německo)



Obr. 105) Kolaborativní robot ReBeL určený pro lehké manipulační úlohy a montážní operace (Autor: Karel Procházka)

7.18 AUBO (Čína)



Obr. 106) Kolaborativní robot řady AUBO-i v kombinaci s 3D optickým skenerem ATOS Q (Autor: Karel Procházka)

7.19 SOFTBANKROBOTICS (Japonsko)



Obr. 107) Humanoidní sociální robot společnosti SOFTBANKROBOTICS, na fotografii využit pro výstavní účely firmy EXACTEC (Autor: Karel Procházka)

Tento humanoid je navržen pro přímou interakci s lidmi, pomocí AI je schopný rozpoznat hlas, obličej i emoce. Dále je vybaven dotykovým tabletem pro vizuální interakci, mobilní základnou umožňující autonomní pohyb či kamerami, mikrofony a různými senzory. Nachází široké uplatnění v oblastech jako je např. zákaznický servis, informační střediska, edukace nebo prezentace na veletrzích [\[86\]](#).

7.20 RENISHAW (Velká Británie)



Obr. 108) Vlevo na obrázku se nachází delta robot EQUATOR 500 s měřicí sondou, vpravo ten samý robot v kooperaci s kolaborativním robotem CRX-5iA firmy FANUC pro manipulaci s měřenou součástí (Autor: Karel Procházka)

Firma RENISHAW se sice neřadí k tradičním výrobcům robotických systémů, avšak pro interní potřeby společnosti vyvinula vlastní delta robot, který je integrován výhradně do systému Equator a není samostatně prodáván [\[87\]](#).

8 VLASTNÍ ZÁVĚRY A/NEBO DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ ROZVOJ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

8.1 Obecná doporučení pro globální rozvoj

Na základě provedené rešerše a analýzy současného stavu lze konstatovat, že plnohodnotné nasazení PR do stavebních činností zůstává výzvou, která překračuje hranice pouhé technické realizace. Je nezbytné na tuto problematiku nahlížet komplexně, tedy s důrazem na součinnost více oborů a systémové začlenění robotiky do celého stavebního procesu.

Jedním z klíčových předpokladů dalšího rozvoje je standardizace stavebních operací. Zatímco v průmyslové výrobě je prostředí stabilní a opakovatelné, staveniště představuje dynamický, nestrukturovaný a proměnlivý systém, v němž je nasazení robotů zásadně komplikováno. Pro vytvoření podmínek vhodných k robotizaci je nezbytné sjednocení konstrukčních a montážních standardů, a to včetně jasného definování pracovních úkonů přímo v digitální projektové dokumentaci – zejména v prostředí metodiky BIM.

Další směr představuje vývoj víceúčelových robotických systémů. Namísto úzce specializovaných řešení (např. pouze pro 3D tisk nebo zdění) je žádoucí směřovat k modulárním robotickým platformám, které umožní výměnu nástrojových hlav podle požadované činnosti. V tomto směru již podniká první kroky např. společnost COBOD, která u své nové platformy BOD3 počítá do budoucna s možností nahrazení tiskové hlavy jiným pracovním nástrojem – například pro elektroinstalaci nebo montáž rozvodných tras. Tento koncept univerzální robotické jednotky by mohl výrazně zvýšit flexibilitu a provozní využitelnost robotů přímo na stavbě.

Zásadní roli bude rovněž hrát vzdělávání, výzkum a mezioborová spolupráce. Robotika ve stavebnictví spojuje oblasti strojírenství, informatiky, automatizace, stavební technologie a řízení. Kromě nových vývojových kapacit je tedy nezbytné připravit i odborníky, kteří budou schopni tyto systémy navrhovat, provozovat i servisovat.

Další překážkou pro plošné nasazení robotiky je absence legislativního a normativního rámce. V ČR, stejně jako ve většině evropských zemí, dosud neexistují technické normy ani procesní předpisy, které by umožnily plnohodnotné nasazení robotických systémů ve výstavbě. Bez jasných pravidel a certifikací zůstane jejich využití omezeno na experimentální nebo výstavní aplikace.

Z hlediska technologické vize je nutné se systematicky zaměřit na propojení robotických systémů s digitálními datovými platformami, jako jsou BIM, systémy strojového učení, IoT infrastruktura, 4D a 5D modelování nebo digitální dvojčata. Cílem je vytvořit adaptivní a datově řízený robotický provoz, který bude schopen samostatného rozhodování na základě aktuálních projektových a senzorických dat.

V neposlední řadě je třeba věnovat pozornost mobilitě a provozní adaptabilitě robotických jednotek. S ohledem na proměnlivost terénu, klimatických podmínek a dynamiku staveniště je žádoucí, aby PR disponovaly autonomním navigačním systémem, schopností přizpůsobit se aktuálním podmínkám a byly schopny plánovat pracovní trajektorii v reálném čase.

8.2 Doporučení pro Českou republiku

V podmínkách České republiky lze robotizaci stavebnictví vnímat jako možný nástroj řešení několika zásadních strukturálních problémů, které v posledních letech výrazně akcelerují. Mezi ty nejvýznamnější patří především nedostupnost bydlení, způsobená kombinací vysokých cen nemovitostí a nízkou kapacitou výstavby, zejména v segmentu dostupného či nájemního bydlení. Urychlení stavebních procesů prostřednictvím automatizovaných a robotizovaných technologií může v budoucnu představovat cestu ke snížení realizačních nákladů, a tím i zvýšení dostupnosti bytového fondu, především pro mladé domácnosti a obyvatele s nižším příjmem.

Současně je nutné reflektovat i kritický nedostatek kvalifikované pracovní síly ve stavebnictví, zejména v tradičních manuálních profesích jako zedník, armovač nebo tesař. Zájem o tyto obory mezi mladými uchazeči dlouhodobě klesá, přičemž demografický vývoj nenaznačuje obrat. Robotizace tedy nepředstavuje pouze technologický pokrok, ale v tomto kontextu i reakci na nepříznivý vývoj pracovního trhu, která může pomoci překlenout vznikající generační propast. Je však třeba objektivně přiznat, že reálné nasazení robotických systémů na staveništích v ČR je zatím minimální. Většina aplikací má demonstrační, výstavní nebo výzkumný charakter, bez přímého dopadu na stavební produkci.

Z hlediska podpory rozvoje robotiky ve stavebnictví na národní úrovni lze doporučit:

- systematickou podporu investic do výzkumné infrastruktury, testovacích polygonů a veřejně financovaných pilotních projektů
- začlenění robotiky a automatizace do výuky odborných středních škol a technických univerzit, včetně praktického výcviku
- podporu technologických start-upů v oblasti digitalizace a stavební automatizace
- rozvoj spolupráce s výrobcí PR (např. ABB, KUKA, FANUC) na vývoji specializovaných systémů přizpůsobených pro podmínky českého stavebnictví

Závěrem lze shrnout, že robotizace stavebnictví má v českém prostředí potenciál stát se jedním ze strategických prvků modernizace tohoto sektoru. Pro její úspěšné zavedení je však nezbytné zajištění koordinované spolupráce mezi výzkumem, školstvím, soukromým sektorem a státní správou, a to jak z hlediska vývoje technologií, tak i jejich implementace do praxe.

9 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zaměřila na systematické zpracování problematiky konstrukce a aplikace PR ve stavebnictví, a to v kontextu současných technologických trendů a zásad Průmyslu 4.0. Cílem bylo zmapovat aktuální stav robotizace ve vybraných oblastech stavebních činností, popsat jejich konstrukční řešení a analyzovat možnosti jejich praktického využití v podmínkách reálné výstavby.

V rámci práce byly detailně popsány podsystémy PR, zejména z pohledu mechaniky, pohonů, řídicích jednotek, sensoriky a koncových efektorů, a to s ohledem na požadavky stavebního prostředí. Byly popsány technologie, které mají z pohledu robotizace nejvyšší potenciál – konkrétně 3D tisk betonových konstrukcí, robotické zdění, automatizovaná pokládka a vázání výztuže a robotické vrtání. U každé z těchto činností byly rozpracovány principy jejich realizace, konkrétní technologická řešení a příklady z praxe.

Důležitou část práce tvořila rešerše aditivních stavebních technologií, především ve formě extruze cementových směsí, kde byly popsány jednotlivé varianty (např. Contour Crafting, Concrete Printing, Shotcrete 3D Printing) a porovnány z hlediska rozsahu jejich uplatnění. Byly uvedeny i příklady konkrétních systémů 3D tiskáren včetně přehledu realizovaných projektů. Práce se rovněž věnovala využití speciálních směsí jako jsou polymerbetony a geopolymerní materiály, které z hlediska robotického zpracování nabízejí zajímavé technické a ekologické parametry.

V další části práce byly popsány možnosti integrace robotických systémů s metodami digitálního řízení výstavby, zejména pomocí BIM, digitálních dvojčat, systémů pro vizuální navigaci a sensorickou adaptaci. Popsány byly nejen přínosy, ale i současná omezení těchto přístupů – např. nízká míra autonomie, omezená provozní robustnost v nestrukturovaném prostředí a dosud chybějící legislativní rámec.

Na základě provedené analýzy byly formulovány konkrétní návrhy a doporučení pro další vývoj v této oblasti. Z globálního hlediska bylo zdůrazněno nutné směřování k vyšší míře standardizace stavebních procesů, vývoj univerzálních robotických platforem s výměnnými nástroji a širší propojení se systémy řízení výstavby založenými na digitálních modelech. Rovněž bylo poukázáno na potřebu systematické podpory výzkumu, vzdělávání a mezioborové spolupráce.

Zvláštní část byla věnována tuzemskému prostředí, kde byly identifikovány specifické faktory – jako je nedostatek pracovních sil v oboru, nízký počet odborně vzdělaných pracovníků a obecně malá míra implementace pokročilých stavebních technologií do praxe.

Celkově lze konstatovat, že robotizace stavebních procesů představuje reálný směr vývoje, který však zatím naráží na řadu bariér – technických, ekonomických i legislativních. Přesto je zřejmé, že v kontextu Průmyslu 4.0 bude její význam narůstat, a to nejen z důvodů produktivity, ale i v souvislosti s nedostatkem pracovníků, tlakem na zkracování lhůt výstavby a požadavky na vyšší kvalitu provedení.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LIU, Yang, et al. *Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges* [online]. 2024 [cit. 2025-03-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02104-4>
- [2] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, VUTIAM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5
- [3] LUO, Dan a YU, Lei. *From Factory to Site—Designing for Industrial Robots Used in On-Site Construction* [online]. 2021 [cit. 2025-03-08]. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5_4
- [4] CALEB, Akanbi a Falade rhoda ADEOLA. *Application of Robotics and Cobotics in Construction Site Automation* [online]. September 2024 [cit. 2025-03-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02104-4>
- [5] BOTEK, Martin. *Konstrukce a aplikace mobilních robotů vhodných pro průmyslové (výrobní) použití* [online]. Bakalářská práce. Vedoucí práce Radek Knoflíček. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2023 [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149170>
- [6] KNOFLÍČEK, Radek. *6SR_12 – Stavba (konstrukce) PRaM* [prezentace PowerPoint]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021. [cit. 2025-04-21]
- [7] BALAGUER, Carlos a Mohamed ABDERRAHIM, eds. *Robotics and Automation in Construction* [online]. Rijeka: InTech, 2008 [cit. 2025-04-10]. ISBN 978-953-7619-13-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/86>
- [8] AZLAAN, Maahir. *Industry 4.0: Principles of Industry 4.0 and Digital Transformation* [online]. 2024 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/383869674_Industry_40_Principles_of_Industry_40_and_digital_transformation
- [9] GAM Enterprises. *Robotic Planetary Gearboxes* [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.gamweb.com/robotic-planetary-gearbox.html>
- [10] StepByStep Robotics. *Cycloidal Drive* [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://stepbystep-robotics.com/hp/robots/cycloidal-drive/>
- [11] Harmonic Drive SE. *Robotics, Handling & Automation* [online]. Dostupné z: <https://harmonicdrive.de/en/applications/robotics-handling-automation>
- [12] WAVESHARE. *Jetank AI Kit – mobilní robot s umělou inteligencí pro Jetson Nano* [online]. RPISHOP.cz, [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/pro-jetson-nano/4420-waveshare-jetank-ai-kit-mobilni-robot-s-umelou-inteligenci-pro-jetson-nano.html>
- [13] SALAJ, Jakub. *Konstrukce a aplikace kolaborativních robotů v kontextu Průmyslu 4.0* [online]. Brno, 2024 [cit. 2025-04-24]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157794>
- [14] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *ČSN EN ISO 9409-1: Manipulační průmyslové roboty – Mechanická rozhraní – Část 1: Lícní desky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004

- [15] WAN, Fang a Chaoyang SONG. *Flange-Based Hand-Eye Calibration Using a 3D Camera With High Resolution, Accuracy, and Frame Rate* [online]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00065>
- [16] HUH, Eui-Nam a Md Imtiaz HOSSAIN. Brainware Computing: Concepts, Scopes and Challenges. *Applied Sciences* [online]. 2021, roč. 11, č. 11, s. 5303 [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11115303>
- [17] PRIETO, Samuel A., XU, Xinghui a GARCÍA DE SOTO, Borja. *A guide for construction practitioners to integrate robotic systems in their construction applications* [online]. 2024 [cit. 2025-03-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1307728>
- [18] BUSINESS MEDIA ONE. Digitalizace ve stavebnictví: Ročenka 2022 [online]. 2022 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: www.stavitel.cz
- [19] IKAP. *Elektromagnetické stínění* [online]. e-Learning učebnice, iKAP [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/elektromagneticke-stineni>
- [20] SAMATAS, Gerasimos G., Seraphim S. MOUMGIAKMAS a George A. PAPAKOSTAS. Predictive Maintenance – Bridging Artificial Intelligence and IoT [online]. Kavala: International Hellenic University, 2021 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2103.11148>
- [21] KOSKELA, Lauri, ed. *Robotics and Automation in Construction* [online]. 2012 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/478138799.pdf>
- [22] PRASATH KUMAR, V. R., BALASUBRAMANIAN, M. a RAJ, S. J. Robotics in Construction Industry [online]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, no. 23 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/305216459>
- [23] MURUGESAN, Balasubramanian. *Robotics in Construction Industry* [online]. 2016 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/305216459> *Robotics in Construction Industry*
- [24] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA. *Směrnice 2006/42/ES ze dne 17. května 2006 o strojních zařízeních a o změně směrnice 95/16/ES*. Úřední věstník Evropské unie, L 157, 9.6.2006, s. 24–86
- [25] UNITED STATES CONGRESS. *Occupational Safety and Health Act of 1970*. Public Law 91-596, 29 U.S.C. § 651 et seq
- [26] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61508:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. Geneva: IEC, 2010.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 12100:2010, Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction*. Geneva: ISO, 2010
- [28] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 13849-1:2015, Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design*. Geneva: ISO, 2015
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10218-1:2011, Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots*. Geneva: ISO, 2011
- [30] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10218-2:2011, Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration*. Geneva: ISO, 2011

- [31] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO/TS 15066:2016, Robots and robotic devices – Collaborative robots*. Geneva: ISO, 2016
- [32] FBR. *Robotic construction is here* [online]. 2023 [cit. 2025-01-31]. Dostupné z: <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>
- [33] MIHULKA, Stanislav. *Zednický autobot Hadrian X uspěl v outdoorovém testu*. Objective Source E-Learning [online]. 17. října 2023 [cit. 2025-01-30]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/13128-zednicky-autobot-hadrian-x-uspel-v-outdoorovem-testu.html>
- [34] ZEIBA, Drew. *Australian company aims to build 10 homes this year with autonomous robotic arm*. The Architect's Newspaper [online]. 21. ledna 2019 [cit. 2025-01-30]. Dostupné z: <https://www.archpaper.com/2019/01/hadrian-x-autonomous-construction-arm/>
- [35] FBR. *Dynamic Stabilisation Technology™* [online]. 2023 [cit. 2025-01-31]. Dostupné z: <https://www.fbr.com.au/view/dst>
- [36] FBR. *The next-generation is here* [online]. 2023 [cit. 2025-01-30]. Dostupné z: <https://www.fbr.com.au/view/next-gen-hadrian-x>
- [37] WIENERBERGER. *Robotické zdění pomocí zdicího robotu* [online]. 2023 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=A1jcbpnHhE>
- [38] ZDICIROBOT.CZ. *Ahoj, jsem zdicí robot* [online]. 2024 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://www.zdicrobot.cz/>
- [39] FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT V PRAZE. *Zdicí robot a robotické zdění Wienerberger* [online]. 2024-02-29 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=A1jcbpnHhE>
- [40] COBOD. *The SOLUTION* [online]. 2022 [cit. 2025-02-11]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/>
- [41] COBOD. *The BOD2* [online]. 2022 [cit. 2025-02-11]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/bod2/>
- [42] COBOD. *Bod2 specifications* [online]. 2022 [cit. 2025-02-11]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/bod2/specifications/>
- [43] COBOD. *Application Areas* [online]. 2022 [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/application-areas/>
- [44] COBOD. *Materials* [online]. 2022 [cit. 2025-02-13]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/materials/>
- [45] COBOD. *The concrete revolution* [online]. 2022 [cit. 2025-02-13]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/materials/dfab/details/>
- [46] COBOD. *3D printing mortars* [online]. 2022 [cit. 2025-02-14]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/materials/mortars/>
- [47] COBOD International. *Big-Bag Silo Specifications* [online]. 2024 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/batch-plant/silo-specs/>
- [48] COBOD International. *Concrete Piston Pump* [online]. 2024 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/batch-plant/piston-pump/>
- [49] COBOD International. *Mini Batch Plant Specifications* [online]. 2024 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/batch-plant/specifications/>
- [50] COBOD International. *Batch Plant* [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://cobod.com/solution/batch-plant/>

- [51] COBOD International. *Robotic Arm vs Gantry 3D Concrete Printer* [online]. 2024 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://cobod.com/robotic-arm-vs-gantry-3d-concrete-printer/>
- [52] COBOD International. *The BOD3* [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://cobod.com/the-bod3/>
- [53] COBOD International. *COBOD launches the most advanced 3D printer so far* [online]. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://cobod.com/cobod-launches-the-most-advanced-3d-printer-so-far/>
- [54] XTREEE. *XtreeE – Large-scale 3D printing solutions*. [online]. [cit. 3. 5. 2025]. Dostupné z: <https://www.xtreee.com/>
- [55] XTREEE. *Printers*. [online]. [cit. 3. 5. 2025]. Dostupné z: <https://www.xtreee.com/printers>
- [56] XTREEE. *Robots*. [online]. [cit. 3. 5. 2025]. Dostupné z: <https://www.xtreee.com/printers/robots>
- [57] XTREEE. *Softwares*. [online]. [cit. 3. 5. 2025]. Dostupné z: <https://www.xtreee.com/softwares>
- [58] ADVANCED CONSTRUCTION ROBOTICS. *IronBOT* [online]. Construction Robots, [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.constructionrobots.com/ironbot>
- [59] ADVANCED CONSTRUCTION ROBOTICS. *TyBOT* [online]. Construction Robots, [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.constructionrobots.com/tybot>
- [60] ADVANCED CONSTRUCTION ROBOTICS, Inc. *Advanced Construction Robotics – TyBOT and IronBOT* [online video]. YouTube, 2022 [cit. 30. 4. 2025]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=uS7WuM1c5iU>
- [61] ADVANCED CONSTRUCTION ROBOTICS. *Central Susquehanna Valley Transportation (CSVT) River Bridge – Unit 2* [online]. Construction Robots, [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: [https://www.constructionrobots.com/jobsite/central-susquehanna-valley-transportation-\(csvt\)-river-bridge---unit-2](https://www.constructionrobots.com/jobsite/central-susquehanna-valley-transportation-(csvt)-river-bridge---unit-2)
- [62] ADVANCED CONSTRUCTION ROBOTICS. *TyBOT Product Overview* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: https://www.constructionrobots.com/files/ugd/178a99_77f5bbe186d7426887890059c86699bf.pdf
- [63] HILTI. *Jaibot – Semi-autonomous construction robot* [online]. [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.hilti.com/content/hilti/W1/US/en/business/business/trends/jaibot.html>
- [64] VECTEEZY. *BIM Building Information Modeling Software Development Industry Construction Vector Illustration* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.vecteezy.com/vector-art/29901510-bim-building-information-modeling-software-development-industry-construction-vector-illustration>
- [65] AU MANUFACTURING. *Next gen Hadrian X robot achieves site acceptance in the US* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.aumanufacturing.com.au/next-gen-hadrian-x-robot-achieves-site-acceptance-in-the-us>
- [66] FLATICON. *CAD file format icon* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: https://www.flaticon.com/free-icon/cad-file-format_28866
- [67] WIENERBERGER. *WALLTER – robotická technologie zdění* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.wienerberger.sk/wallter.html>

- [68] PIXELSQUID. *Brick wall* [online]. 2024 [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.pixelsquid.com/png/brick-wall-2851937796132706103?image=G03>
- [69] GROSS, Jarett. First Geopolymer 3D Printed Building In The World [online video]. YouTube, 20. 6. 2023 [cit. 29. 4. 2025]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=C-tnpkcXTuc>
- [70] COBOD. BOD2 Second to none 3D construction printer COBOD [online video]. YouTube, cca 2019 [cit. 29. 4. 2025]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=cv_ZBgy0DII
- [71] BOCK, Thomas. Construction Automation and Robotics. In: BALAGUER, Carlos a Mohamed ABDERRAHIM, eds. *Robotics and Automation in Construction*. Rijeka: InTech, 2008. ISBN 978-953-7619-13-8. Dostupné z: https://www.intechopen.com/books/robotics_and_automation_in_construction/construction_automation_and_robotics
- [72] CHEN, Yali, Dan HUANG, Zhen LIU, Mohamed OSMANI a Peter DEMIAN. Construction 4.0, Industry 4.0, and Building Information Modeling (BIM) for Sustainable Building Development within the Smart City. *Sustainability* [online]. 2022, 14(16), 10028. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su141610028>
- [73] GHARBIA, Marwan, Alice CHANG-RICHARDS a Ray Y. ZHONG. Robotic Technologies in Concrete Building Construction: A Systematic Review. In: *36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019)*. Newcastle, Canada: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0002. Dostupné také z: <https://www.researchgate.net/publication/334128640>
- [74] HILTI Great Britain. HOW TO: Set-up the Hilti Jaibot [online video]. YouTube, 2019 [cit. 1. 5. 2025]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yi5jBeMQkwg>
- [75] VERZHBOVSKIY, Gennady a Alexey RESHETNIKOV. *Industrial robots application in the construction of buildings and structures*. In: MATEC Web of Conferences [online]. 2017, roč. 129, čl. 05018. ICMTMTE 2017. EDP Sciences. DOI: 10.1051/mateconf/201712905018 [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/42/mateconf_icmtmte2017_05018/mateconf_icmtmte2017_05018.html
- [76] ABIOYE, Sofiat O., OYEDELE, Lukumon O., AKANBI, Lukman, AJAYI, Anuoluwapo, DELGADO, Juan Manuel Davila, BILAL, Muhammad, AKINADE, Olugbenga O. a AHMED, Ashraf. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering* [online]. 2021, vol. 44, 103299. [cit. 2025-04-29]. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>
- [77] AMUSAN, Lekan, AIGBAVBOA, Clinton a OWOLABI, James. *The Disruptive Adaptations of Construction 4.0 and Industry 4.0 as a Pathway to a Sustainable Innovation and Inclusive Industrial Technological Development* [online]. Buildings, 2021, 11(3), 79 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/buildings11030079>
- [78] TAHER, Ghada. Industrial Revolution 4.0 in the Construction Industry: Challenges and Opportunities [online]. Management Studies and Economic Systems, 2021 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.12816/0060000>
- [79] APEX DYNAMICS CZECH. Hřebeny – přímé ozubení [online]. [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/hrebeny-prime-ozubeni/>

- [80] FANUC America Corporation. *FANUC Robot Demonstration with Mazak and Renishaw at IMTS 2022* [online]. 2022 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-38vbGy2pTo>
- [81] YASKAWA America, Inc. *Mazak and Yaskawa Motoman Partner for Automated Laser Part Loading* [online]. 2022 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=SIGkfNgodUA>
- [82] HALTER CNC Automation. *Loading robots for CNC machines – HALTER LoadAssistant* [online]. 2024 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.haltercncautomation.com/en-us/loading-robots>
- [83] MITSUBISHI ELECTRIC. *Assista – Product Overview* [online]. 2021 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://mitsubishisolutions.com/wp-content/uploads/2021/03/Assista-Product-Overview.pdf>
- [84] CLOOS Schweißtechnik GmbH. *QIROX – Lösungen für das automatisierte Schweißen und Schneiden* [online]. 2024 [cit. 2025-04-05]. Dostupné z: <https://www.cloos.de/de-de/produkte/qirox/>
- [85] IGM Robotersysteme AG. *Roboterbaureihe RTE 400* [online]. 2024 [cit. 2025-04-05]. Dostupné z: <https://www.igm-group.com/en/products/roboterbaureihe-rte-400>
- [86] UNITED ROBOTICS GROUP. *Pepper – Technical Specifications* [online]. [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://support.unitedrobotics.group/en/support/solutions/articles/80000958735-pepper-technical-specifications#MOTION>
- [87] RENISHAW plc. *Equator™ 300 gauging system – User guide* [online]. Gloucestershire: Renishaw plc, 2019 [cit. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/gauging>
- [88] WIENERBERGER. *Zdící robot WLTR bodoval v zahraničí: z evropské robotické soutěže si přivezl druhé místo* [online]. 2024 [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.wienerberger.cz/o-nas/o-spolecnosti/novinky/zdici-robot-wltr-bodoval-v-zahranici-z-evropske-roboticke-souteze-si-privezl-druhe-misto.html>

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

BIM	Building Information Model (Informační model stavby)
PR	Průmyslový robot
IoT	Internet of Things (Internet věcí)
ZKŘ	Základní kinematický řetězec
KŘ	Kinematický řetězec
HW	Hardware
SW	Software
BW	Brainware
MW	Machineware
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
AC	Alternating Current (Střídavý proud)
N	Nádrž
F	Filtr
VT	Tlakový ventil
HG	Hydrogenerátor
M	Motor
TM	Tlakoměr
VR	Regulační ventil
R	Rozvaděč
VJ	Jednoseměrný ventil
VS	Škrťací ventil
HM	Hydromotor
PM	Pneumatický motor
P/T	Translační pohyb
R	Rotační pohyb
KD	Kinematická dvojice
IRC	Incremental Rotary Counts (Inkrementální rotační snímač)
IP kód	Ingress Protection (Ochrana proti vniknutí)
IMU	Inertial Measurement Units (Inerciální měřicí jednotky)
DOF	Degree of Freedom (Stupeň volnosti)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
TCP	Tool Central Point (Středový bod nástroje)
5G	Telekomunikační síť páté generace
LIDAR	Light Detection and Ranging (Detekce a měření světla)
GPS	Global Positioning System (Globální polohovací systém)
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping (Simultánní lokalizace a mapování)
CAD	Computer-Aided Design (Počítačově podporovaný design)
PID	Regulátor složený z proporcionální, integrační a derivační části
HMI	Human-Machine Interface (Uživatelské rozhraní)
MQTT	Message Queue Telemetry Transport (Telemetrický přenos zpráv ve frontě)
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture (Komunikace na otevřené platformě – jednotná architektura)
Wi-Fi	Wireless Fidelity (Bezdrátové připojení)
AI	Artificial Intelligence (Umělá inteligence)

DSS	Daňový standard staveb
DIMS	Digitální model stavby
IMS	Informační model stavby
ROS	Robot Operating System (Operační systém robotů)
SaaS	Software as a Service (Software jako služba)
EMI	Electromagnetic Interference (Elektromagnetické rušení)
OEC	Office of the European Communities (Úřad Evropských společenství)
EC	European Commission (Evropská komise)
OSHA	Occupational Safety and Health Act (Zákon o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
TS	Technical Specification (Technická specifikace)
HRC	Human-Robot Collaboration (Spolupráce člověka a robotu)
FBR	Fastbrick Robotics
DST	Dynamic Stabilisation Technology (Technologie dynamické stabilizace)
™	Trademark (Obchodní značka)
®	Registered Trademark (Obchodní značka s právní ochranou)
WLTR	Wienerberger Laying Technology Robot
V1	První verze zdícího robotu WLTR
s.r.o.	Společnost s ručením omezeným
RR	Robot Ready
BOD2/3	Building On Demand
EU	Evropská Unie
GE	General Electric
D.fab	Digital Fabrication (Digitální výroba)
AHMS	Advanced Hose Management System (Pokročilý systém řízení hadic)
ACR	Advanced Construction Robotics (Pokročilá stavební robotika)
DWG	Drawing (Kreslení)
CC	Contour Crafting
CP	Concrete Printing
SC3DP	Shotcrete 3D Printing
TZB	Technické zabezpečení budov
AR	Augmented Reality (Rozšířená realita)
CNC	Computer Numerical Control (Počítačové numerické řízení)
MIG	Metal Inert Gas (Svařování kovů v ochranné atmosféře inertního plynu)
MAG	Metal Active Gas (Svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu)

11.1 Seznam tabulek

Tab 1) Základní technické parametry zdícího robotu WLTR [37]	57
Tab 2) Typy cihel využívané pro robotické zdění, jejich tloušťka a pevnostní třída [37]	58
Tab 3) Rozšíření a použití jednotlivých technologií 3D tisku ve stavebnictví (Autor: Karel Procházka), [71], [72]	84
Tab 4) Prioritizace strategií pro podporu implementace automatizace ve Stavebnictví 4.0 na základě průměrného indexu relativní shody, kde vyšší hodnota vyjadřuje vyšší prioritu [77]	97

Tab 5) Zásadní překážky a výzvy bránící efektivní implementaci automatizace ve Stavebnictví 4.0 na základě průměrného indexu relativní shody, kde vyšší hodnota vyjadřuje vyšší prioritu [77] 97

11.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Systémový rozbor PR (Autor: Karel Procházka)	21
Obr. 2) Systémové pojetí PR [2].....	22
Obr. 3) Rozdělení akčního systému PR umístěného na přídavném translačním pojezdovém ústrojí, translační pohyby ve směru os X, Y, Z a rotace A, B, C kolem těchto os [2].....	22
Obr. 4) Schéma rozdělení akčního systému PR [2]	23
Obr. 5) Adaptivní PR jako soustava konstrukčních uzlů, skupin a součástí [2].....	23
Obr. 6) Centrické uspořádání pohonné jednotky [6]	24
Obr. 7) Na obrázku vlevo se nachází elektrický stejnosměrný pohon (DC), vpravo elektrický střídavý servopohon (AC) [6]	24
Obr. 8) Příklady hydraulického a pneumatického schématu [6].....	25
Obr. 9) Vlevo se nachází planetová a vpravo cykloidní převodovka a jejich jednotlivé komponenty [9].....	27
Obr. 10) Základní řetězce PR s vyznačením pořadí kinematických dvojic posuvných/translačních (P/T) a rotačních (R) [6].....	27
Obr. 11) Obecný prostorový pohyb realizovaný pomocí kinematických řetězců se 6-ti stupni volnosti [6].....	28
Obr. 12) Typický příklad lineárního vedení kinematického řetězce TTT koncepce FESTO a doplnit zdroj [6]	28
Obr. 13) Mobilní PR Waveshare Jetank AI Kit [12]	29
Obr. 14) Schématické znázornění kloubů (rotačních KD) v nárysu a půdorysu [2].....	29
Obr. 15) Schématické znázornění lineárního vedení (translačních KD): a) suportové, b) smyčkové, c) výsuvné [2]	30
Obr. 16) Inkrementální snímače polohy a rychlosti pohyblivých částí PR (nepřímé odměřování) [6].....	30
Obr. 17) Prvky IP kódu a jejich význam [13].....	31
Obr. 18) Schéma instalace pojezdu PR vlevo na kolejové dráze, vpravo na závěsné (visuté) dráze [2]	32
Obr. 19) Průchozí kryty z tenkého plechu [2].....	33
Obr. 20) Schéma integrovaného orientačního ústrojí se dvěma stupni volnosti (DOF) [2]	33
Obr. 21) Ukázka koncového efektoru pro manipulaci s cihlami a následnému nanášení malty [3].....	34
Obr. 22) Nárys a bokorys univerzální montážní příruby dle normy ISO 9409-1-50-4-M6, kde číslo 50 je rovno průměru roztečné kružnice d1; 4 je počet závitových děr právě na této kružnici; M6 značí konkrétní závit v těchto vrtaných otvorech [15].....	35
Obr. 23) Mapa prostředí – data shromážděná pomocí LIDAR senzoru [7].....	36
Obr. 24) Na základě přijatých dat od LIDARu zrekonstruovaná 3D mapa prostředí [7].....	36
Obr. 25) Teach-pendant společnosti KUKA používaný pro on-line programování [2]	37
Obr. 26) Princip off-line programování [2]	38
Obr. 27) Datové zdroje a tok zpětné vazby ve stavebním sektoru [1].....	39

Obr. 28) Informační model stavby (IMS) nebo anglicky Building information model (BIM) je nejaktuálnější a nejvěrnějším odrazem reality stavby v digitálním světě, a to včetně všech důležitých souvisejících informací, které se ke stavbě pojí [18].....	40
Obr. 29) Reálné dvojče posílá automaticky aktuální data digitálnímu dvojčeti, které tato data následně zpracovává, vyhodnocuje a dává pokyn reálnému dvojčeti, jak v konkrétní situaci reagovat [18].....	40
Obr. 30) Navrhovaný koncept brainware (BW) [16].....	41
Obr. 31) Senzorová zátěž (výbava) na palubě robotu, používaná pro sběr dat a navigaci [17].....	44
Obr. 32) K prvnímu útlumu elektromagnetického vlnění dochází na rozhraní vzduch-stěna, dále při průchodu stínící kovovou přepážkou, a posledně vlivem odrazu v přepážce [19]	44
Obr. 33) Životní cyklus PR ve stavebnictví (Autor: Karel Procházka).....	45
Obr. 34) Prediktivní údržba využívající internet věcí (IoT) a umělou inteligenci (AI) [20].....	47
Obr. 35) Komplexní ekonomické zhodnocení investice do PR (Autor: Karel Procházka).....	49
Obr. 36) Normy a předpisy pro zajištění bezpečnosti spolupráce člověka a stroje [1]	50
Obr. 37) Autonomní konstrukční rameno Hadrian X® společnosti FBR [34].....	54
Obr. 38) Autonomní konstrukční rameno Next-Gen Hadrian X® společnosti FBR [36].....	55
Obr. 39) Zdící robot WLTR firmy Wienerberger s.r.o poprvé na stavbě [88]	56
Obr. 40) Pohled na koncový efektor (griper) zdícího robotu WLTR [88]	57
Obr. 41) Technické parametry a varianty lokálního přesunu robotu WLTR pomocí elektrického paletového vozíku nebo jeřábu [38]	57
Obr. 42) Cihla Porotherm 30RR Profi se zateplením pro robotické zdění vystavená na Stavebním veletrhu Brno 2025 (Autor: Karel Procházka)	59
Obr. 43) Pohled na cihlu POROTHERM manipulovanou koncovým efektem zdícího robotu WLTR [39]	60
Obr. 44) Portálová konstrukční 3D tiskárna BOD 2 [40].....	62
Obr. 45) 3D vytištěný základ větrné turbíny ve spolupráci s firmami Holcim a GE Renewable Energy [43]	64
Obr. 46) První německý 3D tištěný obytný dům ve spolupráci s firmou PERI [43].....	64
Obr. 47) První 3D tištěná škola na světě v Malawi, Afrika ve spolupráci s firmou 14Trees (Holcim) [43].....	65
Obr. 48) Okamžitá transformace betonové směsi [45].....	66
Obr. 49) Vlevo se nachází silo pro skladování suchého cementu, uprostřed dvouválcové hydraulické pístové čerpadlo a vpravo dávkovací zařízení směsi [50]	67
Obr. 50) Nová generace stavební 3D tiskárny BOD3 včetně přidruženého systému dopravy materiálu [53]	68
Obr. 51) Na obrázku jsou znázorněna schémata tří základních tiskových hlav, zleva 1K, 2K, 3K+ [55]	70
Obr. 52) Vlevo robotické rameno ABB na lineárním pojezdu a vpravo na statickém podstavci [56].....	71
Obr. 53) Robotický systém IronBOT při automatizované pokládce výztužných prutů na stavbě [58].....	72
Obr. 54) Hlavní části PR IronBOT [58]	73
Obr. 55) Nasazení PR TyBOT pro automatizaci vázání výztuže při výstavbě mostu přes řeku Susquehanna [61]	75
Obr. 56) Hlavní části PR TyBOT [62]	76
Obr. 57) Nasazení robotu Hilti Jaibot při autonomním vrtání otvorů do stropní konstrukce [63]	77

Obr. 58) Dva základní přístupy k řízení robotického zdění [64], [65], [66], [67], [68]	81
Obr. 59) Na obrázku vlevo se nachází ukázka betonové směsi, uprostřed maltové směsi a úplně vpravo pak geopolymerní materiál [44], [69]	83
Obr. 60) Tisková hlavy 3D tiskárny BOD2 společnosti COBOD [70]	83
Obr. 61) Uchopovací systém portálového PR IronBOT [60]	86
Obr. 62) Autonomní vázací systém TyBOT využívající strojové vidění a AI pro detekci spojů výztuže [60]	88
Obr. 63) Vrt provedený PR JAIBOT a následné označení jeho pozice pomocí značkovací jednotky robotu [74]	90
Obr. 64) Umělá inteligence (AI) ve stavebním sektoru [76]	94
Obr. 65) Kolaborativní roboty CRX-5iA (Autor: Karel Procházka)	100
Obr. 66) Kolaborativní roboty CRX-10iA (Autor: Karel Procházka)	101
Obr. 67) Kolaborativní robot CRX-10iA vybaven bezpečnostní závorou (Autor: Karel Procházka).....	101
Obr. 68) Kolaborativní roboty CRX-10iA/L (Autor: Karel Procházka).....	102
Obr. 69) Kloubový robot LR-10iA10 integrovaný do výrobní linky pro skládání a lepení papírových krabic, balení výrobků, paletizaci a aplikaci etiket (Autor: Karel Procházka) ...	102
Obr. 70) Kloubové roboty LR-10iA10 (vlevo) a M-20iD35 (uprostřed a vpravo) integrované do výrobní linky pro skládání a lepení papírových krabic, balení výrobků, paletizaci a aplikaci etiket (Autor: Karel Procházka)	103
Obr. 71) Robotická etiketace kloubovým robotem LR-10iA10 (Autor: Karel Procházka)...	103
Obr. 72) Kloubové roboty LR-10iA10 (Autor: Karel Procházka).....	104
Obr. 73) Převod pomocí hřebene s přímým ozubením a ozubeného kola (pastorku) firmy APEX DYNAMICS, INC., využívané pro pojezdy firmy HIWIN [79]	104
Obr. 74) Kloubový robot M20iA v kombinaci se skenerem ATOS 5 snímající plechový výrobek (Autor: Karel Procházka).....	105
Obr. 75) PR typu M-20iD/25 (Food grade) integrovaný firmou MAZAK a určený pro manipulaci s obrobky nebo polotovary (Autor: Karel Procházka)	105
Obr. 76) CNC obráběcí centrum osazené PR z řady M-20 určeným pro manipulaci s obrobky nebo polotovary (Autor: Karel Procházka).....	106
Obr. 77) Vlevo šestiosý vertikální kloubový robot MotoMINI, vpravo kolaborativní robot HC20DTP (Autor: Karel Procházka).....	107
Obr. 78) Kolaborativní roboty CRB 1300 SWIFTI (Autor: Karel Procházka)	107
Obr. 79) Na prvních dvou obrázcích zleva se nachází kolaborativní robot CRB15000 GoFa sloužící pro postřik střešních tašek, na obrázku vpravo ten samý robot upravený pro smažení palačinek (Autor: Karel Procházka).....	108
Obr. 80) Kolaborativní robot YuMi (IRB 14000) obsluhující kávovary (Autor: Karel Procházka).....	108
Obr. 81) PR typu KR 4 R600 (Autor: Karel Procházka)	109
Obr. 82) Robot typu SCARA KR 6 R500 Z200 včetně pendantu pro ovládání robotu (Autor: Karel Procházka).....	109
Obr. 83) Vlevo lze vidět PR typu KR 6 R700 AGILUS implementovaný do robotického pracoviště pro řezání laserem, vlevo se nachází robot KR QUANTEC (Autor: Karel Procházka)	110
Obr. 84) Na prvních dvou snímcích zleva jsou zobrazeny kolaborativní roboty LBR iisy 3 R760 s dvoučelistovým pákovým chapadlem a podtlakovým efektozem pro manipulaci s drobnými	

předměty. Vpravo je vidět verze LBR iiwa 8 R930 určená k uchopení plastových kelímků, jejich naplnění pivem a předání uživateli (Autor: Karel Procházka)	110
Obr. 85) Modulární robotická buňka kolaborativních robotů LBR iiwa 7 R800 na pracovišti (Autor: Karel Procházka).....	111
Obr. 86) Kolaborativní robot MELFA ASSISTA je nejnovějším robotem společnosti Mitsubishi Electric's (Autor: Karel Procházka)	111
Obr. 87) Konstrukční a funkční prvky kolaborativního robotu MELFA Assista od společnosti Mitsubishi Electric [83]	112
Obr. 88) PR typu TX2-60, vlevo manipulace s pouzdry hodinek tříčelistovým koncovým efektoem, uprostřed je využit podtlakový koncový efektor a vpravo robot optimalizovaný pro 3D tisk (Autor: Karel Procházka).....	112
Obr. 89) PR typu TX2-90, vlevo robotické pracoviště pro výrobu kovových vizitek, vpravo robot na lineárním pojezdu firmy Unimotion využívajícím hřebenového převodu a pastorku (Autor: Karel Procházka).....	113
Obr. 90) Výsledná kovová vizitka vypálená laserem pomocí PR typu TX2-90 na robotickém pracovišti viz. výše (Autor: Karel Procházka).....	113
Obr. 91) PR typu TX2-40 umístěn na lineární ose HT-S firmy HIWIN poháněné kuličkovým šroubem, před robotem je dále umístěna lineární osa KK typ F (Autor: Karel Procházka)...	114
Obr. 92) Na všech třech fotografiích je zachycen PR typu SMART ARC, určený pro obloukové svařování metodou MIG/MAG a součástí jeho výbavy je svařovací hořák, podavač drátu a připojení ke svařovacímu zdroji (Autor: Karel Procházka).....	114
Obr. 93) Na fotografii vlevo je zachycen kolaborativní robot z řady S-Family určený pro nasazení v automatizačních procesech, zejména v oblastech manipulace, svařování či montáže, vpravo lze pak pozorovat kolaborativní robot typu Racer5 COBOT, vybaven pneumatickým dvoučelistovým paralelním chapadlem pro standardní manipulace s menšími díly (Autor: Karel Procházka)	115
Obr. 94) Vlevo na fotografii se nachází univerzální robotický systém typu E-rám (automatizované svařovací pracoviště) s robotem TM 1400 WG3-350A integrovaný firmou Valk Welding, vpravo totožný robot samostatně (Autor: Karel Procházka).....	115
Obr. 95) Vlevo na fotografii se nachází kolaborativní robot řady M-Series v mobilním pracovišti ROBOTICALL pro manipulaci s 3D tištěnými díly, dále vpravo lze vidět robotické pracoviště pro automatizovanou obsluhu CNC stroje, obsluhované kolaborativním robotem řady M-Series, vybaveným dvouprstým elektrickým chapadlem OnRobot, kdy toto řešení je realizováno firmou ELTEP ve spolupráci se společnostmi ITAX a HURCO, a představuje pokročilou integraci robotizace ve strojírenské výrobě v souladu s principy Průmyslu 4.0 (Autor: Karel Procházka).....	116
Obr. 96) Úplně vlevo lze pozorovat automatizované pracoviště s kolaborativním robotem CR5 pro manipulaci a aplikaci etiket v rámci balicí linky, dále pak uprostřed obrázku lze vidět kolaborativní robot CR7 s univerzální montážní přírubou pro koncový efektor na konci ramene robotu, a posledně na obrázku vpravo se nachází kolaborativní robot CR10 při demonstraci broušení dřevěného torza těla (Autor: Karel Procházka)	117
Obr. 97) Na fotografii vlevo je zachycen šestiosý kolaborativní robot typu Magician E6, určený pro výukové a lehké průmyslové aplikace, při manipulaci s barevně rozlišenými objekty pomocí dvoučelistového pneumatického koncového efektoru, vlevo se nachází kolaborativní robot Nova 2 určený k obsluze kávovaru v rámci ukázky zákaznické automatizace (Autor: Karel Procházka)	117

Obr. 98) Svařovací robot QIROX od společnosti CLOOS integrovaný do portálového systému (Autor: Karel Procházka).....	118
Obr. 99) Kolaborativní robot integrovaný společností DREAMLANDROBOTICS, vybavený přísavkovým koncovým efektozem pro přesnou manipulaci s malorozměrovými objekty (Autor: Karel Procházka).....	119
Obr. 100) Vlevo nahoře na obrázku vidíme robotické pracoviště několika kolaborativních robotů UR integrovaných firmou EXACTEC, vpravo nahoře se nachází typ UR20 a oba roboty v dolní části jsou typu UR10e (Autor: Karel Procházka)	119
Obr. 101) Vlevo lze pozorovat kolaborativní svařovací robot CRP-RC09-05 pro přesné obloukové svařování, vpravo pak svařovací robot CRP-RH14-10-W s rotačním polohovadlem pro přesnou víceosou manipulaci (Autor: Karel Procházka).....	120
Obr. 102) PR typu HORST600 pro automatizovanou manipulaci s malorozměrovými dílci (Autor: Karel Procházka).....	120
Obr. 103) Svařovací robot IGM RTE 400 s polohovadlem obrobku v automatizované buňce pro obloukové svařování (Autor: Karel Procházka)	121
Obr. 104) Robotické pracoviště ROBOLINE osazené kolaborativním robotem Lexium Cobot (Autor: Karel Procházka).....	122
Obr. 105) Kolaborativní robot ReBeL určený pro lehké manipulační úlohy a montážní operace (Autor: Karel Procházka).....	122
Obr. 106) Kolaborativní robot řady AUBO-i v kombinaci s 3D optickým skenerem ATOS Q (Autor: Karel Procházka).....	123
Obr. 107) Humanoidní sociální robot společnosti SOFTBANKROBOTICS, na fotografii využit pro výstavní účely firmy EXACTEC (Autor: Karel Procházka).....	123
Obr. 108) Vlevo na obrázku se nachází delta robot EQUATOR 500 s měřicí sondou, vpravo ten samý robot v kooperaci s kolaborativním robotem CRX-5iA firmy FANUC pro manipulaci s měřenou součástí (Autor: Karel Procházka)	124