

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DESIGN AUTONOMNÍHO MOBILNÍHO ROBOTA PRO STAVEBNÍ PROSTŘEDÍ

DESIGN OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT FOR THE CONSTRUCTION ENVIRONMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matěj Krejčí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Matěj Krejčí**
Studijní program: Průmyslový design ve strojírenství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD.**
Akademický rok: 2025/26

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 diplomové práce:

Design autonomního mobilního robota pro stavební prostředí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autonomní mobilní robot (AMR) představuje samostatně fungující zařízení určené pro logistiku a podporu pracovních procesů v průmyslovém a stavebním prostředí. Jeho hlavní funkcí je přeprava materiálu, náradí a komponent mezi jednotlivými místy stavby či výrobními halami, případně provádění monitorovacích a inspekčních úkolů. Design tohoto autonomního vozidla je v řadě případů podřízen funkci a nízkým výrobním nákladům, přesto se u nových konceptů objevuje snaha o spojení funkčnosti, spolehlivosti a ergonomie. Návrh konceptu autonomního mobilního robota vycházejícího ze současných a očekávaných technologií poskytne nové možnosti v rámci automatizace stavebních procesů.

Typ práce: vývojová – designérská

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je koncepční, výtvarně–technické řešení autonomního mobilního robota pro stavební prostředí navrženého s využitím moderních technologií a materiálů.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu a identifikace silných i slabých stránek,
- návrh výtvarně–technické koncepce robota,
- zpracovat prostorový model navrženého designu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, sumarizační poster, technický poster, ergonomický poster, designérský poster, fotografie modelu, fyzický model.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

DREYFUSS, Henry. Designing for people. New York: Allworth Press, 2003. ISBN 1581153120.

FIELL, Charlotte a Peter FIELL (eds.). Designing the 21st century: design des 21. Jahrhunderts Le design du 21 siècle. Köln: Taschen, c2001. ISBN 3-8228-5883-8.

LIDWELL, William. a Gerry. MANACSA. Deconstructing product design: exploring the form, function, usability, sustainability, and commercial success of 100 amazing products. Beverly, Mass.: Rockport Publishers, c2009. ISBN 1592533450.

NORMAN, Donald A. Emotional design: why we love (or hate) everyday things. New York: Basic Books, 2005. ISBN 0-465-05136-7.

PELCL, Jiří. Design: od myšlenky k realizaci = from idea to realization. V Praze: Vysoká škola uměleckoprůmyslová v Praze, c2012. ISBN 978-80-86863-45-0.

THOMPSON, Rob. a Young Yun. KIM. Product and furniture design. New York: Thames & Hudson, 2011. Manufacturing guides. ISBN 0500289190.

KULA, Daniel, Elodie TERNAUX a Quentin HIRSINGER. c2012. Materiology: průvodce světem materiálů a technologií pro architekty a designéry. Praha: Happy Materials. ISBN 978-80-260-0538-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem autonomního mobilního robota pro stavební prostředí. Hlavním cílem práce je navrhnout komplexní řešení, které nabídne efektivní provozní funkci v souladu s estetickou stránkou stroje. Problematika je řešena rozsáhlou analýzou dostupných technických řešení a konkurenčních produktů, na kterou úzce navazuje vlastní návrh inovativní koncepce. Během tvůrčího procesu je kladen velký důraz na přirozenou integraci nezbytných funkčních prvků do celkového tvarového řešení karoserie. Konkrétním výsledkem této studie je elektricky poháněná pásová platforma vybavená systémem výměnných nástaveb a robotickým manipulačním ramenem. Tímto uceleným řešením návrh přímo reaguje na rostoucí potřebu maximální efektivity a soběstačnosti v rámci stavební logistiky. Předložená studie přináší značnou hodnotu pro obor průmyslového designu a vývoj stavební techniky, neboť poskytuje inženýrsky podložený pohled na estetiku budoucích autonomních strojů a nabízí inspirativní základ pro další výzkum.

KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní mobilní robot, stavebnictví, průmyslový design, modularita, stavební logistika

ABSTRACT

This master's thesis deals with the design of an autonomous mobile robot for the construction environment. The main objective of the thesis is to propose a comprehensive solution that combines efficient operational functionality with the aesthetic aspect of the machine. The issue is addressed through an extensive analysis of available technical solutions and competing products, followed closely by the author's own design of an innovative concept. Throughout the creative process, great emphasis is placed on the natural integration of necessary functional elements into the overall shape design of the bodywork. The specific result of this study is an electrically powered tracked platform equipped with a system of interchangeable attachments and a robotic manipulator arm. With this comprehensive solution, the design directly responds to the growing need for maximum efficiency and self-sufficiency within construction logistics. The presented study brings significant value to the field of industrial design and the development of construction machinery, as it provides an engineering-backed insight into the aesthetics of future autonomous machines and offers an inspiring foundation for further research.

KEYWORDS

autonomous mobile robot, construction, industrial design, modularity, construction logistics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, Matěj. *Design autonomního mobilního robota pro stavební prostředí*. Online, diplomová práce. Ladislav KŘENEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/173830>.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, doc. akad. soch. Ladislavu Křenkovi ArtD., za odborné vedení, cenné připomínky a hodnotné rady, které mi během tvorby návrhu poskytl. Dále bych chtěl poděkovat všem vyučujícím za jejich vstřícnost a velmi přínosné konzultace.

Můj dík patří rovněž všem, kteří se podílejí na chodu dílen StrojLabu, za poskytnutí nezbytného zázemí pro výrobu fyzického modelu.

V neposlední řadě děkuji mé rodině a kamarádům za jejich cenné postřehy a všestrannou pomoc.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. akad. soch. Ladislava Křenka, ArtD. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Při stylizaci, gramatické korektuře a strukturování textové části práce byly využity nástroje generativní umělé inteligence (model Gemini).

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	16
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Rešeršní metoty	17
2.1.1	Kritéria relevance pro výběr informačních zdrojů	17
2.1.2	Použité sekundární zdroje	17
2.1.3	Rešeršní požadavek a rešeršní strategie	18
2.1.4	Výběr relevantních informačních pramenů	18
2.1.5	Užité metody zpracování dat	19
2.2	Motivační analýza	20
2.2.1	Automatizace stavebnictví	20
2.2.2	Analýza trhu	22
2.3	Designerská analýza	23
2.4	Technická analýza	35
2.4.1	Podvozek	36
2.4.2	Pohonný systém	42
2.4.3	Baterie a správa energie	46
2.4.4	Senzorické vybavení	52
2.4.5	Řídící systém	57
2.4.6	Nástavbové systémy	65
2.5	Legislativní omezení	68
2.6	Identifikace příležitostí	69
3	CÍLE PRÁCE	71
3.1	Vymezení problému	71
3.1.1	Název produktu a jeho klasifikace	71
3.1.2	Specifikace zákazníka	71
3.1.3	Specifikace spotřebitele	72
3.1.4	Specifikace možného trhu, ceny a použitých výrobních technologií	73
3.1.5	Vymezení atributů a cílů produktu	74
3.2	Cíle vývoje	76
3.2.1	Globální cíl	76
3.2.2	Dílčí cíle	76
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	78
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	78

4.2	Technická funkční analýza	78
4.2.1	Specifikace vnitřních komponent	79
4.2.2	Specifikace vnějších komponent	81
4.3	Návrh alternativních řešení	82
4.3.1	Varianta I	83
4.3.2	Varianta II	84
4.3.3	Varianta III	86
4.4	Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího	87
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	89
5.1	Určení tvarů, rozměrů a materiálů	89
5.1.1	Tvar	89
5.1.2	Rozměry	92
5.1.3	Materiály	94
5.2	Odhad výrobních nákladů	95
5.3	Matematický model	97
5.3.1	Provoz a energetická bilance	97
6	DETAILNÍ NÁVRH	99
6.1	Tvarové řešení	99
6.1.1	Celkové proporce a kompozice	99
6.1.2	Přední pohled	102
6.1.3	Boční pohled	104
6.1.4	Zadní pohled	107
6.1.5	Výměnné nástavby	108
6.1.6	Robotické rameno	110
6.2	Technické řešení	112
6.3	Ergonomické řešení a bezpečnost	122
6.4	Barevné a grafické řešení	126
6.4.1	Barevné řešení	126
6.4.2	Grafické řešení	130
6.5	Udržitelnost produktu	132
6.5.1	Energetická koncepce a bezemisní provoz	132
6.5.2	Modulární koncepce	133
6.5.3	Materiály a recyklovatelnost	133
6.6	Hodnocení klíčových parametrů	134

7	ZÁVĚR	137
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	139
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	140
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	148
10.1	Seznam použitých zkratk	148
10.2	Seznam použitých veličin a jednotek	150
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	152
12	SEZNAM TABULEK	155
13	SEZNAM PŘÍLOH	156
14	PŘÍLOHY	157

1 ÚVOD

Stavebnictví představuje velké průmyslové odvětví, které však v současnosti čelí značným výzvám. Rostoucí tlak na efektivitu práce, bezpečnost na staveništích a v neposlední řadě naléhavá potřeba snižování ekologické zátěže nutí tato odvětví hledat zcela nové technologické přístupy. V tomto kontextu se automatizace a robotizace jeví jako naprosto neodmyslitelný směr budoucího vývoje. Autonomní mobilní roboti představují progresivní segment, který se do reálného provozu teprve postupně zavádí. Právě proto, že se jedná o formující se trh, se otevírá před průmyslovým designem široké spektrum možností, ale také řada zásadních otázek ohledně budoucího uspořádání těchto strojů.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem autonomního mobilního robota pro stavební prostředí. Vzhledem k technologické otevřenosti celého segmentu bylo v úvodní fázi klíčové jasně definovat primární účel navrhovaného stroje. Na základě podrobné analýzy aktuálních trendů a procesů na staveništích bylo rozhodnuto zaměřit se na oblast logistiky a přesunu materiálu. Tyto rutinní úkony tvoří významnou část stavebních procesů a pro postupnou automatizaci odvětví představují ten nejpřirozenější a nejefektivnější výchozí bod.

Přechod k plné autonomii přináší pro průmyslový design zcela nové výzvy. Tradiční pojetí těžké stavební techniky je nutné přehodnotit a hledat inspiraci v jiných odvětvích. Práce si proto klade za cíl vypracovat komplexní výtvarně-technickou studii, která nabídne tvarové řešení, které bude plně respektovat funkci a autonomní povahu stroje. Důraz je kladen na to, aby finální design nejen srozumitelně komunikoval svou technologickou vyspělost, ale aby zároveň propojoval veškeré estetické, provozní a výrobní požadavky kladené na moderní průmyslový produkt.

Zásadním východiskem pro celkové tvarování stroje se stala volba pásového podvozku v kombinaci s elektrickým pohonem, což robotovi zajišťuje průchodnost terénem i bezemisní provoz. Na tento technický základ úzce navazuje samotný designérský proces, kde byla velká pozornost věnována práci s nezbytným funkčním vybavením, jako jsou složité senzorické systémy, osvětlení či bezpečnostní prvky. Hlavní snahou bylo tyto technologické uzly přirozeně začlenit do návrhu a tvarování karoserie tak, aby nepůsobily jako dodatečný prvek, ale staly se součástí celkové estetiky a výrazu stroje.

Diplomová práce zkoumá možnosti, jak stroj koncipovat s ohledem na udržitelnost a flexibilitu, přičemž pracuje s využitím modularity. Výsledná studie reflektuje nejen technologické potřeby moderního stavebnictví, ale odpovídá také na otázky týkající se vizuální komunikace stroje s okolím. Cílem bylo navrhnout takový design, který přirozeně podpoří bezpečnost na staveništi a usnadní kooperaci s lidmi. Vznikla tak komplexní vize multifunkčního stroje nastiňující, jak by mohla vypadat budoucí generace autonomních robotů pro stavební průmysl.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

2.1.1 Kritéria relevance pro výběr informačních zdrojů

Před samotným procesem vyhledávání informačních zdrojů byla klíčová formulace rešeršních požadavků, což zahrnovalo definici specifických vyhledávacích výrazů. Mezi stěžejní klíčová slova a fráze patřila: „autonomní stavební robot / Autonomous construction robot“, „robotizace / Robotization“, „stavebnictví / Construction industry“, „navigace / Navigation“, „efektivita / Efficiency“, „mobilita / Mobility“, „konstrukce / Structure“, „modularita / Modularity“ a „design“. V řadě případů byly využity kombinace těchto termínů, jejich synonyma či související odborné vazby. Tento sestavený seznam klíčových slov byl následně aplikován při prohledávání relevantních primárních i sekundárních informačních zdrojů. Preferovány byly zejména recenzované odborné články, konferenční sborníky, technické zprávy a firemní publikace. Vyhledávání probíhalo primárně v anglickém jazyce, aby byl zajištěn přístup k celosvětovým poznatkům a studiím v této oblasti. Vzhledem k povaze tématu automatizace ve stavebnictví nebylo stanoveno striktní časové omezení, jelikož vývoj některých technologií probíhá dlouhodobě. Prioritou však zůstaly aktuální publikace z posledních let, které reflektují moderní trendy a reálné implementace na staveništích. Samotná selekce zdrojů byla podpořena stanovením konkrétních kritérií zaměřených na technologickou aktuálnost a praktickou ověřitelnost. Po důkladné analýze byly vybrány pouze ty zdroje, které poskytovaly detailní informace nezbytné pro návrh vlastního řešení autonomního robota.

2.1.2 Použité sekundární zdroje

K identifikaci relevantních informačních zdrojů byla využita definovaná klíčová slova v kombinaci se stanovenou rešeršní strategií. Bibliografické databáze jako ScienceDirect, Elsevier, Google Scholar, VUT Primo či Google Patents sloužily k vyhledání vědeckých článků, závěrečných prací a technických zpráv. Výběr pramenů byl dále rozšířen o webové stránky výrobců, odborné portály a další doplňující materiály z oblasti stavební robotiky.

2.1.3 Rešeršní požadavek a rešeršní strategie

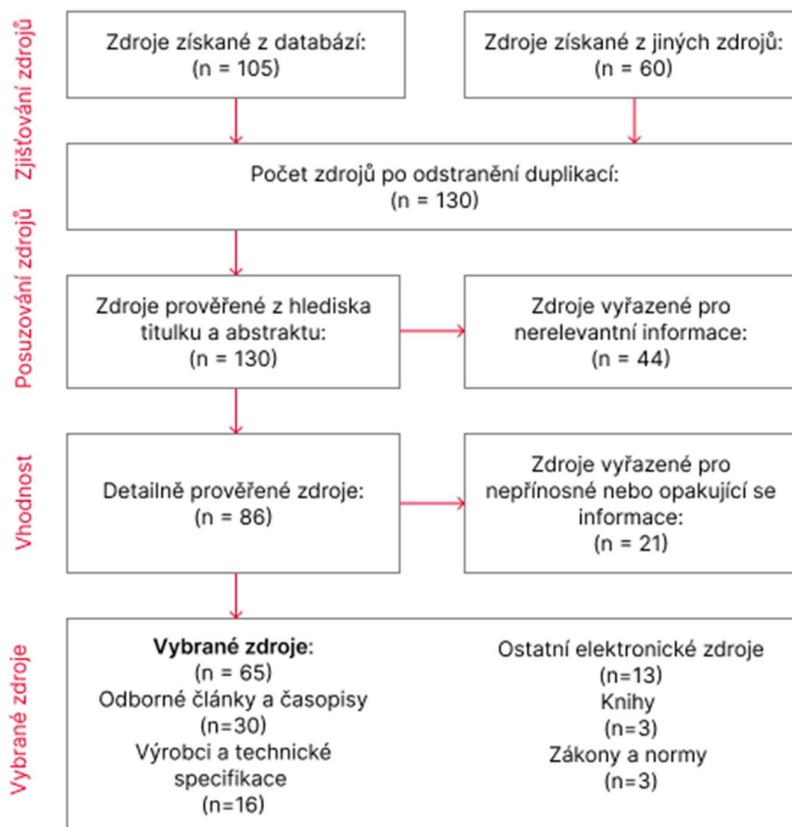
Pro efektivní identifikaci informačních pramenů byla zvolena kombinace strategie stavebních kamenů a metody rostoucí perly. Metoda rostoucí perly sloužila k systematickému zužování vyhledávání od nejširšího kontextu k detailu. Proces začal zadáním obecného termínu, který byl v dalších krocích specifikován. Jako příklad lze uvést úvodní fázi, kdy heslo „Construction industry“ generovalo příliš rozsáhlý soubor dat. Následným zpřesněním na „Construction robotics“ došlo k výrazné redukci výsledků. Finální dotaz ve tvaru „Autonomous mobile construction robot“ pak vedl k zisku vysoce relevantních dokumentů. Strategie stavebních kamenů byla založena na identifikaci dílčích aspektů zkoumaného tématu a jejich logickém propojování. Příkladem může být analýza technických požadavků na pohyb stroje. Téma bylo dekomponováno na klíčová slova jako „Mobile robot“, „Navigation“ a „Outdoor environment“. Tyto pojmy byly následně svázány pomocí booleovských operátorů. Zápis „Mobile robot AND Construction“ zajistil kontextovou relevanci, zatímco vylučovací podmínka „NOT Aerial“ odfiltrovala drony, které nebyly předmětem zájmu.

Syntéza těchto metodických přístupů, tedy rozkladu tématu a postupného zpřesňování dotazů, zajistila vytvoření kvalitního podkladu pro rešeršní část práce.

2.1.4 Výběr relevantních informačních pramenů

V rámci rešeršního procesu byla aplikována kombinace strategií pro efektivní selekci informačních pramenů. Prvotní fáze vyhledávání v bibliografických databázích vedla k identifikaci 105 záznamů. Tento soubor byl dále rozšířen o 60 pramenů získaných z alternativních zdrojů, mezi něž patřily webové prezentace výrobců, odborné portály a neakademické platformy. Celkový počet identifikovaných dokumentů tak dosáhl hodnoty 165. Následovala fáze screeningu, během níž byly odstraněny duplicitní záznamy, což vedlo k redukci souboru na 130 unikátních položek. Dalším krokem byla analýza relevance na základě názvů a abstraktů, která vyústila ve vyřazení 44 zdrojů, jež tematicky neodpovídaly zaměření práce. Zbývajících 86 dokumentů bylo podrobeno detailnímu posouzení plného textu pro ověření jejich způsobilosti. V této fázi bylo vyloučeno dalších 21 pramenů z důvodu nepřínosných nebo opakujících se informací. Konečným výběrem tak prošlo 65 relevantních zdrojů, které tvoří podklad pro tuto práci. Výsledný soubor zahrnuje odborné články a časopisy, technické specifikace z webových stránek výrobců, ostatní oborové elektronické zdroje, odborné knihy a relevantní technické či legislativní normy. Celý proces selekce je vizualizován formou PRISMA diagramu níže.

Prisma diagram



Obr. 2-1 PRISMA diagram

2.1.5 Užité metody zpracování dat

Pro efektivní správu, archivaci a následnou práci se všemi identifikovanými informačními prameny byl využit citační software Citace PRO. Tento nástroj umožnil vytvoření přehledné databáze a systematickou organizaci získaných podkladů. V rámci zpracování proběhla klasifikace zdrojů ve dvou rovinách. Primárně byly dokumenty roztríděny podle formy publikace na recenzované vědecké články, odborné knihy, webové stránky, a technické studie. Následně proběhlo tematické členění, které reflektovalo klíčové oblasti zájmu práce. Jednotlivé záznamy byly přiřazeny k okruhům, jako jsou navigační systémy, autonomie řízení, konstrukční řešení mobilních robotů, mobilita v terénu a provozní efektivita ve stavebním prostředí.

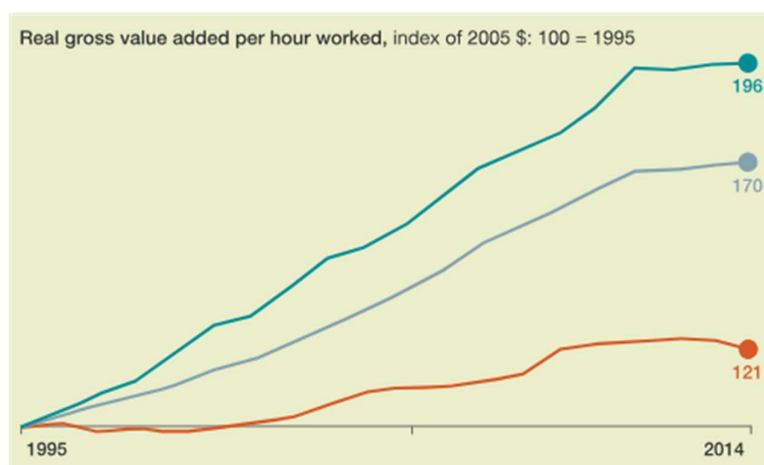
2.2 Motivační analýza

2.2.1 Automatizace stavebnictví

Stavební průmysl představuje jeden z nejdůležitějších pilířů globální ekonomiky, přesto se dlouhodobě potýká se strukturálními problémy, které brzdí jeho rozvoj. Zatímco jiná odvětví, jako je automobilový nebo elektrotechnický průmysl, prošla v posledních dekadách zásadní transformací směrem k plné automatizaci a digitalizaci, stavebnictví v adopci těchto technologií výrazně zaostává. Tradiční metody výstavby, které dominují po desetiletí, se stávají v kontextu moderních požadavků na rychlost, přesnost a udržitelnost neudržitelnými.[1]

Hlavním impulsem pro tuto transformaci je dlouhodobá stagnace produktivity práce. Podle analýz poradenské společnosti McKinsey & Company růst produktivity ve stavebnictví celosvětově výrazně zaostává za tempem růstu ve výrobním sektoru i za celkovou ekonomikou. Tento rozdíl je způsoben především vysokou mírou manuální práce, nedostatečnou standardizací procesů a fragmentací dodavatelských řetězců. Zatímco v továrním prostředí lze dosáhnout vysoké efektivity díky kontrolovaným podmínkám a opakovatelnosti úkonů, staveniště představuje nestrukturované a dynamické prostředí, kde je aplikace automatizace výrazně složitější.[2]

Globally, labor-productivity growth in **construction** lags far behind that of **manufacturing** or the total economy.

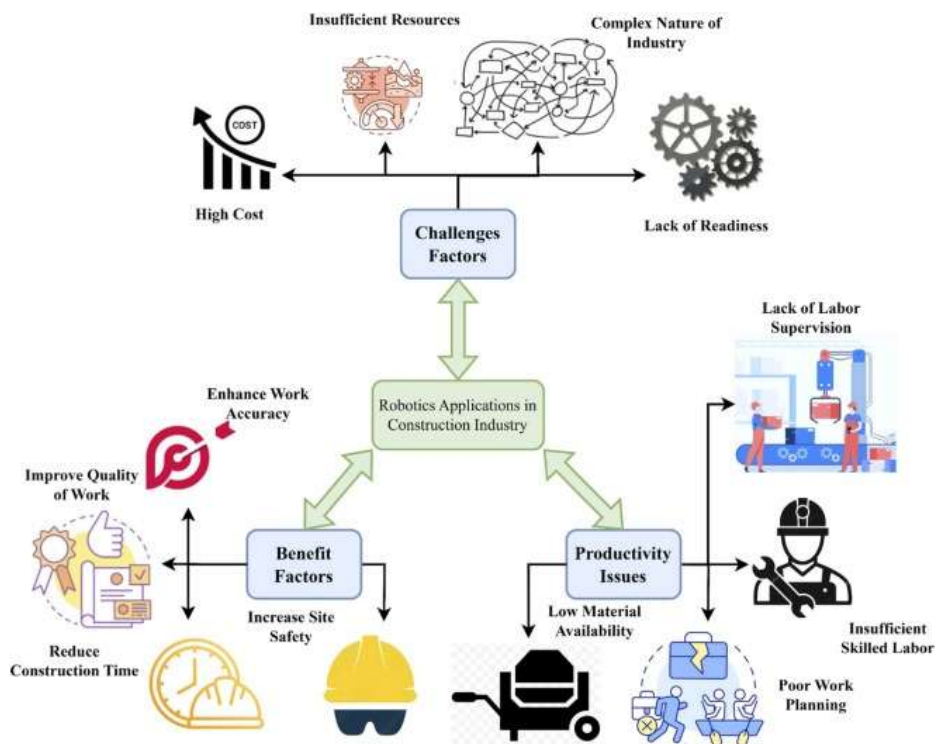


Obr. 2-2 Porovnání produktivity stavebnictví [2]

Zavádění autonomních mobilních robotů a automatizovaných systémů tak není pouze technologickým trendem, ale ekonomickou nutností. Robotizace nabízí potenciál nejen pro zrychlení fyzických procesů, jako je zděnění či přesun materiálu, ale také pro zpřesnění výstavby a redukci chybovosti, která je u manuálních metod nevyhnutelná. Implementace těchto technologií může zásadně změnit způsob, jakým jsou projekty plánovány a realizovány, a přinést do odvětví potřebnou transparentnost a prediktibilitu nákladů.[3]

Kromě ekonomických tlaků čelí stavebnictví bezprecedentní personální krizi. Nedostatek kvalifikované pracovní síly je v současnosti jedním z největších problémů, který omezuje kapacity stavebních firem po celém světě. Tento stav je důsledkem kombinace několika faktorů: stárnutí současné generace řemeslníků, nízký zájem mladé generace o fyzicky náročné profese a fluktuace pracovníků do jiných, méně náročných odvětví.[4]

V tomto kontextu se robotizace jeví jako logické řešení pro substituci chybějící lidské kapacity. Odborné studie naznačují, že nasazení robotů může efektivně nahradit pracovníky v úkonech, které nevyžadují kreativní myšlení, ale spíše fyzickou sílu a vytrvalost. Nejedná se přitom nutně o úplné nahrazení člověka strojem, ale o změnu struktury pracovních pozic. Roboti mohou převzít monotónní, opakující se a vyčerpávající úkoly, čímž umožní lidským pracovníkům soustředit se na odbornější činnosti s vyšší přidanou hodnotou.[5]



Obr. 2-3 Rámec využití autonomních robotů ve stavebnictví [4]

Tento posun směrem k automatizaci je podpořen i čtyřmi hlavními faktory, které motivují dodavatele k adopci mobilních robotů, a to zvýšení produktivity, vyšší přesnost, úspora nákladů a schopnost práce v náročných podmínkách. Autonomní systémy jsou schopny pracovat nepřetržitě bez potřeby přestávek, nepodléhají únavě a dokáží udržet konstantní tempo práce, což je s lidskými silami nedosažitelné.[6]

Bezpečnostní aspekty jsou dalším faktorem motivujícím k nasazení robotických systémů. Stavebnictví statisticky patří mezi nejrizikovější průmyslová odvětví. Podle údajů Eurostatu dochází na staveništích každoročně k tisícům pracovních úrazů, z nichž mnohé mají fatální následky. Nejčastějšími příčinami jsou pády z výšky, kolize s těžkou technikou, zasažení padajícími předměty či dlouhodobé zdravotní následky způsobené nadměrnou fyzickou zátěží.[7]

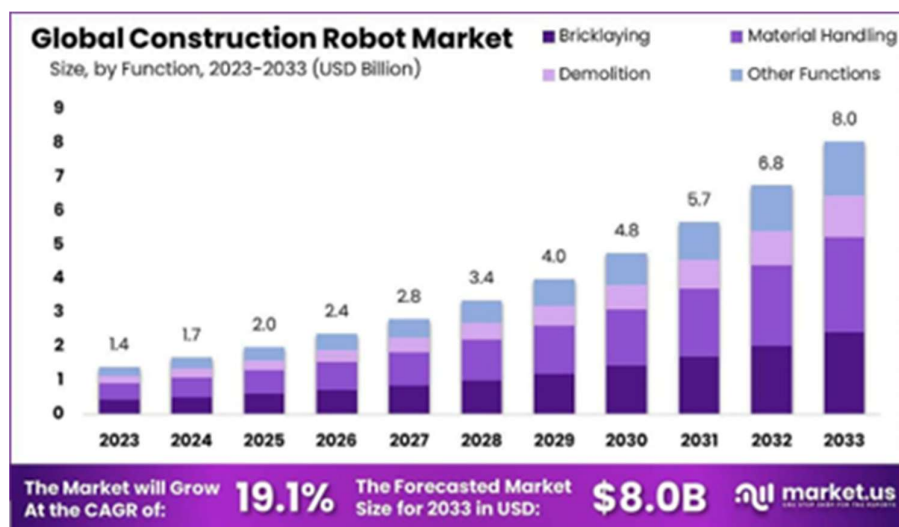
Robotizace zde přináší koncept tzv. „3D“ úloh – Dull, Dirty, Dangerous (nudné, špinavé a nebezpečné). Cílem je delegovat právě tyto činnosti na stroje. Autonomní roboti mohou operovat v zónách s vysokým rizikem, například při demolicích, v kontaminovaném prostředí nebo manipulovat s extrémně těžkými břemeny, aniž by bylo ohroženo lidské zdraví.[8]

Poslední významnou výzvou je propojení fyzické realizace s digitálním plánováním. Stavebnictví se masivně orientuje na využívání informačních modelů budov (BIM), avšak často naráží na nesoulad mezi digitálním modelem a realitou na stavbě. Autonomní roboti zde fungují jako fyzické rozhraní, které tento rozdíl překlenuje. Roboti dokáží autonomně skenovat staveniště a vytvářet přesné digitální mapy postupu prací, které jsou okamžitě porovnávány s BIM modelem.[9]

2.2.2 Analýza trhu

Analýza tržního prostředí indikuje, že nasazení autonomních mobilních robotů ve stavebnictví překročilo fázi experimentálního ověřování a vstupuje do etapy komerční expanze. Ekonomické predikce potvrzují, že tento sektor čeká v nadcházející dekádě masivní růst, hnaný potřebou automatizace a efektivity. Podle dostupných studií se očekává, že globální trh se stavebními roboty poroste složenou roční mírou růstu (CAGR) přibližně o 19,1 %. Pokud se tento trend udrží, objem trhu by měl do roku 2033 dosáhnout hodnoty přibližně 8 miliard USD. Tento dynamický nárůst reflektuje ochotu stavebních společností investovat do technologií, které slibují dlouhodobou úsporu provozních nákladů a řešení nedostatku pracovních kapacit.[10]

Růst trhu není rovnoměrný napříč všemi segmenty, ale je silně tažen specifickými aplikacemi. Zatímco v minulosti dominovaly trhu spíše stacionární robotická ramena pro prefabrikaci v halách, současný trend jednoznačně směřuje k mobilním řešením operujícím přímo na staveništi. Tento posun klade zcela nové nároky na konstrukci strojů, jejich autonomii a schopnost adaptace na nestrukturované prostředí.



Obr. 2-4 Analýza trhu se stavební robotikou [10]

Z hlediska funkčního využití lze trh autonomních stavebních robotů rozdělit do několika hlavních kategorií, přičemž každá vykazuje jinou dynamiku adopce. Největší podíl na trhu aktuálně zauímají roboti pro zemní práce a manipulaci s materiálem. Tato dominance je logická, protože přesun materiálu je činnost s nízkou přidanou hodnotou, vysokou fyzickou náročností a relativně snadnou algoritmizovatelností pohybu z bodu A do bodu B.[10] Významným segmentem jsou také roboti pro specifické stavební úkony, jako je zdění nebo demolice. Zde se uplatňují stroje schopné vysoké preciznosti nebo práce v nebezpečném prostředí. Následují lehčí, univerzální platformy, které slouží jako nosiče senzorů nebo menších manipulátorů a vynikají svou průchodností terénem.

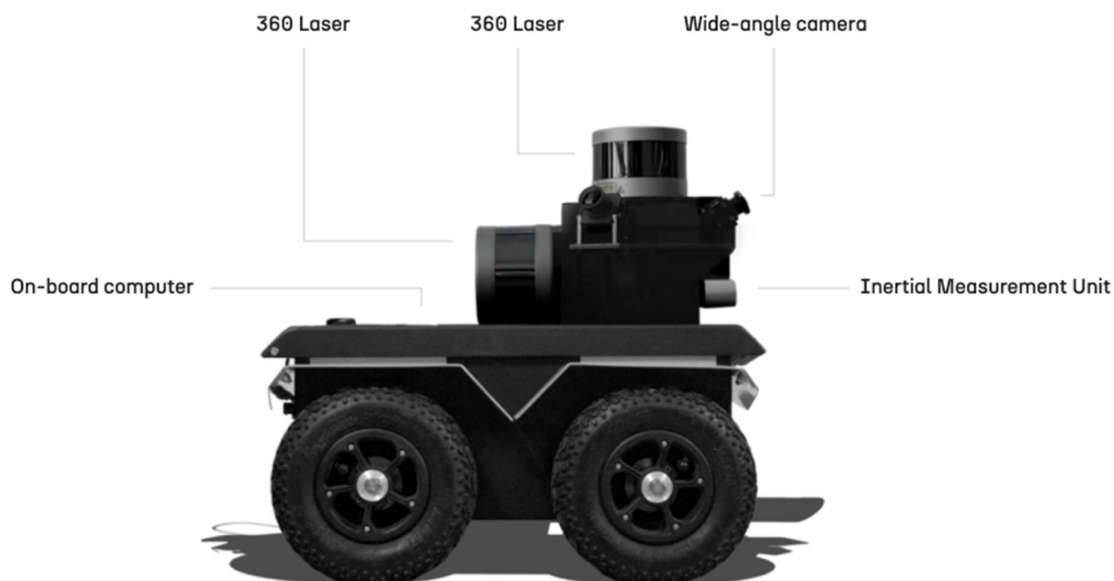
Zásadním trendem, který definuje současný vývoj a má přímý dopad na design nových zařízení, je odklon od jednoúčelových strojů směrem k multifunkčním a modulárním platformám. Tradiční přístup, kdy jeden stroj vykonává pouze jednu činnost (např. pouze vrtání), se ukazuje jako ekonomicky neefektivní pro menší a střední stavební projekty.[11]

2.3 Designerská analýza

Naska.AI Noether

Naska.AI se zaměřuje na automatizaci stavebního monitoringu. Jejich systém Noether reaguje na problém nedostatečné kontroly a chybovosti při realizaci staveb. Cílem zařízení není fyzická práce, ale role autonomního inspektora, který objektivně a pravidelně porovnává skutečný postup výstavby s digitálním modelem (BIM). Systém tak nahrazuje časově náročná manuální měření a poskytuje manažerům přesná data pro rozhodování.[12]

Základem systému je mobilní podvozek osazený výpočetní jednotkou a senzorickou věží. Pro navigaci a sběr dat využívá kombinaci přesného LiDARu a soustavy kamer. Klíčovou vlastností je schopnost autonomní lokalizace a mapování v dynamickém prostředí staveniště, kde se poloha překážek neustále mění. Robot samostatně projíždí určené zóny, skenuje prostor a data odesílá do cloudu, kde algoritmy umělé inteligence automaticky detekují odchylky od projektu.[12]



Obr. 2-5 Senzorické vybavení [12]

Design robota je přísně účelový a industriální. Morfologicky je rozdělen na nízké těžiště s pohonem a bateriemi, a vertikální nástavbu, která vynáší senzory do výšky. Toto konstrukční řešení zajišťuje, že robot „vidí“ lépe přes překážky, což je pro relevanci inspekce zásadní. Vizuální stránka je minimalistická, v tmavých tónech s výraznými bezpečnostními prvky a LED signalizací, která informuje okolí o aktuálním stavu stroje.



Obr. 2-6 Naska.AI Noether [12]

Noether představuje jedno z pokročilejších řešení pro digitalizaci. Jeho hlavním přínosem je schopnost odhalit chyby v rané fázi, čímž šetří náklady na předělvky. Z designérského hlediska však konstrukce s vyvýšenou senzorickou věží přináší určitá rizika, protože vyčnívající optika je v stísněném a proměnlivém prostředí staveniště náchylnější k mechanickému poškození při náhodné kolizi. Provozním limitem zůstává také průchodnost kolového podvozku v těžším terénu či na schodech, pro zpevněné povrchy a interiéry je však systém ideální.

Husarion Panther

Společnost Husarion vyvinula model Panther jako přímou odpověď na poptávku po odolné průmyslové platformě. Na rozdíl od subtilních laboratorních robotů je tento stroj od počátku konstruován pro nasazení v náročných venkovních podmínkách. Jde o pozemní vozidlo, jehož primárním účelem je sloužit jako univerzální nosič pro různé aplikace.

Panther je postaven na čtyřkolovém podvozku s pohonem 4x4, který využívá BLDC motory integrované přímo v nábojích kol. Kinematika je založena na smykovém řízení, což robotovi umožňuje otáčení na místě a vynikající manévrovatelnost v terénu. Klíčovou vlastností pro stavební praxi je vysoký stupeň krytí IP66, zaručující odolnost proti vodě a prachu. [13]

Zásadním funkčním prvkem jsou standardizované montážní kolejnice na horní ploše šasi. Tyto profily zajišťují systému mimořádnou modularitu, neboť umožňují snadnou integraci rozličného příslušenství bez nutnosti invazivních zásahů do konstrukce. Robot disponuje vysokou nosností až 80 kg, což v praxi znamená, že neslouží pouze jako nosič lehkých senzorů, ale dokáže transportovat i těžká robotická ramena, vrtné soupravy nebo stavební materiál. [13]



Obr. 2-7 Husarion Panther [13]

Design robota je definován přísnou účelností a tvarovou strohostí. Tělo tvoří jednoduchý, nízký kvádr, což zajišťuje nízké těžiště a stabilitu v náklonech. Vizualnímu zpracování dominuje výrazná červená barva. Toto barevné řešení zajišťuje vysokou viditelnost stroje v nepřehledném a zaprášeném prostředí staveniště. Morfologie je navržena tak, aby masivní terénní pneumatiky výrazně přesahovaly půdorys šasi. Kola tak přebírají funkci přirozených nárazníků a chrání tělo robota při kontaktu s překážkou. Povrch je hladký a kapotovaný s minimem výčnělků, což minimalizuje riziko zachycení o stavební suť.

Husarion Panther představuje ideální referenční platformu pro pohyb na hrubé stavbě. Jeho největší předností je kombinace mechanické odolnosti, vysoké nosnosti vzhledem k velikosti a modulárního systému uchycení, který z něj činí univerzálního pomocníka. Design, ačkoliv vizuálně jednoduchý, je plně funkční především díky terénní dostupnosti a vysokému stupni krytí.

AGILEX BUNKER PRO

Model Bunker Pro od společnosti AgileX Robotics představuje robustní mobilní platformu vyvinutou pro nasazení v náročných průmyslových podmínkách. Jeho koncepce reaguje na poptávku po autonomním zařízení, které dokáže operovat v těžkém terénu a zároveň transportovat značný náklad nebo nést rozměrné nástavby. Ve stavebnictví cílí tento robot na fáze hrubé stavby, kde je vyžadována extrémní průchodnost v kombinaci s vysokou užitnou hodnotou a odolností proti vnějším vlivům.

Technologickou dominantou stroje je výkonný pásový podvozek vybavený odpružením typu Christie. Tento systém výrazně zlepšuje tlumení nárazů a stabilitu při překonávání nerovností, což je kritické pro ochranu neseného nákladu či citlivé elektroniky. Robot zvládá stoupání až 30° a díky nulovému poloměru otáčení je extrémně obratný i ve stísněných prostorech. [14]

Zásadním parametrem je nosnost až 120 kg, která umožňuje robotu převážet stavební materiál nebo sloužit jako mobilní základna pro těžká robotická ramena. Celý systém je zapouzdřen s certifikací IP67, což zaručuje prachotěsnost a voděodolnost. Dlouhodobý provoz zajišťuje velkokapacitní baterie, přičemž robot podporuje standardní rozhraní (CAN, ROS) pro autonomní navigaci. [14]

Design modelu Bunker Pro se odklání od prosté utilitární „krabice“ směrem k moderní až agresivní estetice. Tvarové řešení je kompaktní, ale mohutné, s nízkým těžištěm, kterému dominují široké pásy s hlubokým dezénem. Horní část šasi je chráněna krytváním, které plynule přechází do bočních blatníků a vytváří celistvý, odolný dojem.



Obr. 2-8 AGILEX BUNKER PRO [14]

Funkčním prvkem horní plochy jsou integrované T-drážky, které zajišťují plnou modularitu a umožňují snadnou montáž různých příslušenství. Barevné provedení kombinuje matnou černou s kontrastními bílými panely. Ačkoliv tato kombinace působí vizuálně čistě a futuristicky, v kontextu stavebního prostředí se použití bílé barvy jeví jako nepraktické, neboť bude náchylné k viditelnému znečištění prachem a blátem.

Bunker Pro je v současnosti jedním z nejlepších adeptů na univerzální stavební podvozek pro exteriérové aplikace. Jeho hlavní předností je kombinace nosnosti a špičkové průchodnosti terénem díky odpruženým pásům. Krytí IP67 jej předurčuje pro nasazení v blátě a dešti. Design je moderní a funkční, ačkoliv zvolená barevnost bude vyžadovat častější údržbu.

Robotnik RB-FIQUUS

Model RB-FIQUUS od společnosti Robotnik Automation představuje autonomní platformu, která je navržena primárně pro logistiku v exteriérech. Hlavním účelem tohoto stroje je autonomní přeprava těžkých nákladů, čímž cílí na automatizaci toku materiálu ve velkých areálech, kde je potřeba efektivně přesouvat značné objemy bez zásahu člověka.

Technologickou dominantou tohoto modelu je jeho extrémní výkon v poměru k velikosti. Robot disponuje užitečnou nosností až 1000 kg, což z něj činí silný nástroj pro transport stavebního materiálu. Pohyb zajišťují čtyři nezávisle řízená kola, která umožňují všesměrový pohyb. Robot tak dokáže jet bokem nebo se otáčet na místě i s plným nákladem, což je klíčové pro manipulaci ve stísněných prostorech. Umístění veškeré elektroniky do stran umožňuje maximálně snížit ložnou plochu a nabídnout tak větší stabilitu nákladu. [15]

Pro nepřetržitý provoz je systém vybaven mechanismem pro snadnou a rychlou výměnu baterií. Významným technickým rysem je modularita a otevřená architektura, která umožňuje integraci doplňkového příslušenství. Robot tak může být volitelně osazen robotickým ramenem, což rozšiřuje jeho funkčnost o možnost aktivní manipulace s menšími břemeny, ačkoliv jeho primární rolí zůstává transport na ložné ploše. [15]

Z designérského hlediska působí RB-FIQUUS přísně funkčním, až neuceleným dojmem. Tvarově je definován svou ložnou plochou, která je však díky tomu jasně ohraničena. Zásadním nedostatkem vizuálního řešení je fakt, že prostor pro integraci příslušenství není nijak definován.



Obr. 2-9 Robotnik RB-FIQUUS [15]

Konstrukce postrádá jakoukoliv snahu o estetickou nebo integraci prvků do jednoho celku. Senzory, tlačítka i spoje jsou přiznané, což evokuje spíše fázi pokročilého vývojového prototypu než finálního komerčního produktu. Problematickým prvkem v kontextu exteriérového nasazení jsou také kola, jejichž malý průměr vizuálně narušuje proporce stroje a vzbuzuje pochybnosti o schopnosti překonávat terénní nerovnosti.

RB-FIQUUS je technologickým demonstrátorem síly a agility. Jeho nosnost 1000 kg a omni-pohyb jsou parametry, které by na stavbě našly obrovské uplatnění při logistice materiálu. Designérské zpracování je však pro drsné prostředí staveniště limitující. Otevřený vzhled bez dostatečného krytování a malá kola znamenají, že zatímco na zpevněném povrchu bude excelovat, v blátě a suti hrubé stavby by pravděpodobně rychle narazil na své limity.

AION ROBOTICS L4

Model L4 od americké společnosti AION Robotics představuje na rozdíl od předchozích „roverů“ stroj, který svou konstrukcí vychází z klasické terénní techniky pro přepravu osob a materiálu. Je navržen pro operace na rozsáhlých staveništích. Slouží jako těžký autonomní nosič, který kombinuje rychlost spalovacího či hybridního pohonu s robotickou inteligencí.

Technologicky se jedná o robustní platformu s pohonem 4x4 a spalovacím či hybridním motorem o výkonu 90 koní, což mu zajišťuje vytrvalost přes 24 hodin provozu, tudíž parametr, kterému čistě bateriové systémy nemohou konkurovat. Zásadním údajem je extrémní užitečná nosnost 907 kg. Stroj je tak schopen převážet plné palety materiálu, nebo jiné těžké příslušenství. [16]

Systém je postaven na otevřené architektuře podporující ROS a MavLink, což umožňuje integraci variabilních nástaveb. Horní i zadní část stroje je modulární a připravená pro montáž čehokoliv od standardní korby až po specializovaná robotická ramena či senzorické věže. [16]



Obr. 2-10 AION ROBOTICS L4 [16]

Design modelu L4 věrně kopíruje tvarosloví terénní čtyřkolky typu UTV. Ačkoliv tento přístup využívá osvědčenou mechaniku, nese s sebou i designová rizika. Tím hlavním je vysoké těžiště. Náklad a nástavby jsou umísťovány poměrně vysoko nad osy kol, což v kombinaci s měkkým terénním odpružením může při jízdě ve svahu vést k nebezpečným náklonům a snížené stabilitě oproti plochým platformám.

Problematické je rovněž zvolené barevné řešení. Výrobce prezentuje stroj v čistě bílé barvě, což je pro stavební prostředí nevhodné. V podmínkách prachu a bláta bude takový povrch okamžitě znečištěn. Vizuálně stroj také málo komunikuje svou autonomní povahu, protože vypadá jako běžné vozidlo bez řidiče, což může vést ke zmatení personálu na stavbě.

AION L4 těží z výhod koncepce čtyřkolky, tudíž rychlosti a průchodnosti. Designérským i funkčním úskalím pro stavební praxi je však vysoké těžiště. Jelikož je náklad umístěn vysoko nad osy kol, při plném zatížení a pohybu v náklonu hrozí riziko převrácení. Stroj tak vyžaduje pokročilé algoritmy pro stabilizaci jízdy. Vizualní stránka sice působí robustně, ale pro člověka může být nečitelná, což vyžaduje doplnění o výraznou světelnou signalizaci autonomního provozu.

BAUBOT MRS15

Rakouská společnost Baubot přináší s modelem MRS15 zásadní posun do stavební robotiky. Zatímco většina konkurenčních strojů slouží pouze k pasivnímu sběru dat nebo transportu, MRS15 je navržen jako aktivní multifunkční dělník. Cílem tohoto systému je automatizovat nebezpečné, namáhavé nebo monotónní fyzické úkony přímo na staveništi. Robot tak není jednoúčelovým strojem, ale univerzální platformou, která se mění v závislosti na připojeném nástroji.

Jádrem systému je propojení mobilního pásového podvozku a přesného průmyslového manipulátoru. Klíčovou vlastností je modularita. Díky standardizovanému upínání koncového nástroje může robot vykonávat širokou škálu činností od 3D tisku betonu, přes broušení stěn, vrtání kotevních otvorů, řezání až po zdění či manipulaci s materiálem. [17]

Provoz stroje je úzce spjat s metodikou BIM. Robot využívá digitální model stavby k přesné navigaci a lokalizaci pracovních úkonů s milimetrovou přesností, což eliminuje nutnost ručního rozměřování. K vysoké přesnosti přispívá taky možnost zapatkování robota, díky čemuž je dosažena vysoká stabilita. Kromě plně autonomního režimu nabízí systém i možnost manuálního dálkového ovládání, což je v nepředvídatelném prostředí staveniště nezbytná pojistka pro řešení nestandardních situací nebo přesun stroje. [17]



Obr. 2-11 BAUBOT MRS15 [17]

Z designérského hlediska představuje Baubot MRS15 jeden z nejzdařilejších příkladů v oboru. Na rozdíl od mnoha konkurentů, kteří působí jako "podvozek s přišroubovaným ramenem", je MRS15 navržen jako jeden ucelený estetický objekt. Tvarování je čisté, s plynulými přechody mezi pásovou základnou a nástavbou ramene. Kapotáž elegantně ukrývá většinu technických prvků, což stroji dodává kompaktní a futuristický vzhled, evokující pokročilou technologii budoucnosti.

Problematickým aspektem tohoto jinak špičkového designu je však opět barevnost. Výrobce prezentuje robota v sterilní bílé barvě. Ačkoliv to na propagačních materiálech vypadá efektně, v reálném provozu to bude vyžadovat neustálé čištění.

Baubot MRS15 je ukázkou toho, jak má vypadat moderní stavební robot. Jeho síla netkví v jedné funkci, ale v univerzálnosti. Designově jde o velmi vyspělý produkt, který vzbuzuje důvěru a působí profesionálně. Pokud pomineme nepraktickou bílou barvu, je jeho tvarová čistota a zakrytování mechanismů přesně tím směrem, kterým by se měl design stavebních strojů ubírat pro zvýšení bezpečnosti a akceptace lidmi na stavbě.

HILTI JAIBOT

Jaibot od giganta Hilti představuje specifický přístup k automatizaci, který vychází z potřeb řemeslníků, nikoliv jen z možností robotiky. Jde o poloautonomní mobilní systém určený primárně pro jednu z nejnamáhavějších činností na stavbě, a to vrtání kotevních otvorů do stropů. Robot nevznikl proto, aby lidi nahradil, ale aby převzal ergonomicky nejnáročnější úkon práce nad hlavou, který vede k únavě a zdravotním problémům pracovníků.

Technologicky je Jaibot koncipován jako tzv. BIM-to-Field zařízení. Na základě digitálního modelu stavby se robot v prostoru lokalizuje a automaticky vrtá otvory s vysokou přesností. Systém je však pouze poloautonomní. Robot se nedokáže sám pohybovat mezi složitými úseky stavby, takže jej operátor musí na místo určení navést dálkovým ovládáním. Až v pracovní zóně přebírá robot iniciativu a vykonává vrtací sekvenci. [18]

Konstrukčně jde o pásový podvozek nesoucí hydraulický zdvih, na jehož vrcholu operuje robotické rameno s vrtačkou a integrovaným odsáváním prachu. Systém je plně akumulátorový, což zajišťuje bezkabelový provoz po dobu cca 8 hodin. [18]

Design Jaibota nezapře rukopis výrobce průmyslového nářadí. Ačkoliv se tvarové řešení snaží o jistou komplexitu a dynamiku pomocí zkosených hran a prolisů, ve výsledku působí robot stále poměrně krabicovitým a masivním dojmem.



Obr. 2-12 HILTI JAIBOT [18]

Velmi pozitivním prvkem designu je však barevné řešení. Ikonická Hilti červená v kombinaci s černými prvky nejenže posiluje identitu značky, ale v prostředí staveniště funguje jako vynikající bezpečnostní prvek. Robot je díky tomu vysoce viditelný i v šeru či prachu, což je oproti bílým nebo šedým konkurentům značná výhoda.

Jaibot je mistrem jedné disciplíny. V tom, co dělá, je bezkonkurenční a reálně šetří zdraví pracovníků. Jeho největším limitem je však jeho úzká specializace. Na rozdíl od univerzálních ramen je konstrukce Jaibota optimalizována pouze pro tento jediný úkon. To může bránit využití jeho plného potenciálu. Pokud zrovna není co vrtat, stroj stojí ladem, což snižuje návratnost investice.

MILREM ROBOTICS THEMIS

Společnost Milrem Robotics vyvinula platformu THeMIS původně pro potřeby obranného průmyslu, ale její unikátní vlastnosti ji rychle kvalifikovaly i pro náročné civilní aplikace. Jde o robustní UGV, které není koncipováno jako jednoúčelový stroj, ale jako univerzální nosič pro extrémní terén. Jeho hlavním úkolem na staveništi by byla logistika těžkého materiálu.

THeMIS přichází s revolučním konstrukčním řešením. Na rozdíl od klasických robotů, kteří mají elektroniku a pohon v trupu, THeMIS přesouvá veškeré technické komponenty do dvou bočních pásových modulů. Prostor mezi pásy tak zůstává zcela volný a tvoří nízko položenou, otevřenou nákladovou platformu. Toto uspořádání zajišťuje stroji extrémně nízké těžiště a stabilitu. [19]

Díky této architektuře nabízí robot enormní užitečnou nosnost až 1200 kg, což je hodnota srovnatelná s jeho vlastní hmotností. Modularita systému je špičková. Na středovou plošinu lze snadno upevnit transportní klece, hydraulické ruky nebo senzorické věže, a to pouhým přišroubováním, bez zásahu do hnacího ústrojí. Pohon je řešen buď jako diesel-elektrický hybrid, který zaručuje dlouhou vytrvalost až 15 hodin, nebo jako plně elektrický s provozní dobou 1,5 hodiny na jedno nabití. [19]



Obr. 2-13 MILREM ROBOTICS THEMIS [20]

Design robota je definován jeho unikátní „dvou-trupou“ architekturou. Vizuálně působí jako dva masivní pásy spojené subtilním mostem. Tvarosloví je zde podřízeno funkčnosti a odolnosti. Nenajdeme zde žádné zbytečné křivky či estetické kapotování. Vše je krytováno kovovými plechy s přiznanými šrouby, což usnadňuje servis v polních podmínkách.

Ačkoliv je design jednoduchý, působí velmi koherentním a profesionálním dojmem. Vizuální jazyk jasně komunikuje sílu a stabilitu. Barevné řešení tento dojem podporuje a na rozdíl od bílé barvy na něm není vidět provozní znečištění. Je to design, který jasně komunikuje, že se jedná o pracovní nástroj.

THEMIS představuje vrcholnou třídu v kategorii pásových nosičů. Jeho konstrukční řešení s otevřeným středem je pro manipulaci s těžkým stavebním materiálem výhodné, protože udržuje těžiště nízko u země. Z hlediska designu jde o perfektní příklad formy následující funkci. Díky svým rozměrům, nosnosti a dostupnosti není vhodný pro běžné interiéry, ale spíše pro logistiku na hrubé stavbě, zakládání staveb nebo liniové stavitelství.

VOLVO TA15

Model TA15 od švédského giganta Volvo Construction Equipment reprezentuje vstup těžké mechanizace do éry plné autonomie. Stroj je součástí komplexního transportního řešení TARA, které cílí na radikální snížení emisí a zvýšení efektivity v lomech a na rozsáhlých staveništích. Na rozdíl od předchozích univerzálních robotů je TA15 úzce specializovaný jednoúčelový stroj, a to autonomní elektrický dumper. Jeho vznik je odpovědí na potřebu nepřetržitého cyklického transportu obrovských objemů materiálu bez nutnosti lidské obsluhy.

Technologickým základem je plně elektrický pohon s bateriovým úložištěm, který stroji zajišťuje nulové lokální emise a nízkou hlučnost. Zásadním parametrem je obrovská užitečná nosnost 15 tun, což tento stroj řadí do zcela jiné váhové kategorie než všechny doposud zmiňované roboty. [20]

Navigace spoléhá na kombinaci GNSS, Lidaru a radaru, což stroji umožňuje bezpečný pohyb po nepevných cestách lomu. TA15 není navržen jako samostatný prvek, ale jako součást flotily, kdy spolu stroje komunikují přes cloud a automaticky se řadí do konvojů pro maximální efektivitu nakládky a vykládky. Systém zahrnuje i automatické rychlonabíjecí stanice, které dumpery navštěvují v průběhu pracovního cyklu. [20; 21]



Obr. 2-14 VOLVO TA15 [21]

Design TA15 je ukázkou průmyslového designu, který byl v roce 2020 oceněn prestižní cenou Red Dot Award: Product Design [20]. Tvarosloví stroje se jasně inspiroje klasickými kloubovými dumpery, což zajišťuje okamžitou rozpoznatelnost jeho funkce. Inovativním zásahem je však úplná absence kabiny řidiče.

Tento designový krok vysílá jasný a srozumitelný signál o autonomní povaze zařízení. Místo kabiny je přední část zakončena elegantním, aerodynamickým profilem s integrovanými senzory a světelnou signalizací, která komunikuje stav stroje okolí. Barevné řešení kombinuje tradiční žlutou a šedou barvu Volvo s moderními LED prvky. Výsledkem je design, který působí futuristicky, ale zároveň důvěryhodně a robustně, čímž dokonale propojuje estetickou stránku s tou přísně funkční.

Volvo TA15 je v současnosti největší zástupce autonomní logistiky materiálu. Jeho přínos je omezen výhradně na velká staveniště, kde se přemísťují tisíce tun materiálu. Pro běžnou pozemní stavbu je téměř nepoužitelný. Z designérského hlediska ukazuje, že autonomní stroj nemusí vypadat jako krabice, ale může si zachovat vizuální identitu značky a přitom inovativně pracovat s tvaroslovím pro zdůraznění nové technologie.

2.4 Technická analýza

Tato kapitola tvoří, v návaznosti na předchozí designérskou rešerši, druhý stěžejní pilíř teoretické části práce. Jejím primárním účelem je provést detailní technickou dekompozici autonomního robotického systému a kriticky zhodnotit jednotlivé konstrukční prvky, které podmiňují jeho použitelnost v reálném provozu. Vzhledem k tomu, že specifickým stavebním prostředím je nestrukturovaný a náročný terén, bude úvodní část věnována analýze podvozkových platform.

Následně se text zaměří na pohonnou jednotku a oblast energetického managementu, kde budou diskutovány technologie moderních akumulátorů a strategie nabíjení vhodné pro zajištění dlouhodobého autonomního provozu bez nutnosti lidského zásahu. Stranou nezůstane ani senzorická výbava a výpočetní hardware pro vnímání okolí, které jsou nezbytné pro bezpečnou navigaci a lokalizaci v prostoru. Veškeré technické parametry budou posuzovány z pohledu odolnosti a spolehlivosti v podmínkách staveniště, s cílem definovat optimální technologický základ pro následný autorský návrh robota.

2.4.1 Podvozek

Podvozek představuje klíčový subsystém každého mobilního robota, neboť tvoří fyzické rozhraní mezi strojem a terénem. V kontextu stavebního prostředí, které je charakteristické svou nestrukturovaností, proměnlivou adhezí a výskytem překážek, je volba vhodného systému kritickým faktorem určujícím celkovou použitelnost stroje. Zatímco v průmyslových halách je prioritou přesnost a rychlost na rovném povrchu, na staveništi je klíčovým parametrem průchodnost terénem, stabilita a schopnost efektivního přenosu trakční síly na podložku. Tato podkapitola se proto zaměřuje na analýzu a srovnání relevantních koncepcí podvozkových platforem a zkoumá mechanismy, které jsou nezbytné pro zajištění mobility v náročných podmínkách.

Kolové podvozky

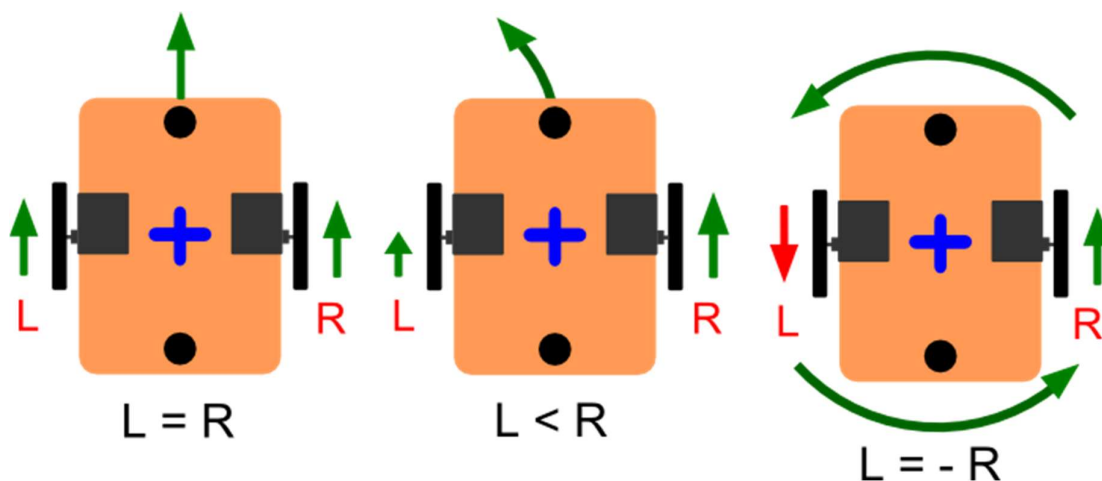
Kolové podvozky představují v současné mobilní robotice nejrozšířenější a technologicky nejvyspělejší způsob lokomoce. Jejich dominance v průmyslových i servisních aplikacích vyplývá z kombinace mechanické jednoduchosti, nízkých výrobních nákladů a snadné implementace řídicích algoritmů ve srovnání s pásovými či kráčejičnými mechanismy. Kolové systémy dosahují nejvyšší energetické účinnosti na rovném a pevném povrchu, kde je valivý odpor minimální a stabilita vozidla je snadno zajistitelná statickým rozložením kol. Je však nutné zdůraznit, že tato efektivita je vykoupena sníženou průchodností v náročném terénu. Zatímco pásové podvozky rozdělují hmotnost na velkou plochu, kola mají menší kontaktní plochu, což může vést k problémům se stabilitou a trakcí na měkkém, sypkém nebo kamenitém podloží, které je pro prostředí staveniště typické. [22]

Při návrhu autonomního stavebního stroje je volba konkrétní konfigurace kol kritickým rozhodnutím, které ovlivňuje nejen manévrovací, ale také celkovou energetickou bilanci a složitost řízení. V praxi se setkáváme s několika základními typy kol, jako jsou pevná kola s jedním stupněm volnosti, všesměrová kola se třemi stupni volnosti nebo kulová kola, přičemž každé řešení přináší specifické výhody i omezení. Pro stavební robotiku jsou nejrelevantnější tři hlavní kinematické koncepce: diferenciální řízení, Ackermannovo řízení a všesměrový pohyb.

Diferenciální řízení je nejčastější konfigurací u menších a středních terénních robotů. V odborné literatuře a u vícekolových platforem často označované jako smykové. Tento princip je založen na nezávislém ovládání úhlových rychlostí kol na levé a pravé straně vozidla, přičemž všechna kola jsou pevně spojena s rámem a nemají možnost natáčení kolem svislé osy [23]. Změna směru jízdy je dosažena vytvořením rozdílu rychlostí mezi levou a pravou stranou. Pokud se kola na jedné straně otáčejí opačným směrem než na druhé, robot je schopen otáčet se kolem své geometrické osy a dosáhnout nulového poloměru otáčení. Tato vlastnost je v stísněných prostorech nedocenitelná. [22]

Ačkoliv je toto řešení mechanicky robustní a spolehlivé díky absenci složitých mechanismů řízení náprav, jeho fyzikální podstata přináší značné nevýhody. Smykové řízení je energeticky velmi neefektivní, zejména na deformovatelném povrchu. Při zatáčení nedochází k čistému odvalování, ale kola musí po povrchu klouzat. Tento prokluz generuje značné smykové napětí v kontaktní ploše mezi pneumatikou a terénem, což vede k vysokým energetickým ztrátám v důsledku tření. Experimentální měření a modely založené na terramechanice ukazují, že spotřeba energie při smykovém otáčení je násobně vyšší než při přímé jízdě, přičemž tento nárůst je dán nutností překonávat boční odporové síly a deformovat podloží. [23]

Dalším kritickým aspektem je vliv na přesnost lokalizace. U autonomních robotů se často využívá metoda odometrie (výpočet polohy na základě otáček kol). U smykového řízení je však vztah mezi otáčkami kol a uraženou vzdáleností nelineární a silně závislý na vlastnostech terénu. Vzhledem k velkému prokluzu během otáčení je přesný střed rotace obtížně predikovatelný. To vnáší do navigačního systému kumulativní chybu, kterou je nutné kompenzovat pomocí externích senzorů, jako jsou inerciální jednotky nebo vizuální odometrie. [22]



Obr. 2-15 The diagram of operation of differential drive [24]

Ackermannovo řízení využívané pro těžší logistické roboty a stroje určené pro rychlé přesuny na delší vzdálenosti, je standardem v automobilovém průmyslu. Geometrie tohoto podvozku zajišťuje, že se osy všech kol při zatáčení protínají v jednom bodě, což umožňuje čisté odvalování pneumatik bez bočního prokluzu. [22]

Z energetického hlediska představuje tato konfigurace nejefektivnější řešení. Studie porovnávající pásové a kolové systémy potvrzují, že vozidla s Ackermannovým řízením mají výrazně nižší valivý odpor a vnitřní ztráty v pohonném ústrojí než smykem řízené stroje, protože nedochází k energeticky náročnému deformování povrchu smykem. To se pozitivně projevuje na dojezdu robota na jedno nabití a na životnosti pneumatik, které nejsou vystaveny tak agresivnímu opotřebení. [23]

Hlavním limitem této koncepce je tzv. neholonomní omezení pohybu. Robot se nemůže pohybovat do strany ani se otočit na místě; jeho poloměr otáčení je omezen maximálním úhlem natočení předních kol. To v praxi znamená, že pro manévrování v úzkých chodbách nebo pro přesné najetí k nákladu musí robot provádět složité manévry, což klade vyšší nároky na algoritmy plánování trajektorie. Z hlediska stability je však toto řešení velmi výhodné. Protože je robot obvykle navržen tak, aby všechna kola byla neustále v kontaktu se zemí, postačují tři kola pro statickou stabilitu, ačkoliv u čtyřkolových podvozků je nezbytný systém odpružení pro vyrovnávání nerovností terénu. [22]

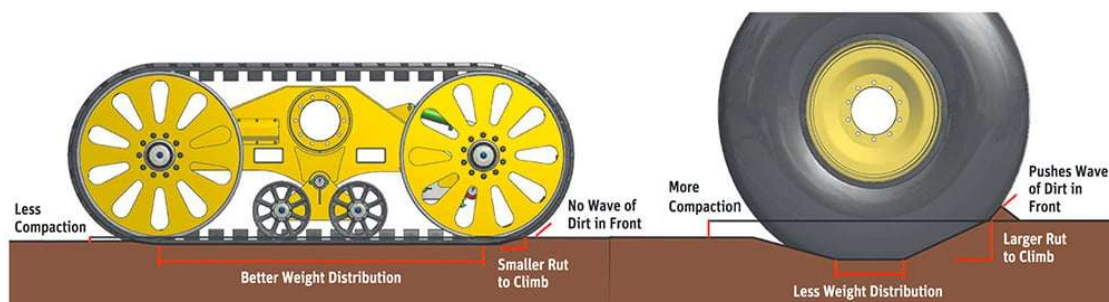
Všesměrová kola jsou specifickou kategorií, která se snaží kombinovat výhody manévrovatelnosti a mobility. Mecanum kolo se skládá z náboje, po jehož obvodu jsou umístěny volně otočné válečky svírající s osou kola úhel 45° . Kombinací rotace čtyř takových kol lze dosáhnout pohybu vektoru výsledné síly libovolným směrem, což robotovi umožňuje pohybovat se bokem, otáčet se na místě nebo jet diagonálně bez změny orientace trupu. [22]

Ačkoliv je tato kinematika z teoretického hlediska pro manipulaci v omezeném prostoru ideální, pro stavební robotiku je v praxi často nevhodná. Jak uvádí studie, všesměrová kola mají velmi špatné vlastnosti při překonávání překážek jako jsou kameny, kabely nebo prahy. Malý průměr válečků způsobuje, že se kolo zasekává i na menších nerovnostech, a systém je náchylný k vibracím. V prostředí stavenišť, které je plné prachu, bláta a suti, navíc hrozí zanesení ložisek válečků nečistotami. Pokud se válečky zablokují, kolo ztrácí svou všesměrovou funkci a chová se jako běžné kolo s velmi malou styčnou plochou a špatnou trakcí. Z těchto důvodů je tato technologie vyhrazena primárně pro interiérové aplikace na rovných průmyslových podlahách a pro terénní stavební roboty se neuplatňuje. [22]

Pásové podvozky

Pásové podvozky představují v oblasti mobilní robotiky a těžkého průmyslu standardní řešení pro pohyb v náročném a nestrukturovaném prostředí. Na rozdíl od kolových systémů, které spoléhají na diskrétní kontaktní body, využívají pásové mechanismy kontinuální pás, který maximalizuje styčnou plochu s terénem. Tato koncepce je klíčová zejména ve stavebnictví, kde se stroje často pohybují po materiálech s nízkou únosností, jako je čerstvá navážka, bláto, písek nebo sypká suť. Zatímco kolový podvozek by v takových podmínkách riskoval uvíznutí, pásový podvozek zajišťuje mobilitu díky radikálně odlišné distribuci hmotnosti.

Klíčovou fyzikální veličinou, která definuje nadřazenost pásů v terénu, je měrný tlak na půdu. Díky rozložení celkové hmotnosti robota na velkou plochu pásu dochází k výraznému snížení tlaku na čtvereční centimetr podloží. Tento jev, v terramechanice označovaný jako flotation, zabraňuje boření stroje do měkkého povrchu. Zatímco kolo se v měkkém terénu proboří a musí neustále překonávat val materiálu, který tlačí před sebou, pás zůstává na povrchu. To vede k efektivnějšímu přenosu trakční síly, protože smykové napětí je distribuováno podél celé kontaktní délky pásu, nikoliv koncentrováno do jednoho bodu. [23]



Obr. 2-16 The Benefits of Tracks vs Tires [25]

Z hlediska řízení využívají pásové podvozky téměř výhradně princip diferenciálního řízení. Změna směru jízdy je realizována rozdílem rychlostí pásů, což na pevném povrchu vede k vysokému tření. Je nutné přiznat, že energetická náročnost pohybu pásového robota je na tvrdém podkladu vyšší než u kolového, jelikož motor musí překonávat značné vnitřní mechanické odpory v čepech pásu a tření při smýkání do zatáčky. Nicméně v kontextu stavebního stroje je tato nevýhoda vyvážena operačními schopnostmi, které kolové platformy nemohou nabídnout. [22]

Na základě studií lze identifikovat specifické výhody pásových systémů, které přímo podporují jejich volbu pro autonomní stavební roboty. Primární předností je schopnost operovat na měkkém, poddajném a nepravidelném terénu, kde kola selhávají. Díky velké kontaktní ploše vykazují pásy vynikající trakci na blátě a písku, což je pro staveniště, která často nemají zpevněné komunikace, zásadní. Kontinuální pásy jsou navíc extrémně robustní vůči rázům a nárazům, což zajišťuje mechanickou odolnost při přejíždění suti nebo ostrých kamenů, kde by hrozilo poškození pneumatik. [26]

Dalším významným benefitem je stabilita a překonávání překážek. Pásové podvozky, zejména ty s kontinuálními pásy, mají přirozeně nízko položené těžiště, což zvyšuje stabilitu stroje při práci ve svahu nebo při manipulaci s břemeny. Studie uvádí, že pásová lokomoce je ideálním kompromisem mezi rychlostí kol a průchodností kráčejících robotů. Pásové dokáží překlenout negativní překážky jako jsou výkopy či díry, do kterých by kolo zapadlo. Gumové pásy vybavené výstupky navíc umožňují efektivní zachycení na nerovnostech, čímž zvyšují schopnost robota šplhat přes překážky a pohybovat se v náročném, nestrukturovaném prostředí. Ačkoliv jsou pásové systémy pomalejší než kolové, jejich mobilita v nestrukturovaném prostředí je výrazně vyšší, což je pro autonomní stavební stroje prioritní parametr. [26]

Odpružení

Při návrhu autonomního robotického systému pro stavební aplikace je systém odpružení často mylně považován za prvek, jehož primárním účelem je komfort. V kontextu bezosádkové robotiky však odpružení plní dvě zcela odlišné, avšak kritické funkce. Ochranu citlivé sensoriky a maximalizaci trakce. Stavební prostředí je charakteristické vysokou mírou nerovností, výskytem sutí a dynamicky se měnícím profilem terénu. Pro dosažení mobility na takovém terénu se musí robot rychle adaptovat a reagovat na nerovnosti, k čemuž slouží právě systém zavěšení. Jízda bez adekvátního tlumení rázů generuje vysokofrekvenční vibrace, které mohou degradovat data z inerciálních jednotek a způsobovat šum v mračnu bodů z LiDARu, což vede k chybám v lokalizaci a mapování. Druhým faktorem je udržení kontaktu podvozku s povrchem. Pokud podvozek nedokáže kopírovat terén, dochází u tuhých konstrukcí ke ztrátě kontaktu hnacích elementů s podložkou, což vede k prokluzu.

Odpružení kolových podvozků nabízí tři základní přístupy k řešení: pevné, pasivní a aktivní zavěšení. Nejjednodušší variantou je pevné zavěšení, kde jsou osy kol spojeny přímo s rámem robota. Toto řešení je konstrukčně jednoduché a levné, avšak pro členitý terén nevhodné. Při přejezdu nerovnosti se jedno nebo více kol může ocitnout ve vzduchu, čímž robot ztrácí trakční sílu a stabilitu, což je kritické zejména při manévrování na sypkém podkladu. Pro roboty operující v náročném terénu je proto nezbytné použít systémy s vysokou mírou tlumení nebo mechanismy, které zajišťují neustálý kontakt kol s povrchem. [27]

Specifickým a vysoce efektivním řešením pro terénní roboty je pasivní systém zavěšení typu Rocker-Bogie, známý především z planetárních vozítek. Tento mechanismus nepoužívá pružiny, ale soustavu vahadel spojených diferenciálem. Kinematika systému zajišťuje, že při nájezdu jednoho kola na překážku je váha rovnoměrně rozložena na ostatní kola, přičemž náklon trupu robota je redukován. To zajišťuje, že všech šest kol je neustále v kontaktu s povrchem i při překonávání překážek větších, než je průměr kola, což je pro stabilitu klíčové. [27]

U **odpružení pásových podvozků** je problematika odlišná, jelikož pás sám o sobě funguje jako určitý tlumicí element díky své elasticitě. U menších stavebních a inspekčních robotů často převládá pevná konstrukce, kde jsou vodící a pojezdová kola uchycena napevno k bočnímu rámu. Výhodou je mechanická jednoduchost, avšak toto řešení má své limity. Pevný podvozek trpí v nerovném terénu výraznými fluktuacemi polohy trupu a problémem zvaným „heading deflection“, kdy vibrace a nárazy způsobují nechtěné vychýlení robota z kurzu. To klade zvýšené nároky na řídicí algoritmy pro kompenzaci směru. [28]

Jako efektivnější alternativa se pro náročný terén jeví pasivní odpružení. Experimentální výsledky potvrzují, že toto řešení výrazně zvyšuje průchodnost a stabilitu kontaktu pásu s terénem. Systém umožňuje, aby se pásy nezávisle přizpůsobovaly terénu, čímž se minimalizuje riziko převrácení a zajišťuje plynulejší jízdu přes překážky. Odpružený podvozek tak vykazuje lepší schopnost překonávat překážky než pevná varianta, což je pro autonomní stavební stroj zásadní výhoda. [28]



Obr. 2-17 double oscillating bogie suspension [29]

Stabilita a těžiště je limitujícím faktorem bezpečnosti. Při návrhu je nutné zohlednit nejen statickou stabilitu na rovině, ale především dynamickou stabilitu při výjezdu do svahu nebo při akceleraci. Pásové podvozky mají v tomto ohledu přirozenou výhodu, jelikož těžké komponenty pohonu jsou umístěny nízko mezi pásy, což posouvá těžiště blíže k zemi. Použití odpružených podvozků dále zvyšuje dynamickou stabilitu tím, že absorbuje energii rázů, která by jinak mohla vést k destabilizaci nebo převrácení stroje. [26]

Nosná konstrukce

Podvozek zajišťující trakci musí být pevně spojen s nosnou strukturou stroje, která přenáší dynamické síly z terénu a chrání palubní systémy. Nosné konstrukce lze z hlediska strukturálního návrhu rozdělit do pěti hlavních kategorií. Při návrhu autonomních terénních robotů mají tyto koncepce následující specifika:

Žebřinový rám představuje klasickou konstrukci tvořenou dvěma masivními podélníky spojenými příčkami. U těžkých stavebních robotů jde o nejpoužívanější řešení, které extrémně dobře snáší vysoké namáhání. Hlavní výhodou pro autonomní řízení je možnost uchycení senzoriky a počítačů přes silentbloky, což dokonale izoluje citlivý hardware od hrubých vibrací podvozku.[30]

Prostorový rám je svařen ze soustavy trubek nebo profilů do podoby pevné 3D klece. Vyniká vysokou torzní tuhostí při zachování nízké celkové hmotnosti. U středně velkých a terénních robotů se využívá s oblibou, protože trubková struktura přirozeně funguje jako ochranný exoskelet pro palubní elektroniku.[30]

Torzní skříň využívá jako hlavní nosný prvek centrální uzavřený profil, který extrémně dobře odolává kroucení. Toto řešení je ideální pro roboty v nejtěžším terénu, jelikož umožňuje výkyvné uložení náprav. Stroj tak dokáže neustále kopírovat nerovnosti bez toho, aby se kroutilo samotné tělo robota nesoucí kalibrované navigační senzory.[30]

Samonosná konstrukce postrádá samostatný rám, protože nosnou funkci plní samotný vnější obal nebo strukturální vana stroje. Ačkoliv toto řešení radikálně snižuje hmotnost, pro těžkou venkovní robotiku je spíše nevhodné. Tuhá skořepina totiž přenáší veškeré rázy od terénu přímo k palubním počítačům a senzorům.[30]

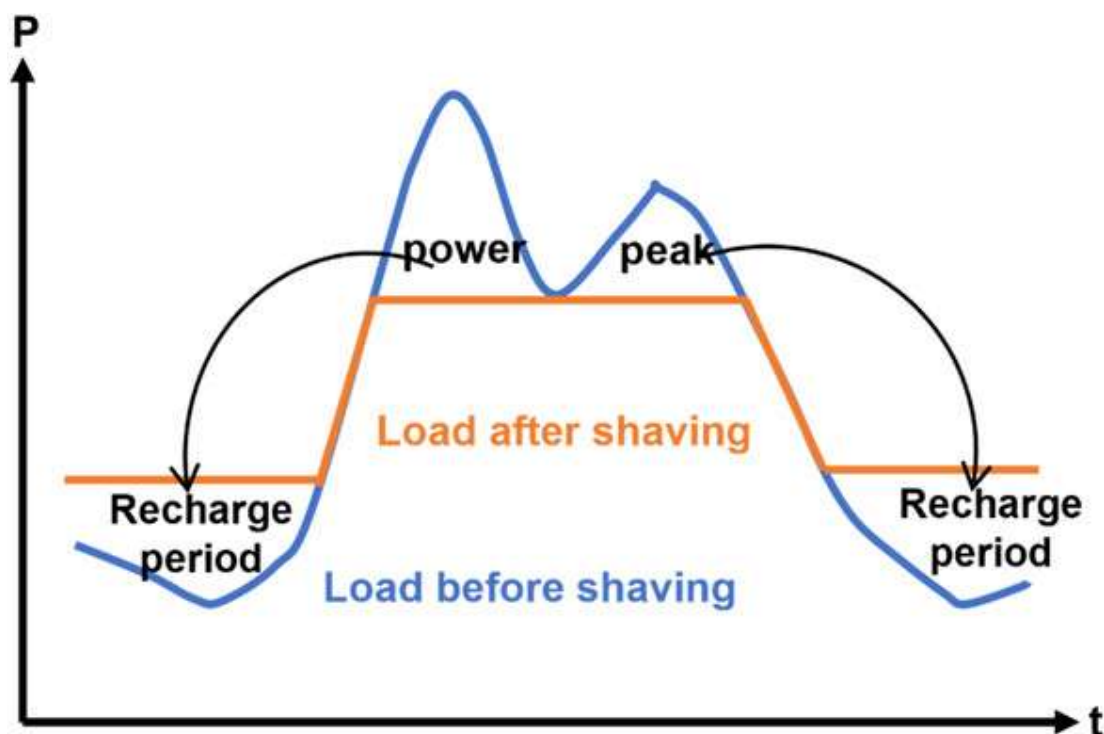
Kombinovaná konstrukce spojuje předchozí přístupy, nejčastěji v podobě samonosné střední části, ke které jsou zepředu i zezadu připevněny pomocné rámy. Pro moderní roboty jde o výborný kompromis. Pomocné rámy pohlcují nejtvrďší rázy z terénu, zatímco do tuhé střední vany lze velmi nízko a bezpečně uložit těžké bateriové bloky, čímž se radikálně snižuje těžiště celého stroje.[30]

2.4.2 Pohonný systém

Volba energetické koncepce

Pro návrh pohonného systému autonomního stavebního robota je zásadní volba vhodné energetické koncepce. V oblasti pracovních strojů, odborně označovaných jako NRMM (Non-Road Mobile Machinery), probíhá v současnosti výrazný technologický posun směrem k elektrifikaci a hybridizaci. Volba mezi plně elektrickým a hybridním pohonem závisí primárně na pracovním cyklu stroje a požadavcích na intenzitu výkonu.

Hybridní systémy kombinují spalovací motor s elektrickým pohonem a bateriovým úložištěm. Tato koncepce je výhodná především pro těžké stroje s vysokou spotřebou energie, které pracují v nepřetržitých cyklech a kde by současná kapacita baterií nebyla pro celodenní provoz dostačující. Hlavním benefitem hybridizace u pracovních strojů je možnost tzv. vyhlazování špiček. Spalovací motor může běžet v optimálním režimu s konstantními otáčkami a dobíjet baterie, zatímco elektromotor pokrývá krátkodobé požadavky na vysoký výkon, např. při zvedání břemene. Tím lze dosáhnout snížení spotřeby paliva o 20–40 % oproti konvenčním diesellovým strojům. Nevýhodou je však značná mechanická složitost systému, který vyžaduje integraci spalovacího motoru, generátoru, baterie a elektromotorů, což zvyšuje nároky na údržbu a prostor v šasi. [31]



Obr. 2-18 Peak load management summary [32]

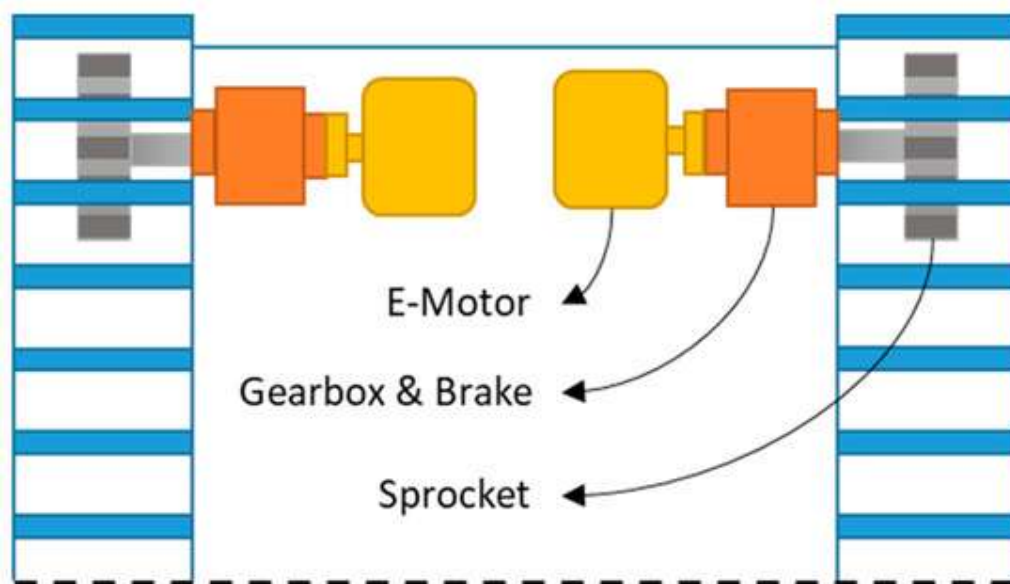
Plně elektrický pohon naproti tomu čerpá energii výhradně z akumulátorů. Pro menší a střední stavební roboty představuje tato koncepce ideální řešení. Je důležité zdůraznit, že elektrický pohon nabízí výrazně vyšší energetickou účinnost. Zatímco spalovací motory pracují s účinností okolo 30–40 %, elektrický pohon dosahuje účinnosti 80–90 %. To je kritické zejména u strojů s přerušovaným pracovním cyklem, kde elektrický pohon nespotřebovává energii při volnoběhu, na rozdíl od spalovacích motorů, které v tomto režimu běží neefektivně. [31; 33]

Absence spalovacího motoru přináší další zásadní výhody pro nasazení na staveništi, a to nulové lokální emise a výrazně nižší hladinu hluku a vibrací. To umožňuje nasazení robota v uzavřených prostorech, jako jsou haly, tunely nebo interiéry budov, bez nutnosti řešit odvětrávání zplodin. Z konstrukčního hlediska je čistě elektrický systém jednodušší, což zvyšuje spolehlivost a snižuje provozní náklady. Limitujícím faktorem je kapacita baterie a doba nabíjení, avšak pro roboty s definovaným pracovním úkolem a možností průběžného dobíjení je tato technologie v současnosti preferovanou volbou. [31]

Technologie a umístění trakčních motorů

Návrh pohonného ústrojí pro terénního autonomního robota musí reflektovat specifické nároky stavebního prostředí, kterými jsou především potřeba vysokého krouticího momentu při nízkých otáčkách, odolnost vůči vnějším vlivům a spolehlivost. Zatímco u běžných silničních vozidel je prioritou dynamika ve vysokých rychlostech, u stavebního robota je kritickým parametrem schopnost vyvinout dostatečnou sílu pro pohyb v terénu, a to často při minimální rychlosti. Tomuto požadavku musí odpovídat nejen typ zvoleného elektromotoru, ale také jeho umístění a mechanická vazba na hnací kolo.

Umístění pohonu u tradiční konstrukce mobilních robotů často využívalo centrálně umístěné motory spojené s koly pomocí složité soustavy hřídelí, řetězů či řemenů. Současným trendem v oblasti profesionální servisní robotiky a kompaktních stavebních strojů je však decentralizace pohonu a využití tzv. integrovaných trakčních jednotek. Toto řešení spočívá v umístění elektromotoru, převodovky a případně i elektromagnetické brzdy do jednoho kompaktního celku, který je montován v bezprostřední blízkosti hnacího kola, nebo je přímo jeho součástí. [34]



Obr. 2-19 Schematic of electric traction system [35]

Toto uspořádání přináší pro navrhovaného robota několik zásadních výhod. Především dochází k úspoře cenného vnitřního prostoru v šasi, který může být využit pro větší bateriový blok nebo elektroniku, jelikož odpadají vnitřní převodové hřídele. Výhodou je taktéž modularita tohoto řešení, protože celý pohonný modul je nezávislý, což zjednodušuje montáž a případný servis. Ačkoliv umístění motoru přímo do náboje kola zvyšuje neodpruženou hmotnost, což je u rychlých vozidel nežádoucí, u pomaloběžného pásového robota tento faktor nehraje kritickou roli. Naopak, přímý přenos síly z motoru na kolo bez dlouhých mechanických převodů zvyšuje celkovou mechanickou účinnost soustavy. [34]

Volba technologie motoru, který je samotným srdcem trakční jednotky. V úvahu přicházejí dvě základní technologie: komutátorové stejnosměrné motory (DC) a bezkomutátorové motory (BLDC / PMSM).

Podle nejnovějších studií představují BLDC motory v současnosti dominantní technologii pro aplikace v dopravě a robotice, a to z důvodu jejich nesporných výhod oproti starším DC motorům. Hlavním rozdílem je absence mechanického komutátoru a uhlíkových kartáčů. U klasických DC motorů dochází třením uhlíků k jiskření, vzniku tepla a především k produkci vodivého prachu, což je uvnitř uzavřeného robota s citlivou elektronikou nepřijatelné. Navíc uhlíky vyžadují pravidelnou výměnu, což by narušovalo požadavek na bezúdržbovost. [36]

BLDC motory taktéž dosahují výrazně vyšší hustoty výkonu a účinnosti, která se pohybuje nad 90 %. To znamená, že při stejných rozměrech dokáže BLDC motor vyvinout vyšší krouticí moment než DC motor, což je pro kompaktní integrovanou jednotku klíčové. Další výhodou je lepší odvod tepla. Vinutí je u BLDC motoru umístěno na statoru, takže teplo může být efektivně odváděno, zatímco u DC motoru se zahřívá rotující kotva, která se chladí obtížně. I přes nutnost složitějšího elektronického řízení, poskytuje BLDC motor přesnější kontrolu otáček a momentu, což je nezbytné pro plynulé manévrování robota. [36]

Převodové ústrojí

Vzhledem k charakteristice BLDC motorů, které pracují efektivně ve vysokých otáčkách, je nezbytnou součástí pohonného řetězce redukční převodovka. Přímý pohon pásového podvozku motorem bez redukce není technicky realizovatelný, jelikož pro pohyb v náročném terénu je vyžadován vysoký krouticí moment na úkor rychlosti. Převodové ústrojí tak plní funkci násobiče momentu a zároveň snižuje výstupní otáčky na úroveň požadované pojezdové rychlosti robota.

Vícetupňová planetová převodovka se v rámci koncepce integrované trakční jednotky, popsané v předchozí kapitole využívá jako průmyslový standard. Oproti čelním nebo šnekovým převodům nabízí planetové soukolí nejvyšší poměr přenášeného výkonu k objemu a hmotnosti.

Jejich koaxiální uspořádání umožňuje celou převodovku zasunout přímo do těla elektromotoru nebo do náboje hnacího kola, což je pro kompaktní design stavebního robota klíčové. Pro dosažení potřebného převodového poměru se využívá vícestupňové řazení planetových soukolí za sebou. Tím je zajištěno, že i kompaktní motor dokáže vyvinout na výstupu krouticí moment v řádech stovek Nm, nezbytný pro překonání valivého odporu. [34]

Důležitým aspektem planetových převodovek je jejich vysoká mechanická účinnost (často přes 95 %), což však znamená, že nejsou samosvorné. Pokud by robot zastavil ve svahu a došlo k odpojení napájení motoru, gravitační síla by mohla přetočit převodovku a robot by nekontrolovaně sjel dolů. Z tohoto důvodu je součástí převodového ústrojí integrovaná elektromagnetická parkovací brzda.

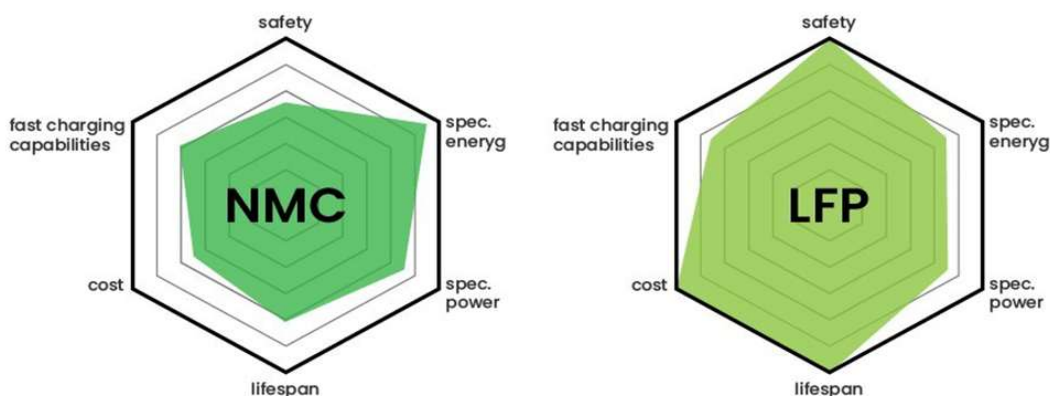
Tato brzda funguje na principu, kde pružina zavírá a elektromagnet otevírá. V beznapěťovém stavu pružiny mechanicky zablokuje hřídel motoru, čímž je zajištěna bezpečnost stroje na staveništi. Při rozjezdu řídicí jednotka pošle proud do elektromagnetu, který brzdou uvolní. Toto řešení je bezpečnostním standardem pro všechny autonomní pracovní stroje.[34]

2.4.3 Baterie a správa energie

Volba technologie článků

Základním a naprosto kritickým prvkem každého moderního elektrického pracovního stroje je vysoce spolehlivý a dostatečně dimenzovaný zdroj energie. Vzhledem k neustále rostoucím požadavkům na vysokou energetickou hustotu, co nejvíce kompaktní rozměry, a především schopnost dodávat stabilně vysoké vybíjecí proudy pro výkonné trakční motory, představují v současné průmyslové praxi absolutní standard akumulátory na bázi lithia, zkráceně označované jako Li-Ion. Pokud tyto moderní články srovnáme se staršími a dříve hojně využívanými technologiemi, jako jsou tradiční těžké olověné nebo nikl-metal hydridové baterie, nabízejí lithiové akumulátory násobně vyšší celkovou účinnost, a navíc zcela eliminují nepříznivý paměťový efekt. Rodina lithium-iontových akumulátorů ovšem není z chemického hlediska vůbec homogenní. Naopak zahrnuje celou řadu velmi odlišných chemických složení katody, z nichž se v náročných průmyslových aplikacích a elektromobilitě postupně prokázaly především dvě dominantní technologie, a to NMC a LFP.

Technologie označovaná zkratkou **NMC**, jejíž katoda je tvořena složitou směsí lithia, niklu, manganu a kobaltu, v současné době jednoznačně dominuje globálnímu trhu s osobními elektromobily, lehkou spotřební elektronikou a také se široce uplatňuje v oblasti bezpilotních letounů a komerčních dronů. Její největší a nezpochybnitelnou předností je extrémně vysoká energetická hustota, která se v praxi běžně pohybuje v hodnotách mezi 150 a 220 Wh/kg. Tento výjimečný parametr umožňuje inženýrům a konstruktérům dosáhnout velmi vysoké celkové kapacity bateriového bloku při zachování minimální možné hmotnosti a malých fyzických rozměrů. Nevyhnutelnou daní za tento enormní výkon je ovšem výrazně nižší termální stabilita celého bateriového systému. Při jakémkoliv vážnějším mechanickém poškození, rozsáhlejší deformaci obalu nebo při vnitřním zkratu hrozí u NMC článků vysoké riziko takzvaného termálního úniku. Tento nekontrolovatelný a lavinovitě se šířící chemický proces velmi rychle vede k prudkému a jen obtížně uhasitelnému zahoření, při kterém se navíc uvolňuje kyslík. Kromě poměrně vysokých bezpečnostních rizik tyto baterie disponují také poněkud omezenou cyklickou životností, jelikož jejich kapacita obvykle klesá pod hranici 80 % původní hodnoty již po absolvování 500 až 1000 plných nabíjecích cyklů. [37]



Obr. 2-20 LITHIUM NMC VS LIFEPO4 [38]

Druhou velmi rozšířenou alternativou jsou články s chemickým složením **LFP**, které využívají jako hlavní materiál katody fosforečnan lithno-železnatý. V přímém srovnání s výše popsanou technologií NMC disponují tyto baterie znatelně nižší energetickou hustotou, která se obvykle pohybuje v rozmezí 90 až 160 Wh/kg. Z inženýrského hlediska to znamená, že výsledný bateriový blok o totožné využitelné kapacitě bude fyzicky znatelně objemnější a především těžší. Tuto zdánlivou nevýhodu však články s chemií LFP dokážou plně kompenzovat svými naprosto excelentními parametry v oblasti celkové provozní bezpečnosti a dlouhodobé trvanlivosti. LFP články jsou chemicky a termálně vysoce stabilní, neobsahují ve své struktuře žádný drahý ani toxický kobalt a dokážou bez větších tepelných ztrát snášet velmi vysoké vybíjecí i nabíjecí proudy. Nejkritičtější faktorem při nasazení jakékoliv sofistikované techniky v náročném a nepřehledném prostředí staveniště je právě absolutní mechanická odolnost. LFP články nedegradují explozivním zahořením,

a to dokonce ani v případech extrémního vnějšího poškození, jako je například hluboké proražení ocelovou výztuží nebo silný destrukční náraz.[37]

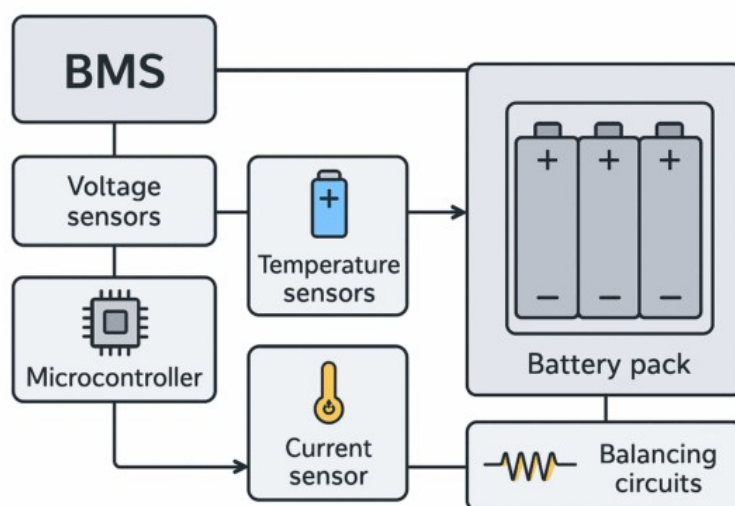
Dalším nesmírně podstatným faktorem je její cyklická životnost. Bateriové články s chemií LFP dosahují v reálném a náročném provozu životnosti, která zcela běžně přesahuje 2000 až 3000 hlubokých nabíjecích cyklů, než dojde k citelnému poklesu jejich využitelné kapacity. Pokud se v rámci standardního provozního scénáře na staveništi předpokládá, že pracovní autonomní systém bude aktivně operovat a následně se dobíjet na pravidelné denní bázi, nebo dokonce i několikrát v průběhu jedné pracovní směny, pak hraje delší cyklická životnost naprosto stěžejní roli. Schopnost absolvovat více než trojnásobný počet pracovních cyklů oproti běžným vysokokapacitním bateriím radikálně snižuje potřebu nákladných servisních zásahů a případných komplexních výměn celého drahého bateriového bloku, což činí z dlouhodobého hlediska provoz daného zařízení mnohem ekonomičtější a udržitelnějším. [37]

V neposlední řadě je z konstrukčního hlediska velmi důležité zmínit, jakým specifickým způsobem se může výše zmiňovaná vyšší hmotnost LFP baterií reálně projevit v samotné mechanické stavbě stroje. Ačkoliv je celková vysoká hmotnost článků u létajících bezpilotních zařízení nebo rychlých sportovních automobilů po právu považována za takřka nepřekonatelnou nevýhodu, u těžkého pozemního stroje pohybujícího se na pásech může představovat velmi nečekaný a značný konstrukční benefit. Rozměrný a těžký blok akumulátorů lze totiž v rámci celkového návrhu šasi strategicky umístit na samotné dno podvozkové vany, ideálně přímo do prostoru mezi oba hnací pásy. Takovéto promyšlené prostorové uspořádání těžkých komponent má za přímý následek vysoce žádoucí snížení polohy těžiště celého stroje. Nízko položené těžiště přímo a velmi pozitivně ovlivňuje celkovou statickou i dynamickou stabilitu robota. Stroj je díky tomuto optimálnímu rozložení hmot do spodní části šasi mnohem odolnější proti nechtěnému bočnímu i podélnému převrácení při překonávání terénních překážek nebo při stoupání. Celkové stability je navíc dosaženo velmi elegantně a efektivně, aniž by bylo nutné přidávat do konstrukce jakoukoliv další nadbytečnou pasivní zátěž.[26]

Správa baterií a napěťová architektura

Zatímco starší olověné akumulátory vykazovaly značnou míru tolerance vůči hrubému zacházení a kolísání napětí, moderní lithiové články postrádají schopnost samoregulace. Lithiové akumulátory vyžadují permanentní a striktní elektronický dohled, jinak u nich dochází k nevratné chemické degradaci, nebo dokonce k fatálnímu selhání. Tuto kritickou roli plní systém správy baterií (Battery Management System – BMS). Jeho primárním úkolem je neustále monitorovat napětí, proud a teplotu na úrovni jednotlivých článků a chránit celý bateriový blok před stavy extrémního přebíjení, hlubokého podvybití a vnějším či vnitřním zkratem.

Integrovaný systém BMS musí plnit tři specifické a vzájemně provázané funkce. První z nich je takzvané balancování článků. Bateriový blok se skládá z více sériově zapojených článků, které vlivem výrobních tolerancí a rozdílného stárnutí nemají zcela identickou kapacitu ani vnitřní odpor. Bez aktivního nebo pasivního vyrovnávání by se napětí jednotlivých článků postupně „rozjelo“, což by vedlo k předčasnému ukončení nabíjení a dramatickému poklesu celkové využitelné kapacity. Druhou zásadní funkcí je teplotní management. Trakční BLDC motory odebírají při jízdě v těžkém terénu obrovské špičkové proudy, což způsobuje zahřívání baterie. BMS musí v reálném čase hlídat teplotní limity a v krajním případě omezit výkon, aby nedošlo k přehřátí, nebo naopak omezit rekuperační proudy v zimních měsících, kdy by nabíjení podchlazených článků způsobilo poškození jejich krystalické mřížky. Třetí, a pro samotnou autonomii stroje naprosto kritickou funkcí, je kontinuální odhad stavu nabití. Na rozdíl od olovených baterií je vybíjecí křivka lithiových článků velmi plochá a napětí samo o sobě neposkytuje přesnou informaci o zbývající energii. BMS proto musí využívat pokročilé algoritmy, aby nadřazenému řídicímu počítači robota poskytl přesná data. Jen na základě těchto dat dokáže navigační systém včas přerušit pracovní úkol a autonomně se vrátit k nabíjecí stanici. [39]



Obr. 2-21 Diagram of a Battery Management System (BMS) [40]

Návrh samotného bateriového bloku a jeho BMS přímo souvisí se zvolenou celkovou napěťovou architekturou stroje. K dispozici jsou dnes tři úrovně napětí. Historicky nejstarším standardem jsou 12 V nebo 24V systémy, které dodnes dominují v kategorii malých servisních robotů. Pro návrh těžkého stavebního robota jsou však již zcela nevhodné. Pokud totiž potřebujeme pro pojezd v těžkém terénu přenést výkon v řádu několika kilowattů, vyžaduje to při nízkém napětí obrovské protékající proudy. Podle Jouleova zákona rostou tepelné ztráty na vedení s druhou mocninou proudu. To by si u 12 V systému vynutilo použití extrémně tlustých a těžkých měděných kabelů a masivního chlazení stykačů. Na opačném konci spektra stojí vysokonapěťové systémy pracující v rozmezí

400 V až 800 V, které představují absolutní standard pro moderní osobní elektromobily a velkou stavební techniku. Tyto systémy sice umožňují přenášet extrémní výkony při zanedbatelném zahřívání tenkých kabelů, avšak jejich implementace přináší zásadní úskalí. V prostředí staveniště představuje jakékoliv poškození vysokonapěťové izolace smrtelné riziko úrazu elektrickým proudem. Systém proto vyžaduje složité a drahé bezpečnostní odpojovače a jakýkoliv servis může provádět pouze speciálně vyškolený personál s vysokonapěťovou vyhláškou. [41]

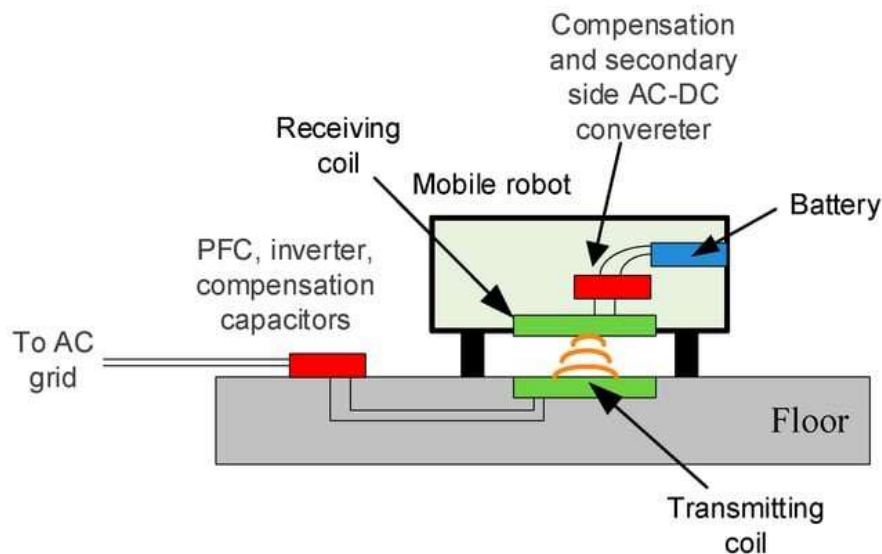
Jako ideální kompromis a dnešní uznávaný průmyslový standard pro středně velké pozemní roboty se proto profiluje 48 V architektura. Hlavním a naprosto klíčovým argumentem pro volbu tohoto standardu je fakt, že napětí 48 V bezpečně spadá pod legislativní limit 60 V. Tento limit definuje takzvané bezpečné malé napětí. Znamená to, že celý napájecí systém robota je z podstaty bezpečný na dotyk. V náročných podmínkách staveniště, kde může dojít k přeseknutí kabelu nebo mechanickému poškození šasi, nehrozí obsluze ani okolním pracovníkům smrtelný úraz elektrickým proudem. Tato skutečnost radikálně zjednodušuje homologační proces, testování i návrh izolačních prvků. Přitom oproti starším 12 V systémům snižuje 48 V platforma protékající proudy na čtvrtinu a tepelné ztráty na vedení dokonce na jednu šestnáctinu. To umožňuje využít relativně tenkou kabeláž, mnohem kompaktnější trakční elektromotory a efektivnější řídicí elektroniku, čímž vzniká zlatá střední cesta pro moderní robotiku. [41]

Mechanismus dobíjení

Aby mohl být robot považován za plně autonomní systém schopný dlouhodobého nasazení bez nutnosti neustálých lidských zásahů, musí být vybaven spolehlivým mechanismem doplňování energie. V prostředí moderního staveniště, které se vyznačuje všudypřítomným prachem, hlubokým blátem, vysokou vlhkostí a mechanickými vibracemi, představuje proces automatického dobíjení značnou výzvu. Systém musí garantovat nejen rychlý a bezpečný přenos potřebného elektrického výkonu do bateriového bloku, ale především absolutní odolnost vůči těmto vnějším vlivům. Zároveň je nutné minimalizovat riziko selhání při samotném procesu dokování robota k nabíjecímu zdroji. V současné průmyslové praxi se pro automatizované doplňování energie u těžkých bezosádkových zařízení nabízí tři základní technologické přístupy, z nichž každý vykazuje velmi specifické vlastnosti ovlivňující jeho reálnou použitelnost v terénu.

Prvním a historicky nejrozšířenějším přístupem je **kontaktní dokovací systém**, v odborné literatuře označovaný jako vodivé dobíjení. Tento mechanismus vyžaduje, aby robot s vysokou přesností najel do stacionární dokovací stanice a mechanicky propojil své nabíjecí piny nebo sběrné plochy s kontakty nabíječky. Hlavní a nepopiratelnou výhodou tohoto řešení je nejvyšší možná účinnost přenosu energie a schopnost přenášet extrémně vysoké proudy pro rychlonabíjení bez masivních tepelných ztrát. V podmínkách venkovního staveniště však tato technologie naráží na fatální limity. Obnažené kovové kontakty na šasi robota jsou neustále vystaveny oxidaci a zanášení. Jakákoliv nečistota mezi kontakty při dokování vede k dramatickému nárůstu přechodového odporu, což v lepším případě způsobí přerušení nabíjecího procesu, v horším pak vznik elektrického oblouku, roztavení kontaktů nebo nebezpečný zkrat. Zajištění spolehlivosti by tak vyžadovalo implementaci velmi složitých a na poruchy náchylných mechanických krytů. [42]

Bezdrátový přenos energie je druhou velmi dynamicky se rozvíjející technologií. Tento systém zcela eliminuje potřebu jakéhokoliv fyzického propojení a funguje na principu elektromagnetické indukce přes vzduchovou mezeru mezi vysílací cívkou umístěnou v dokovací stanici a přijímací cívkou integrovanou do robota. Tato technologie představuje pro prostředí staveniště obrovskou výhodu, jelikož obě cívky i související výkonová elektronika mohou být kompletně kryty a hermeticky uzavřeny i s nejvyšším stupněm krytí. Systému tak absolutně nevádí brodění ve vodě, nánosy bahna ani všudypřítomný prach, protože magnetické pole těmito nekovovými materiály bez problémů prostupuje. Moderní systémy také disponují značnou tolerancí vůči nepřesnému zaparkování. Pokud robot v těžkém terénu nedokáže nacouvat nad nabíjecí stanicí na milimetr přesně, indukční přenos se přesto zahájí, čímž se radikálně zvyšuje celková spolehlivost autonomního provozu. Určitou daní za tuto robustnost a bezúdržbovost je mírně nižší energetická účinnost, která je obvykle mezi 85 až 90 %.[42]



Obr. 2-22 Wireless charging of a mobile robot [43]

Automatická výměna celého bateriového bloku je třetí teoretickou alternativou pro zajištění nepřetržitého chodu bez čekání na dobítí. V tomto scénáři robot přijede ke speciální stacionární stanici, která z jeho útrobu fyzicky vyjme vybitý akumulátor a obratem jej nahradí plně nabitým kusem. Ačkoliv tato metoda redukuje prostoje na absolutní minimum, její aplikace u těžkých stavebních strojů je extrémně problematická. Manipulace s masivním blokem baterií vyžaduje vysoce výkonné a přesné robotické rameno nebo složitý dopravníkový mechanismus integrovaný přímo do stacionární stanice i do šasi robota. Takto komplexní přesná mechanika je v prašném a vibrujícím prostředí staveniště vysoce náchylná k zadření či mechanickému selhání. Kromě enormních pořizovacích nákladů na takovou infrastrukturu vyvstává i problém s udržováním čistoty uvnitř otevřeného bateriového prostoru robota během samotného procesu výměny. [42]

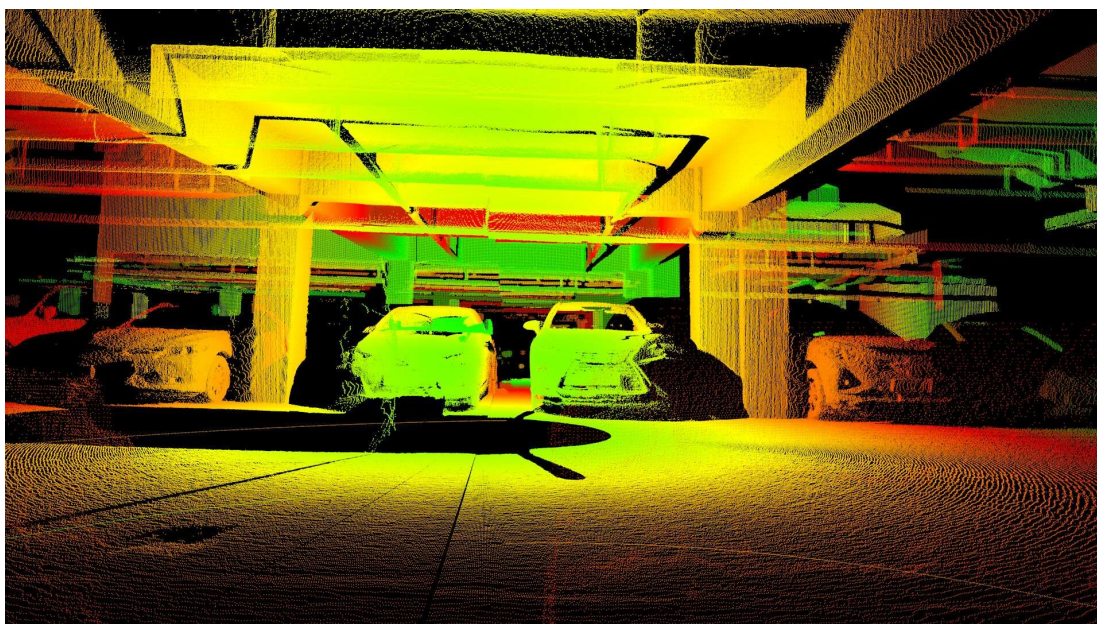
2.4.4 Senzorické vybavení

Aby mohl robot fungovat zcela nezávisle na lidské obsluze a bezpečně plnit své úkoly v chaotickém a dynamickém prostředí staveniště, musí být vybaven komplexním systémem pro sběr dat o svém okolí i o svém vlastním fyzickém stavu. Vzhledem k náročným venkovním podmínkám, jakými jsou všudypřítomný prach, bláto, výkyvy teplot, proměnlivé osvětlení a pohybující se těžká technika, se nelze při návrhu spolehnout na jedinou univerzální technologii. Pro dosažení spolehlivé autonomie je nezbytné využít principu fúze dat z více nezávislých zdrojů. Následující podkapitoly systematicky analyzují všechny potenciálně využitelné senzorické technologie a rozdělují je podle jejich primární funkce na systémy pro vnímání okolního prostoru, systémy pro globální lokalizaci a senzory pro vnímání vnitřního stavu robota.

Exteroceptivní senzory

Exteroceptivní senzory mají za primární úkol nepřetržitě snímat fyzickou realitu vně samotného stroje a transformovat ji do podoby digitálních dat. V kontextu autonomní stavební robotiky plní tento typ prostorového vnímání tři naprosto kritické funkce: geometrickou analýzu terénu, klasifikaci okolních objektů, a především zajištění dynamické bezpečnosti pro lidské pracovníky pohybující se v bezprostřední blízkosti stroje. Aby byl řídicí systém schopen získat komplexní a spolehlivý obraz o svém okolí bez ohledu na aktuální viditelnost, je vnější senzorická výbava tvořena zapojením tří hlavních technologických kategorií: laserových skenerů, pokročilých kamerových systémů a mikrovlnných radarů.

Základním stavebním kamenem prostorového vnímání u moderních autonomních strojů jsou v současnosti laserové skenery. Jak potvrzuje nejnovější rozsáhlý přehled senzorických systémů pro autonomní stavební roboty, dominantní roli zde hraje především technologie **LiDAR** a moderní vizuální systémy. LiDAR funguje na principu měření doby letu laserového paprsku a tato umožňuje v reálném čase vytvářet vysoce přesná, hustá 3D mračka bodů. Tyto senzory jsou zcela nepostradatelné pro tvorbu map staveníště, navigaci a precizní prostorovou lokalizaci překážek. Nicméně je třeba upozornit, že ačkoliv má tato technologie vynikající přesnost, její výdrž a spolehlivost se radikálně mění v závislosti na aktuálním pracovním prostředí. Zásadním technologickým limitem LiDARu na stavbě je jeho zranitelnost vůči drobným částicím v ovzduší. Laserový paprsek nedokáže spolehlivě prostoupit hustým zvířeným prachem, hustou mlhou nebo silným sněžením. V těchto podmínkách dochází k nežádoucímu odrazu paprsků přímo od zrněk prachu, což pro řídicí systém robota vytváří iluzi pevné zdi a vede k nechtěnému a zbytečnému zastavení stroje.[44]



Obr. 2-23 High-Resolution 2D LiDAR Scanning [45]

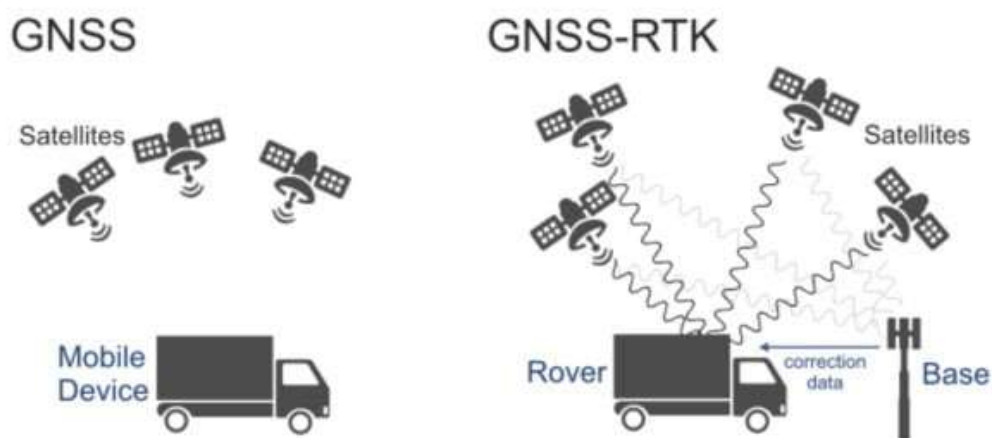
Z tohoto důvodu je naprosto nezbytné laserové měření doplňovat o kamerové systémy, které robotovi dodávají to, co LiDAR neumí, a to kontextuální informace o barvě, textuře a tvaru. V oblasti stavební robotiky se uplatňují především tři základní technologické přístupy. Prvním z nich jsou **monokulární kamery**, které poskytují standardní 2D barevný obraz. Ačkoliv samy o sobě neposkytují přímou informaci o hloubce, jsou díky vysokému rozlišení nezbytné pro sémantické rozpoznávání prostředí a klasifikaci objektů pomocí algoritmů umělé inteligence. Druhou skupinu představují **stereo kamery**, které ke snímání využívají dvojici objektivů kalibrovaných s přesným fyzickým rozestupem. Na stejném principu jako lidský zrak dokážou pomocí výpočtu paralaxy pasivně a velmi efektivně odhadovat hloubku scény a vzdálenost překážek, což z nich činí ideální senzor pro venkovní navigaci robota ve složitém terénu. Třetí a mimořádně přesnou technologií jsou **RGB-D kamery**, které kromě barevného spektra rovnou generují i nezávislou mapu hloubky, nejčastěji pomocí emise vlastního neviditelného infračerveného vzoru. Tyto senzory naprosto dominují při jemné manipulaci zblízka nebo při navigaci v uzavřených budovách a halách. [44]

Bez ohledu na použitý typ dodávají kamery robotovi zásadní schopnost rozhodovat se. Dokáže díky nim například rozlišit, zda je detekovaná překážka hromada sypkého písku, kterou lze s pásovým podvozkem bezpečně přejet, ocelová armatura, které je nutné se vyhnout, nebo lidský pracovník v reflexní vestě. Společnou a hlavní limitací všech vizuálních systémů je však jejich absolutní závislost na příznivých světelných podmínkách. Monokulární i stereo kamery zcela ztrácejí svou funkčnost v noci či při prudkém oslnění sluncem proti horizontu. U RGB-D kamer zase ostré sluneční záření venku přesvítlí a znefunkční jejich infračervený projektor. Především jsou ale veškeré optické čočky extrémně náchylné na znečištění, což si často vynucuje použití doplňkových termokamer pro spolehlivý provoz v noci či za snížené viditelnosti.

K finálnímu překonání fyzikálních limitů jak optických, tak laserových senzorů se jako třetí pilíř exterocepce v těžké technice implementují **radarové a ultrasonické senzory**. Milimetrový radar představuje pro stavební robotiku naprosto kritickou bezpečnostní pojistku. Ačkoliv radarové vlny neposkytují ani zdaleka tak detailní a jemné prostorové rozlišení jako LiDAR nebo kamery, jejich hlavní a nenahraditelnou výhodou je schopnost spolehlivě prostoupit naprosto jakoukoliv hustotou prachu, kouře, mlhy i velmi silným deštěm. Ve chvíli, kdy v důsledku extrémního prašného prostředí LiDAR a kamery dočasně oslepnou, radar bezpečně zaznamená blížící se velkou překážku, jako je například bagr, a umožní robotovi bezpečně zastavit. Ultrasonické senzory pak tuto sadu doplňují jako cenově dostupné, odolné a velmi přesné prvky pro detekci překážek v bezprostřední blízkosti robota. Fungují v podstatě jako takzvané virtuální nárazníky, které chrání šasi před drobnými kolizemi při velmi pomalém a složitém manévrování v úzkých výkopech nebo mezi uskladněným stavebním materiálem. [44]

Globální lokalizace

Zatímco exteroceptivní senzory poskytují robotovi detailní informace o překážkách v jeho bezprostředním fyzickém okolí, pro plnění komplexních úkolů je nezbytné, aby řídicí systém stroje neustále znal svou absolutní polohu v rámci globálního souřadnicového systému staveniště. Tato schopnost, označovaná jako globální lokalizace, je naprosto kritická pro synchronizaci pohybu robota s digitálním modelem stavby (BIM) a pro přesné provádění naplánovaných pracovních trajektorií. V otevřeném venkovním prostoru se pro tyto účely standardně využívají globální navigační satelitní systémy (GNSS), jako je americké GPS nebo evropské Galileo. Samotný signál z družic však pro stavební robotiku vykazuje zcela nedostatečnou přesnost, kdy se odchylka běžně pohybuje v řádech jednotek metrů. Z tohoto důvodu je nutné technologii doplnit o nadstavbu RTK (Real-Time Kinematic). Tento systém využívá stacionární pozemní referenční stanici umístěnou na stavbě, která v reálném čase vypočítává korekce fázového posunu signálu a odesílá je robotovi, čímž se výsledná přesnost lokalizace zvyšuje na úroveň pouhých několika centimetrů. Satelitní navigace naráží v tomto odvětví na závažné fyzikální limity. Signál je silně tlumen nebo zcela blokován při vjezdu do rozestavěných budov, v tunelech či v hlubokých výkopech. Extrémním problémem je navíc takzvaný multipath efekt, kdy se rádiové vlny ze satelitů odrážejí od vysokých ocelových konstrukcí, plechových hal nebo ramen jeřábů, což pro řídicí jednotku vede k náhlým a nebezpečným skokům ve vypočítané poloze stroje. [44]



Obr. 2-24 The basic concept of standalone GNSS localization (left) and the principle of RTK GNSS (right) [46]

Pro zajištění spolehlivé a kontinuální navigace v místech, kde je satelitní signál nedostupný nebo silně rušený, se v moderní průmyslové robotice využívá technologie lokální rádiové navigace. V této oblasti v současnosti jednoznačně dominuje systém UWB (Ultra-Wideband). Tento lokalizační systém je založen na přenosu extrémně krátkých širokopásmových impulzů a funguje nejčastěji na principu přesného měření doby letu signálu. V praxi to znamená, že se v interiéru rozestavěné haly nebo v tunelu rozmístí síť stacionárních rádiových majáků a robot, vybavený vlastním přijímačem, s vysokou frekvencí trigonometricky vypočítává svou polohu vůči této síti. Komplexní přehledové studie zaměřené na UWB lokalizační systémy potvrzují, že tato technologie dosahuje uvnitř budov naprosto stabilní centimetrové přesnosti. Její největší výhodou pro drsné prostředí staveniště je kromě vysoké přesnosti také imunita vůči rušení, které trápí běžné sítě. Zásadní je i fakt, že krátké rádiové vlny na UWB frekvencích spolehlivě prostupují hustým prachem, mlhou, a dokonce i běžnými nenosnými stavebními přepážkami. Pro dosažení skutečně robustní autonomie stavebního stroje je proto ideálním přístupem fúze obou zmíněných technologií. Stroj se na otevřeném prostranství naviguje primárně pomocí GNSS s RTK korekcí, a jakmile na základě dat ze senzorů detekuje ztrátu satelitního signálu při vjezdu do zastřešených prostor, jeho navigační algoritmus plynule přepne na předem nakalibrovanou lokální UWB síť majáků, čímž je zaručen nepřetržitý a bezpečný pohyb robota napříč celým areálem stavby. [47]

Proprioceptivní senzory a odometrie

Zatímco exteroceptivní senzory, analyzované v předchozí části, zkoumají vnější okolí robota, propriocepce představuje schopnost stroje vnímat svůj vlastní vnitřní stav, kinematiku a prostorovou orientaci. Pro zajištění spolehlivé autonomie je nezbytné tyto dva světy propojit. Základním prvkem pro měření vnitřních stavů je inerciální měřicí jednotka (IMU) v kombinaci se snímači otáček motorů. V náročném a výškově členitém terénu staveniště plní kompaktní jednotka IMU roli kritického bezpečnostního prvku. Díky integrovaným gyroskopům a akcelerometrům dokáže v reálném čase detekovat podélný i příčný náklon stroje. Pokud robot například najede na strmou hranu výkopu nebo překonává asymetrickou hromadu sutí, IMU okamžitě zaznamená, že se těžiště blíží k hranici statické stability. To umožní řídicímu systému bleskově zastavit či korigovat pohyb ještě před tím, než by došlo k fatálnímu převrácení stroje. [44]

Druhou nedílnou složkou propriocepce je odometrie, tedy proces, při kterém řídicí jednotka vypočítává ujetou vzdálenost a změnu směru čistě na základě dat z enkodérů umístěných v motorech. Tyto snímače s vysokou přesností zaznamenávají, o kolik úhlových stupňů se hnací kola pásů fyzicky otočily. Na pevném a ideálně rovném povrchu, jako je betonová podlaha, funguje odometrie jako spolehlivý a výpočetně nenáročný způsob navigace. Výzkumy senzorických systémů pro stavebnictví však upozorňují na zásadní fyzikální limit tohoto řešení v off-road podmínkách. V terénu, jakým je bláto, mokrá štěrka nebo sypký písek, totiž dochází u pásových podvozků k prokluzu. [44]

V situaci, kdy dojde ke ztrátě trakce, enkodéry v motorech sice spolehlivě zaznamenají rotaci a vnitřní systém se domnívá, že stroj ujel požadovanou vzdálenost, avšak ve skutečnosti robot pouze protáčí pásy na místě. Vlivem tohoto nevyhnutelného prokluzu se čistá odometrie stává pro pohyb na stavbě vysoce nepřesnou a vede k obrovské akumulaci navigačních chyb. Z tohoto důvodu nelze při návrhu plně autonomního stroje spoléhat pouze na vnitřní vnímání. Aby byl robot schopen prokluz detekovat a úspěšně jej kompenzovat, musí svá interní data z odometrie a IMU neustále softwarově kombinovat s daty z vnějších senzorů, jako je LiDAR, kamery nebo satelitní systém GNSS. Právě tato pokročilá senzorická fúze zajišťuje, že robot dokáže správně interpretovat svou skutečnou polohu i ve chvíli, kdy ztratí mechanickou adhezi s podkladem. [44]

Kromě navigačních a stabilizačních senzorů zahrnuje komplexní propriocepce také snímače určené pro neustálou diagnostiku a ochranu samotného hardwaru. Těžké nasazení na stavbě způsobuje extrémní namáhání komponent. Pohonné jednotky a řídicí elektronika jsou proto standardně osazeny teplotními senzory, které v reálném čase hlídají provozní teplotu. V případě blížícího se přehřátí při extrémní zátěži dokáže systém autonomně snížit výkon, aby zabránil nevratnému poškození. Stejně nepostradatelné jsou interní senzory elektrického proudu. Pokud řídicí jednotka zaznamená prudký nárůst odebíraného proudu na jednom z motorů, aniž by se adekvátně zvyšovala rychlost, indikuje to mechanické zablokování podvozku a systém motor ve zlomku sekundy odpojí. U strojů určených pro logistiku a převoz těžkého materiálu se navíc do šasi integrují tenzometrické snímače zatížení. Tyto senzory přesně měří aktuální hmotnost neseného nákladu, což hlavnímu řídicímu algoritmu umožňuje dynamicky přepočítávat polohu těžiště a poskytovat mnohem přesnější data inerciální jednotce IMU pro výpočet bezpečí proti převrácení.

2.4.5 Řídicí systém

Aby mohl autonomní stavební stroj v chaotickém a dynamicky se měnícím prostředí staveniště spolehlivě fungovat, musí být schopen masivní datový tok ze všech senzorů v reálném čase zpracovat, vyhodnotit a přetavit v adekvátní fyzickou akci. Architektura moderního řídicího systému v sobě proto spojuje robustní výpočetní hardware umístěný přímo na palubě stroje s pokročilými softwarovými algoritmy. Jak bude v následujících podkapitolách detailně popsáno, proces autonomního řízení představuje úzce provázaný řetězec operací od algoritmické tvorby přesné prostorové mapy okolí, přes nasazení umělé inteligence pro sémantické porozumění scéně, až po finální dynamické plánování optimální a bezpečné trajektorie pohybu.

Výpočetní jednotka a architektura řízení

Přechod od pouhého sběru dat k aktivnímu rozhodování a pohybu vyžaduje odpovídající hardwarové zázemí. Robot, vybavený LiDARem, soustavou kamer s vysokým rozlišením a vysokofrekvenční inerciální jednotkou, generuje extrémní množství surových dat, které nezřídka dosahuje objemu i několika gigabajtů za sekundu. Aby stroj dokázal v dynamickém a nepředvídatelném prostředí staveniště spolehlivě fungovat, musí být tento masivní datový tok nepřetržitě zpracováván. Dalo by se předpokládat, že robot veškerá svá data odesílá prostřednictvím 5G sítě na vzdálený server, kde probíhá výpočet a zpět se vrací pouze řídicí povely. Jak ale upozorňují studie zaměřené na výpočetní náročnost autonomních systémů, pro těžkou terénní robotiku je tento přístup z bezpečnostního hlediska absolutně nepřijatelný. Bezdrátové připojení na rozestavěných stavbách bývá vysoce nestabilní a jakýkoliv výpadek signálu nebo i nepatrné zpoždění v přenosu by mohlo vést k fatálním následkům. [48]

Z tohoto důvodu využívají moderní řídicí systémy takzvanou hybridní Cloud-Edge architekturu, která striktně rozděluje výpočetní zátěž na dvě nezávislé úrovně. Přímo do šasi robota je integrován palubní počítač, takzvaný Edge. Jeho výhradním úkolem je řešit úlohy v reálném čase, které jsou kritické pro okamžité přežití stroje. Sem patří fúze senzorických dat, lokální mapování, okamžité vyhýbání se překážkám, udržování stability a přímé řízení motorů. Díky Edge computingu je zaručeno, že i při naprostém výpadku sítě zůstane robot plně ovladatelný a bezpečně zastaví. Naproti tomu vzdálený Cloud slouží jako strategický mozek a dlouhodobá paměť. Zpracovává úlohy, které nejsou časově kritické, ale vyžadují enormní výpočetní výkon. Cloud se stará o porovnávání lokálních map s globálním digitálním modelem stavby, koordinuje trasy celé flotily robotů na staveništi a slouží k průběžnému trénování komplexních modelů umělé inteligence na základě historických dat odeslaných jednotlivými stroji. [49]



Obr. 2-25 The NVIDIA® Jetson AGX Thor™ [50]

Aby palubní počítač zvládl plynule obsluhovat matematicky náročné algoritmy umělé inteligence a počítačového vidění přímo na stavbě, využívají se vysoce specializované průmyslové počítače. Ty jsou namísto běžných procesorů osazena výkonnými grafickými akcelerátory, jako jsou například systémy z rodiny NVIDIA Jetson, které jsou optimalizované pro paralelní běh hlubokých neuronových sítí. Zcela zásadním inženýrským požadavkem na tyto palubní jednotky je jejich fyzická odolnost. Kvůli všudypřítomnému prachu a vlhkosti nelze použít standardní aktivní chlazení pomocí ventilátorů, které by nečistoty nasávalo dovnitř. Šasi řídicí jednotky proto musí fungovat jako jeden masivní pasivní chladič z žebrovaného hliníku. Celý výpočetní hardware navíc musí splňovat přísné normy pro extrémní odolnost vůči silným vibracím od podvozku a schopnost spolehlivě operovat v širokém teplotním spektru od silných mrazů až po přímé letní slunce. [48; 48; 49]

Mapování a fúze dat

Jakmile palubní počítač přijme surová data ze senzorů, jeho prvním a absolutně nejdůležitějším softwarovým úkolem je zorientovat se v prostoru. Autonomní stavební robot se totiž po zapnutí často ocitá v neznámém nebo od včerejška výrazně změněném prostředí. V tu chvíli naráží řídicí systém na klasický paradox „slepice a vejce“. Aby robot věděl, kde přesně se nachází, potřebuje mapu okolí, avšak aby mohl takovou mapu vytvořit, musí neustále vědět, kde se v danou chvíli nachází. Toto fundamentální dilema mobilní robotiky řeší rodina algoritmů označovaná zkratkou SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), která zajišťuje tvorbu mapy a výpočet vlastní polohy v ní zcela současně a v reálném čase. [51]

Ačkoliv v interiérové robotice často postačuje mapování pouze pomocí kamer, drsné podmínky staveniště, charakteristické všudypřítomným prachem, oslněním a rychlými změnami světla, vyžadují mnohem robustnější přístup. Průmyslovým standardem pro těžkou terénní techniku se proto stala komplexní senzorická fúze, jejímž primárním základem je 3D LiDAR a inerciální jednotka. Pro dosažení maximální možné robustnosti se však do tohoto výpočetního procesu integrují i obrazová data z palubních kamer, čímž vzniká takzvaný Visual-LiDAR-Inertial SLAM. Zatímco LiDAR poskytuje přesnou prostorovou geometrii a IMU dorovnává výpadky laseru, kamery dodávají řídicímu systému bohaté vizuální textury. Tato vizuální vrstva nejenže stabilizuje výpočet polohy v místech s nedostatkem výrazných geometrických tvarů, ale zároveň obohacuje výsledné 3D mračno bodů o reálnou barvu. Tím mapovací algoritmus připravuje dokonalé podklady pro následné vyhodnocení scény pomocí umělé inteligence. [51]

Kritickou výzvou pro mapovací algoritmy na staveništi je však extrémní dynamika tohoto prostředí. Na rozdíl od statických skladovacích hal představuje stavba vysoce nestrukturované prostředí. Během jediné směny se zde zcela mění topologie terénu, kdy vznikají nové výkopy, objevují se čerstvé hromady sypkého materiálu a těžká technika se neustále přesouvá. Aktuální výzkumy zaměřené na off-road navigaci upozorňují, že standardní algoritmy SLAM v takových podmínkách často chybují a dochází u nich k takzvanému driftu. Mozek stavebního robota proto musí využívat vysoce pokročilé verze těchto algoritmů, které dokážou mapu nejen dynamicky rozšiřovat, ale především z ní v reálném čase odmazávat překážky, které již fyzicky zmizely. Pro zajištění dlouhodobé konzistence a zabránění zhroucení mapy na rozlehlých prostranstvích se tento lokální LiDARový SLAM následně fúzuje s globálními daty ze satelitní navigace (GNSS/RTK), čímž lokální 3D mapa získá své přesné absolutní souřadnice na planetě. [52]

Umělá inteligence a sémantické porozumění

Algoritmy SLAM, popsané v předchozí části, poskytují robotovi vysoce přesnou prostorovou mapu. Z pohledu řídicího systému se však v této fázi jedná o pouhou „slepu“ geometrii. Stroj sice z mráčna bodů spolehlivě pozná, že se před ním nachází fyzická překážka určitých rozměrů, ale nemá tušení, o jaký objekt se ve skutečnosti jedná. Pokud by se palubní počítač rozhodoval pouze na základě geometrických dat, pohyb na staveništi by byl prakticky nemožný, protože by robot zastavil před každou hromadou hlíny nebo kaluží s domněním, že jde o neprůjezdnou zeď. Aby mohl autonomní systém v chaotickém prostředí smysluplně fungovat, musí do této prázdné 3D mapy vnést význam.

K řešení tohoto problému využívá palubní výpočetní jednotka pokročilé algoritmy založené na hlubokém učení (**Deep Learning**). Tyto rozsáhlé neuronové sítě zpracovávají obarvená data z kamer a LiDARu ve dvou hlavních rovinách. První z nich je detekce objektů (**Object Detection**), jejímž cílem je v reálném čase vyhledávat a ohraničovat konkrétní překážky. Na staveništích se pro tento účel dnes standardně nasazují rychlé sítě z rodiny YOLO, které dokážou s vysokou spolehlivostí identifikovat lidské pracovníky, jinou těžkou techniku nebo zaparkovaná vozidla, a tím radikálně snižují riziko fatální kolize. Druhou a pro pohyb stroje neméně důležitou rovinou je sémantická segmentace (**Semantic Segmentation**). Tento přístup nehledá ohraničené objekty, ale matematicky klasifikuje každý jednotlivý pixel v obraze nebo bod v 3D mráčku podle typu materiálu. Algoritmus tak povrch stavby detailně roztrídí na zóny, jako je pevný beton, bláto, vodní kaluž nebo sypký písek.[48; 53]



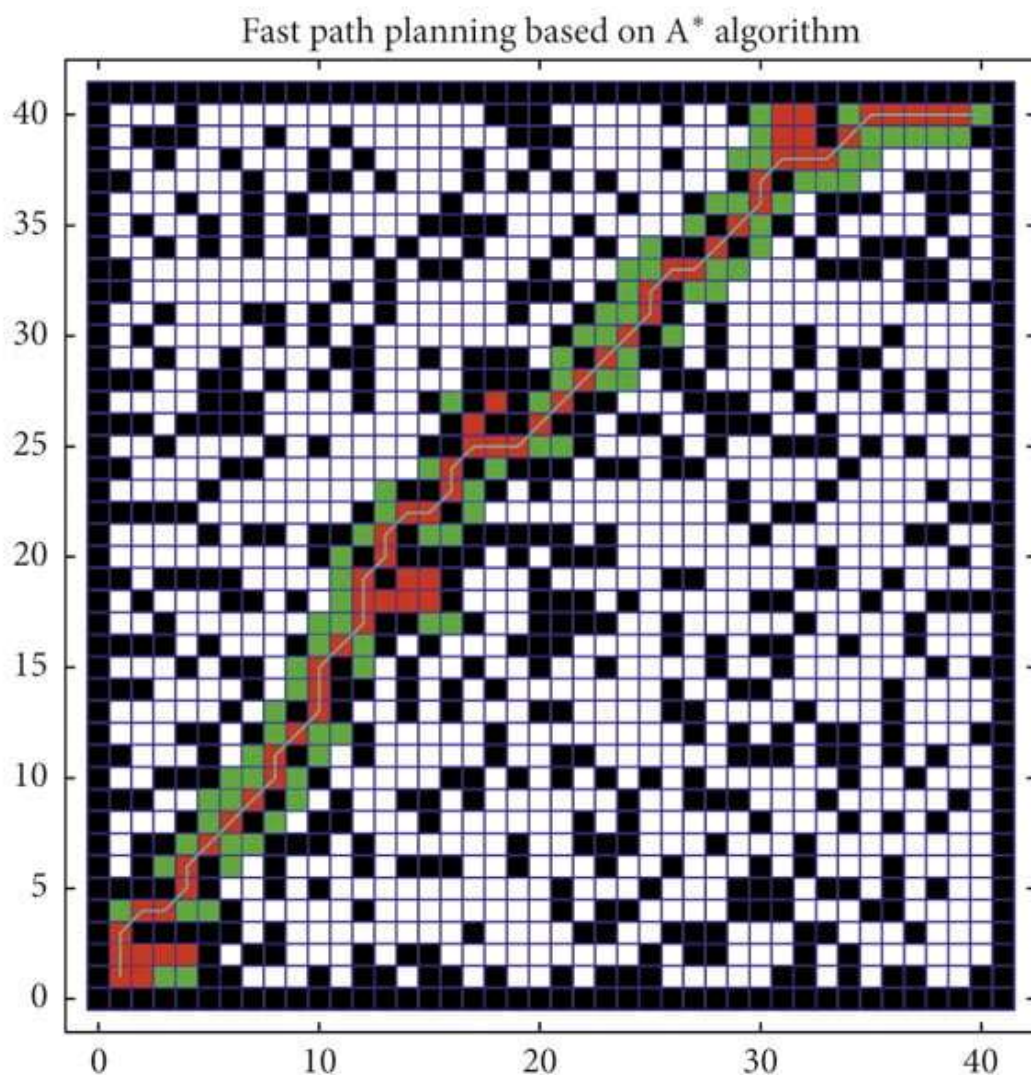
Obr. 2-26 Example of object detection [53]

Toto porozumění okolní scéně je pro řídicí systém naprosto klíčové při vyhodnocování průjezdnosti terénem. Zatímco čistě geometrický algoritmus by robotovi zakázal pohyb přes půlmetrovou překážku, umělá inteligence díky segmentaci pochopí, že jde pouze o hromadu měkkého písku nebo vysokou trávu, kterou může robustní podvozek bezpečně a plynule projet. Naopak, pokud AI detekuje, že i nepoměrně menší překážkou na trase je ležící ocelový profil, zapomenutý betonový panel nebo přímo noha lidského pracovníka, řídicí systém okamžitě aktivuje bezpečnostní brzdy. Teprve tato těsná synergie přesné prostorové geometrie a porozumění pomocí umělé inteligence dává robotovi skutečnou autonomii a schopnost bezpečného pohybu v tak náročném prostředí, jakým je staveniště.[48]

Navigace a plánování trasy

Jakmile řídicí systém získá přesnou prostorovou mapu a prostřednictvím umělé inteligence porozumí jejímu významu, nastupuje finální fáze autonomního cyklu, kterou je samotná akce. Cílem plánování trasy je převést tyto komplexní informace o okolním světě do konkrétních elektrických povelů pro trakční motory a řízení stroje. Vzhledem k vysoké výpočetní náročnosti se tento navigační proces u terénní robotiky standardně rozděluje na dvě úzce spolupracující, avšak hierarchicky oddělené úrovně: globální a lokální plánování.

První úroveň je globální plánování. Jeho úkolem je nalézt optimální a nejkratší, případně energeticky nejméně náročnou cestu z aktuální pozice robota do požadovaného cílového bodu napříč celým stavenišťem. Tento výpočet probíhá nad zmapovaným terénem a zohledňuje velké statické překážky, jako jsou zdi, výkopy nebo neprůjezdné hromady materiálu. Průmyslovým standardem pro tyto výpočty v nestrukturovaném prostředí jsou grafové vyhledávací algoritmy. Tradičním základem je algoritmus Dijkstra, který systematicky prohledává všechny dostupné cesty, avšak v moderních řídicích systémech se častěji uplatňuje jeho výpočetně mnohem efektivnější a směrově orientovaná varianta A (A-Star)*. Tyto algoritmy bezpečně navedou stroj do cílového sektoru, nedokážou však flexibilně reagovat na náhlé změny v prostoru. [52]



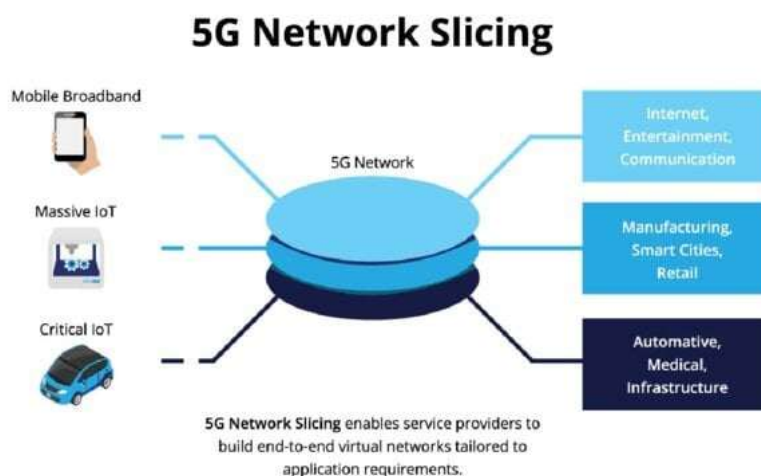
Obr. 2-27 Planned path based on the A-star algorithm [54]

Staveniště je totiž extrémně dynamické prostředí. Během jízdy po předem vypočítané globální trase může robotovi do cesty kdykoliv vstoupit lidský pracovník nebo nečekaně vjet jiný stavební stroj. Přepočítávat v takové chvíli celou makro-trasu by trvalo příliš dlouho a mohlo by vést ke kolizi. Zde přebírá řízení lokální plánovač, který na palubním Edge počítači běží s vysokou frekvencí a reaguje ve zlomcích sekundy. Pro bleskové generování krátkých úhybných trajektorií se v robotice využívá například algoritmus DWA (Dynamic Window Approach).[48]

U těžké stavební techniky je navíc absolutně nezbytné striktně zohlednit fyziku a kinematiku samotného podvozku. Několikatunový robot nemůže v plné rychlosti strhnout řízení o devadesát stupňů bez rizika masivního smyku, poškození pásů nebo převrácení. Pro tyto účely se nasazují pokročilé metody prediktivního řízení, jako je MPC (Model Predictive Control). Tento matematický model dokáže zlomek sekundy dopředu nasimulovat fyzikální chování těžkého stroje a zvolit takový úhybný manévr, který je nejen bezpečný vzhledem k překážce, ale především fyzikálně proveditelný pro daný typ trakce.[48; 52]

Komunikační rozhraní

Ačkoliv je palubní řídicí systém navržen pro maximální možnou míru lokální autonomie, stavební robot nemůže v reálném provozu fungovat jako izolovaná jednotka. Aby se systém mohl integrovat do digitálního ekosystému moderního staveniště, musí neustále sdílet obrovské množství dat různého charakteru. Dnešním průmyslovým standardem pro řešení této výzvy je nasazení privátních 5G sítí. Zásadní technologickou výhodou 5G infrastruktury pro autonomní robotiku však není pouze její rychlost, ale především podpora takzvaného Network Slicing (virtuální segmentace sítě). Tato technologie umožňuje rozdělit jednu fyzickou bezdrátovou síť na několik zcela nezávislých, softwarově definovaných vrstev, z nichž každá je optimalizována pro specifický typ datového toku. [55]



Obr. 2-28 Network Slicing in 5G [56]

První virtuální řez sítě je vyhrazen pro komunikaci palubního počítače se vzdáleným Cloudem a využívá standard eMBB (Enhanced Mobile Broadband). Tato vrstva je optimalizována pro extrémně vysokou datovou propustnost. Stroj jejím prostřednictvím odesílá objemná 3D mračna bodů ze svých LiDARů ke globálnímu zpracování, přijímá rozsáhlé modely staveníště (BIM) a odesílá dlouhodobou provozní telemetrii. U tohoto typu komunikace není vyžadována absolutní okamžitost, prioritou je bezchybný přenos velkého objemu dat. [55]

Druhý, pro pohyb stroje absolutně kritický řez, je postaven na standardu URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication). Tato vrstva garantuje extrémní spolehlivost, a především minimální latenci v řádu jednotek milisekund. Slouží ke komunikaci, jako je přímé sdílení polohy a trajektorie mezi samotnými stroji na stavbě a nepřetržitý příjem korekčních dat RTK pro centimetrovou přesnost satelitní navigace. Díky striktnímu oddělení těchto vrstev pomocí Network Slicingu je hardwarově zaručeno, že ani masivní odesílání mapy do cloudu v první vrstvě nikdy nezpůsobí zpoždění bezpečnostní zprávy o hrozící kolizi s jiným strojem ve vrstvě druhé. [55]

Bezpečnostní systém

V rámci nadřazeného řídicího systému robota musí být implementována nezávislá vrstva funkční bezpečnosti. V případě kritického selhání hlavního počítače, výpadku senzoriky nebo ztráty napájení musí řídicí systém zajistit okamžitý přechod stroje do bezpečného stavu. Toho se v moderní robotice dosahuje decentralizovanou bezpečnostní architekturou, ve které nejsou kritické funkce závislé na jediném centrálním kontroléru. Zásadní je také využití prvků, které k pohybu vyžadují nepřetržitý přívod aktivní energie. Typickým příkladem jsou trakční brzdy, které jsou trvale mechanicky zabrzděny silnými pružinami a řídicí elektronika je pouze uvolňuje. Při jakémkoliv výpadku systému tak dojde k okamžitému mechanickému zastavení stroje bez nutnosti softwarového zásahu.[57]

Řídicí architektura autonomního stroje se nesmí spoléhat pouze na softwarové brzdění na základě dat. Zásadní je implementace víceúrovňového systému nouzového zastavení (E-STOP). Základ tvoří hardwarová tlačítka, která při stisknutí zcela obejdou primární software a natvrdo rozepnou stykače trakčních i nastavbových systémů. u autonomních těžkých strojů je navíc nezbytným požadavkem integrace dálkového bezdrátového E-STOP systému. Pokud bezpečnostní jednotka robota ztratí s tímto dohledovým bezdrátovým ovladačem spojení, okamžitě a zcela automaticky iniciuje nouzové zastavení na hardwarové úrovni.

2.4.6 Nástavbové systémy

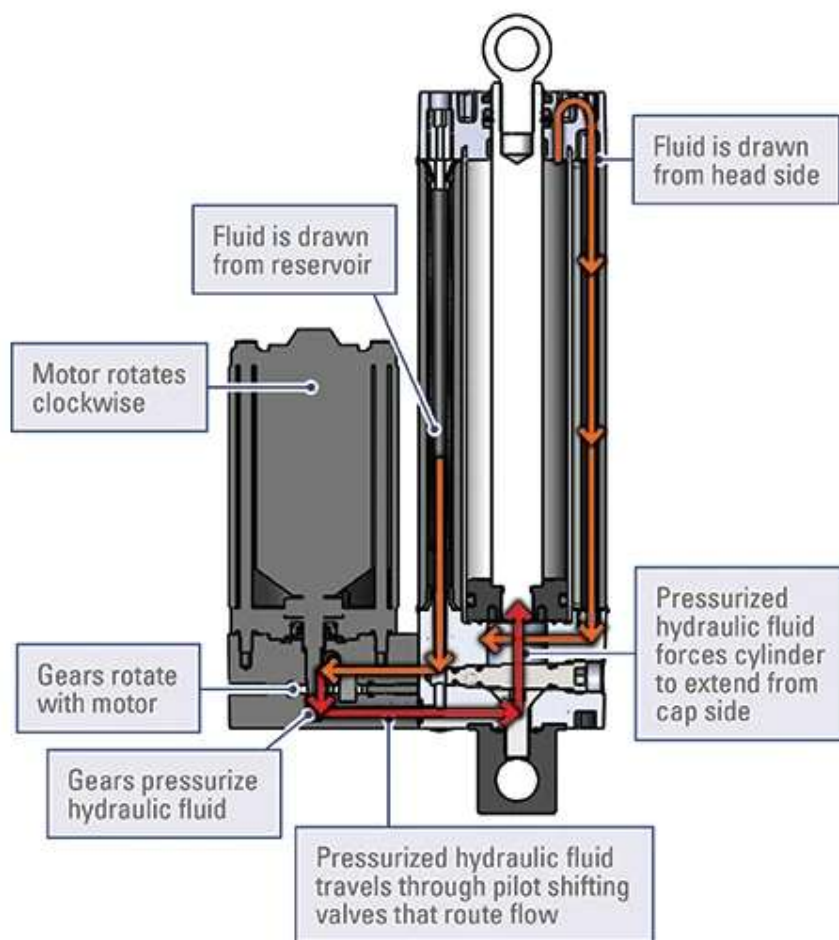
Zatímco předchozí kapitoly definovaly autonomního stavebního robota primárně jako mobilní platformu vybavenou senzory a navigačním systémem, pro plnění reálných úkolů na staveništi musí být stroj osazen odpovídajícími pracovními prvky. Tyto nastavbové systémy a funkční části umožňují robotovi fyzickou interakci s okolním prostředím, manipulaci s materiálem a provádění specifických stavebních operací. Mezi základní vybavení v tomto směru patří mechanismy pro vyklápění transportních koreb a manipulátory. Následující podkapitoly stručně představují technologické možnosti řešení těchto systémů s ohledem na jejich využití v autonomní technice.

Hydraulický systém

Pro silové operace na staveništi, jakými je manipulace s nákladem či vyklápění korby, zůstává hydraulika nepřekonanou technologií. Při její integraci do autonomních robotů se však nabízí dva zcela odlišné inženýrské přístupy.

První možností je využití **klasického hydraulického obvodu** s velkým centrálním čerpadlem, nádrží a rozsáhlou sítí hadic. Ačkoliv jde o silový a ověřený systém, jeho úprava pro potřeby autonomního řízení je extrémně komplikovaná. Původně čistě mechanický systém totiž musí být pro propojení s počítačem dodatečně osazen obrovským množstvím elektroniky od drahých elektro-proporcionálních ventilů až po složitou síť dodatečných tlakových senzorů a snímačů polohy. Tento nutný nárůst sensoriky tvoří ze stroje vysoce komplexní systém, který je náročný na zástavbu kabeláže a náchylný na poruchy.[58]

Moderním a pro robotiku mnohem elegantnějším řešením je nasazení kompaktních jednotek **EHA (Electro-Hydraulic Actuator)**. U této technologie zcela odpadá centrální hydraulika i propojovací hadice. Každá pístnice má přímo na svém těle integrovaný malý elektromotor, miniaturní čerpadlo a vlastní, plně uzavřenou zásobu oleje. Celý systém je tak již z výroby koncipován pro digitální řízení. Z nadřazeného počítače robota k pístnici vede pouze napájecí a datový kabel. Elektromotor běží pouze ve chvíli, kdy je fyzicky vyžadován pohyb, čímž zcela odpadají ztráty typické pro neustále běžící centrální čerpadla. Pro aplikace s občasným silovým nasazením to představuje ideální řešení, protože nevyžaduje složitou externí sensoriku, je nenáročné na prostor a riziko masivního úniku oleje prakticky neexistuje.[59]

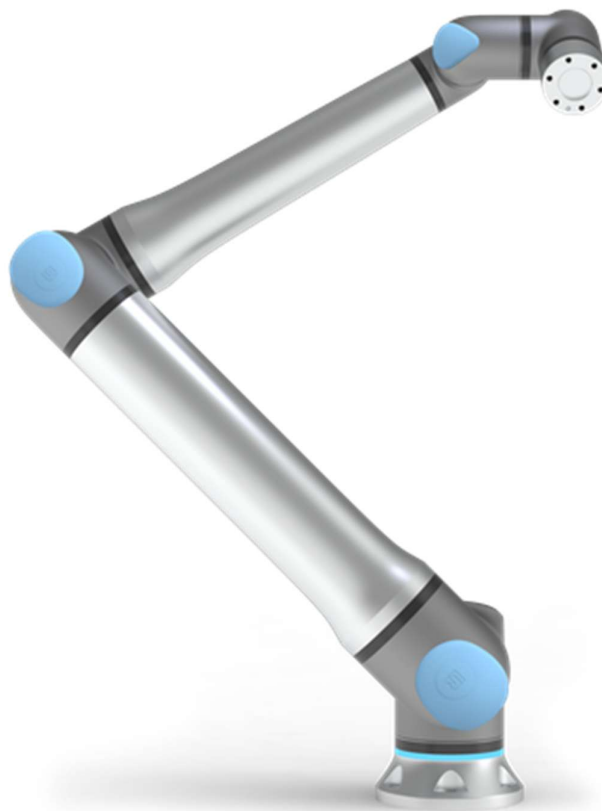


Obr. 2-29 Electro-hydraulic actuator [59]

Robotické manipulátory

Osazením robotického ramene na autonomní podvozek vzniká systém označovaný jako mobilní manipulátor. Samotné robotické rameno je v moderním pojetí plně elektrický mechanismus, složený ze soustavy na sebe navazujících ramen a rotačních kloubů. Každý kloub je poháněn vlastním kompaktním elektromotorem s přesnou převodovkou a snímačem polohy. Tato plně elektrická architektura přináší zásadní inženýrskou výhodu. Rameno lze neuvěřitelně snadno hardwarově i softwarově integrovat do stávajícího řídicího systému robota. Palubní počítač tak dokáže po jediné datové sběrnici synchronizovaně řídit jak pojezd samotného podvozku, tak kinematiku ramene v jednom plynulém celku.

Klíčovou předností robotického manipulátoru je jeho obrovská aplikační flexibilita. Na rozdíl od klasického bagru s pevnou lžící je koncový bod ramene navržen pro využití široké škály výměnných nástavců. Díky tomu může jeden robot plnit zcela odlišné úkoly od použití mechanických či vakuových uchopovačů pro manipulaci se stavebním materiálem, přes vrtací hlavy, až po trysky pro 3D tisk. Díky soustavě přesných elektromotorů a zpětné vazbě ze senzorů navíc dokáže rameno tyto nástavce polohovat s opakovatelnou přesností v řádech milimetrů, což umožňuje provádět i ty nejjemnější stavební operace.[60; 61]



Obr. 2-30 COBOT UR20 [62]

2.5 Legislativní omezení

Při návrhu autonomního stavebního robota je nezbytné zohlednit příslušné legislativní požadavky a mezinárodní normy, které definují pravidla pro jeho bezpečný provoz. Vzhledem ke specifickým stroje je jeho operační prostor definován jako uzavřené staveniště. Díky tomuto striktnímu vymezení nespadá robot pod složitou homologaci silničních vozidel určených pro veřejné komunikace, ale z pohledu legislativy je klasifikován jako mobilní strojní zařízení. Zásadním právním rámcem pro jeho uvedení do provozu v Evropské unii je Nařízení o strojních zařízeních (EU) 2023/1230, které nahrazuje dřívější Směrnicí 2006/42/ES. Tento předpis definuje povinné požadavky na ochranu zdraví a bezpečnost, přičemž nová legislativa již plně pokrývá rizika spojená se stroji využívajícími umělou inteligenci a plně autonomní navigaci. V praxi to pro návrh znamená, že pro získání certifikační značky CE musí stroj projít komplexním posouzením rizik. Každý potenciálně nebezpečný prvek, ať už se jedná o vyklápění korby nebo samotný pojezd, musí být zajištěn a odstíněn senzory tak, aby robot za žádných okolností neohrozil osoby ve svém okolí.[63]

Z hlediska samotného autonomního pohybu po staveništi se návrh opírá o mezinárodní oborovou normu ISO 17757, která řeší bezpečnost autonomních a poloautonomních strojů pro zemní práce. Tato norma je vytvořena přímo na míru zařízením, jako jsou autonomní dumpéry či nakladače, a funguje jako technická metodika pro jejich integraci do reálného provozu. Definuje přesné požadavky na systémy detekce překážek, funkce dálkového nouzového zastavení a pravidla pro interakci mezi roboty a lidmi na stejném pracovišti. Pro konstruovaného robota to představuje nutnost implementace výstražných systémů, kdy stroj musí před zahájením autonomního pohybu vydat zřetelný akustický či vizuální signál. Norma rovněž striktně předepisuje chování při poruše. Pokud robot ztratí přesný signál z GPS/RTK antény nebo spojení s nadřazeným dispečinkem, musí automaticky a bezpečně zastavit, dokud nedojde k obnovení komunikace.[64]

Zajištění bezpečnosti stroje se musí promítnout i do samotné elektroniky, což ošetřuje norma ISO 13849-1 zaměřená na bezpečnostní části řídicích systémů. Tento standard poskytuje pravidla pro návrh řídicí logiky s cílem minimalizovat riziko jejího selhání a hodnotí spolehlivost celého řetězce od senzoru až po akční člen. V inženýrské praxi to zakazuje použití běžné, necertifikované elektroniky pro kritické bezpečnostní funkce, jakými jsou řízení brzd, E-STOP nebo nouzové odpojení baterie. Celá trasa signálu od stisknutí bezpečnostního tlačítka až po odpojení hlavního stykače musí být navržena z vysoce spolehlivých průmyslových komponent. V praxi se tyto systémy hardwarově zálohují formou redundance, aby bylo zaručeno, že případný zkrat nebo softwarová chyba v navigaci nezpůsobí nekontrolovatelný pohyb tunového stroje.[65]

2.6 Identifikace příležitostí

Stavebnictví čelí v 21. století kaskádě výzev, od chronického nedostatku kvalifikovaných pracovníků až po stagnující produktivitu práce a rostoucí tlak na bezpečnost. V tomto prostředí se otevírá rozsáhlý prostor pro implementaci pokročilé robotiky a plné autonomie. Na rozdíl od veřejné dopravy, kde je zavádění autonomních vozidel bržděno složitou legislativou a nepředvídatelným prostředím veřejných komunikací, nabízejí staveniště ideální podmínky pro rychlou adopci těchto technologií. Jedná se o jasné definované, uzavřené zóny, kde stroje často plní těžké a opakující se úkoly. Plná autonomie zde představuje příležitost nejen k eliminaci lidského faktoru v nebezpečných podmínkách, ale také k radikálnímu zvýšení celkové efektivity nasazením v nepřetržitém provozu, a to bez nutnosti ohledu na únavu či střídání obsluhy.

Významná příležitost se rýsuje v redefinici samotného účelu a flexibility těžké techniky. Tradiční stavební stroje jsou historicky navrhovány jako úzce profilovaná, jednoúčelová zařízení. S nástupem plné autonomie a digitálního řízení se však otevírá cesta ke konceptu vysoce modulárních a univerzálních platforem. Pokud by byl autonomní podvozek koncipován jako flexibilní nosič, mohl by pomocí systému výměnných nástaveb plynule přecházet mezi zcela odlišnými úkoly. Nabízí se zde široké spektrum aplikací od integrace klasických přepravních koreb a terénních úprav pomocí radlic, přes využití specializovaných uchopovačů, až po možnou implementaci víceosých robotických ramen. Takový multifunkční přístup by v kombinaci s přímým napojením na digitální modely staveb (BIM) znamenal zásadní posun od izolovaných zemních prací k vysoce variabilnímu a propojenému stavebnímu ekosystému, kde jeden stroj dokáže v různých fázích projektu zastat práci hned několika tradičních mechanismů.

Další klíčovou oblastí pro inovace je celková transformace energetické architektury stroje. Stavebnictví je dosud silně závislé na konvenčních dieselových pohonech, avšak plná elektrifikace a přechod na čistě bateriové platformy představují logický a vysoce perspektivní krok. Nasazení elektrických pohonů umožňuje mnohem přesnější distribuci výkonu a vytváří stroj, který je lokálně zcela bezemisní a radikálně tišší. To otevírá nové příležitosti pro nasazení v hustě obydlených městských aglomeracích, při podzemních ražbách nebo uvnitř uzavřených hal, kde je použití spalovací techniky problematické. Tento čistý provoz lze navíc efektivně provázet s lokální produkcí energie z obnovitelných zdrojů přímo na staveništi, čímž se výrazně zvyšuje celková energetická soběstačnost a udržitelnost projektu.

Z hlediska průmyslového designu pak autonomie představuje zlomový bod v morfologii a estetice stavební techniky. Úplná absence nutnosti integrovat kabinu operátora, která po desetiletí diktovala proporce a uspořádání většiny strojů, poskytuje designérům nebývalou svobodu. Uvolňuje se tak prostor pro vytvoření zcela nové, čistě funkční architektury. Ta se může primárně zaměřit na ideální a nízko položené těžiště, optimalizaci prostorového uspořádání baterií a maximalizaci zorného pole pro nezbytné senzorické systémy bez kompromisů v podobě mrtvých úhlů. Estetika takového stroje již nemusí komunikovat pouze robustnost a hrubou sílu, jak tomu bylo doposud, ale nabízí se příležitost vyjádřit jeho technologickou sofistikovanost a kybernetickou přesnost. Vzniká tak nová vizuální identita moderního stavebnictví, která přetavuje poznatky z technických a designérských analýz do stroje, jenž je optimalizován primárně pro kooperaci s algoritmy, nikoliv s lidskými smysly.

3 CÍLE PRÁCE

Tato kapitola navazuje na předchozí analýzu, která se zaměřovala na problematiku autonomních mobilních robotů ve stavebním prostředí. Jejím cílem je jasně vymezit řešený problém, definovat okruh zákazníků, uživatelů a dalších zainteresovaných subjektů a rámcově posoudit tržní prostředí, cenové aspekty a uvažované výrobní postupy. Na základě těchto východisek jsou následně stanoveny hlavní i dílčí cíle diplomové práce.

3.1 Vymezení problému

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu autonomního mobilního robota určeného pro nasazení ve stavebním prostředí. Stavebnictví dlouhodobě čelí celé řadě systémových problémů, mezi které patří především nedostatek kvalifikované pracovní síly, vysoká fyzická náročnost práce, nízká produktivita a zvýšená míra bezpečnostních rizik na staveništích. Současně roste tlak na efektivitu, dodržování termínů a snižování provozních nákladů, což zvýrazňuje potřebu zavádění moderních technologií a automatizovaných řešení. Tyto skutečnosti vytvářejí prostor pro využití autonomních mobilních robotů, které mohou převzít opakující se, fyzicky náročné nebo rizikové úkony, optimalizovat logistické procesy a přispět ke zvýšení bezpečnosti i celkové efektivity stavebních činností.

3.1.1 Název produktu a jeho klasifikace

Předmětem diplomové práce je návrh autonomního mobilního robota určeného pro logistické a manipulační úlohy ve stavebním prostředí. Navrhované zařízení je koncipováno jako samostatně se pohybující technický prostředek, jehož úkolem je zajišťovat přepravu materiálu, náradí nebo technologických prvků v rámci staveniště a podporovat plynulost pracovních procesů. Robot je uvažován pro nasazení především na středních a větších stavebních projektech, kde dochází k častému pohybu materiálu. Z hlediska charakteru se jedná o dlouhodobě využitelný technický produkt s jasně definovaným okruhem uživatelů a specifickými provozními požadavky, který lze klasifikovat jako specializované zařízení určené pro zakázkovou nebo malosériovou výrobu.

3.1.2 Specifikace zákazníka

Zákazníkem navrhovaného produktu je firma působící v oblasti vývoje a výroby autonomních mobilních robotů a specializovaných stavebních technologií. Jedná se o technologicky orientované společnosti, které se zaměřují na inovativní řešení pro stavební průmysl a usilují o rozšíření svého produktového portfolia o nové autonomní systémy.

Typickým zákazníkem mohou být výrobci autonomních stavebních robotů, kteří reagují na rostoucí poptávku po automatizaci stavebních procesů a hledají konkurenceschopná, modulární a provozně odolná řešení. Pro tyto společnosti je klíčová technická proveditelnost návrhu, možnost přizpůsobení konkrétním projektům a potenciál produktu uspět na nově se formujícím trhu autonomních stavebních zařízení.

3.1.3 Specifikace spotřebitele

Spotřebitele navrhovaného autonomního mobilního robota lze rozdělit do dvou samostatných skupin, které se od sebe liší způsobem využívání produktu, mírou interakce i očekáváními kladenými na jeho funkčnost a provoz.

Primární spotřebitel

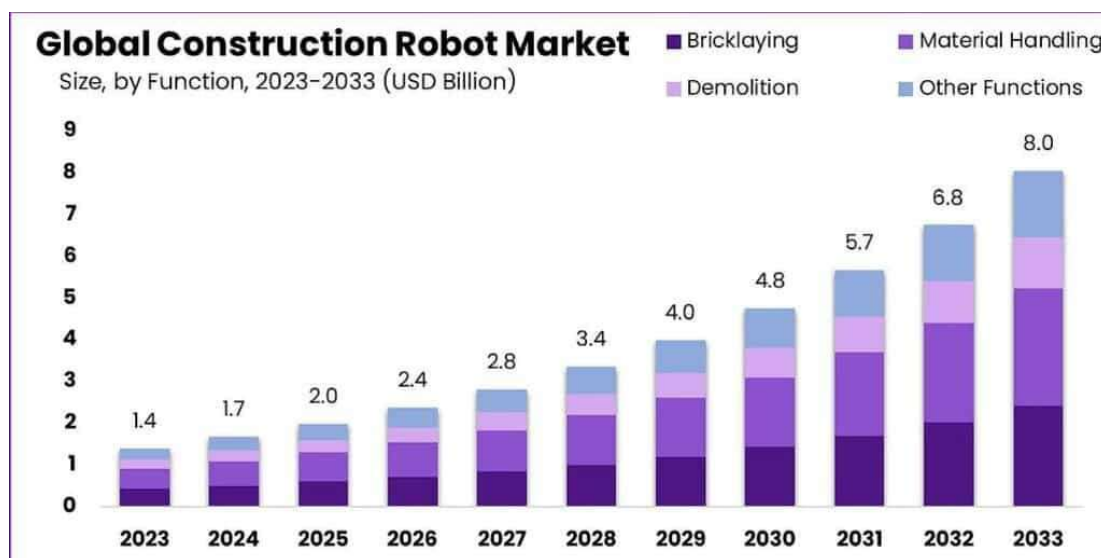
Primárním spotřebitelem jsou stavební a inženýrské společnosti, které autonomního robota nasazují přímo v rámci svých stavebních projektů. Jedná se zejména o generální dodavatele, subdodavatele nebo firmy specializované na logistiku, montážní práce a realizaci rozsáhlejších staveb. Tyto subjekty robota vlastní, rozhodují o jeho pořízení a zodpovídají za jeho integraci do stavebního procesu. Primární spotřebitel očekává především zvýšení efektivity práce, snížení časových prodlev a omezení fyzické zátěže pracovníků. Důraz je kladen na provozní spolehlivost, odolnost vůči náročným podmínkám staveniště, dlouhou životnost a možnost přizpůsobení konkrétním projektům. Z pohledu primárního spotřebitele je rovněž důležitá jednoduchá údržba, snadná konfigurace systému a kompatibilita s dalšími technologiemi využívanými na stavbě.

Sekundární spotřebitel

Sekundárním spotřebitelem je osoba, která s robotem přichází do přímého kontaktu při každodenním provozu, aniž by byla jeho vlastníkem. Jedná se zejména o stavební techniky, operátory, pracovníky zodpovědné za dohled nad provozem robota a servisní personál provádějící kontrolu, diagnostiku a údržbu zařízení. Tato skupina klade důraz na intuitivní ovládání, přehledné uživatelské rozhraní a bezpečný provoz v prostředí, kde se pohybují další pracovníci. Sekundární spotřebitel očekává, že robot bude snadno čitelný z hlediska svého chování, bude disponovat jasnými vizuálními signály a umožní rychlý zásah v případě poruchy nebo nestandardní situace. Z hlediska ergonomie je důležitá minimalizace nutnosti manuálních zásahů a fyzické manipulace, stejně jako dobrá přístupnost servisních a ovládacích prvků.

3.1.4 Specifikace možného trhu, ceny a použitých výrobních technologií

Z hlediska tržního uplatnění navrhovaného autonomního mobilního robota lze uvažovat o globálním trhu, přičemž klíčové regiony představují především ekonomicky vyspělé oblasti. Mezi tyto regiony patří zejména Evropa, Severní Amerika a vybrané části Asie, kde dlouhodobě roste tlak na zvyšování efektivity stavebních procesů, omezení závislosti na lidské pracovní síle a zlepšování bezpečnosti práce na staveništích. Tyto trhy se vyznačují dostatečnou technologickou infrastrukturou, investiční kapacitou a otevřeností vůči zavádění autonomních systémů. V dlouhodobém horizontu lze očekávat postupné rozšiřování využití autonomních stavebních robotů i do dalších regionů.



Obr. 3-1 Předpokládaný vývoj trhu s autonomními roboty ve stavebnictví [10]

Z hlediska výroby je navrhovaný produkt uvažován jako specializované zařízení vyráběné v malých sériích nebo formou zakázkové výroby. Vzhledem k relativně homogenním podmínkám stavebního prostředí v rámci cílového trhu není nutné zásadně přizpůsobovat základní konstrukci robota lokálním odlišnostem. Zakázková nebo malosériová výroba zároveň poskytuje prostor pro využití kvalitnějších materiálů a důraz na robustnost, která je pro stavební provoz klíčová.

Odhadovaná cena navrhovaného autonomního mobilního robota vychází z analýzy existujících řešení a z předběžného návrhu konstrukce, hmotnosti a použitých komponent. V závislosti na konkrétní konfiguraci, míře autonomie a vybavení se předpokládá cenové rozpětí v řádu vyšších statisíců až jednotek milionů korun. Výsledná cena bude ovlivněna zejména typem pohonného systému, kapacitou baterií, použitou senzorikou a úrovní softwarového řešení. Kromě samotného zařízení je nutné uvažovat také náklady spojené s integrací robota do provozu, jeho konfigurací a případným servisem.

Použité výrobní technologie vycházejí z požadavků na pevnost, odolnost a dlouhou životnost konstrukce. Nosné části robota jsou uvažovány z ocelových nebo hliníkových profilů vyráběných pomocí obrábění, tváření a svařování. Krytování a ochranné prvky mohou být realizovány z plastů nebo lehkých kovových slitin. Elektronické komponenty jsou založeny na standardní výrobě. Tento výrobní přístup podporuje jak funkční požadavky, tak i ekonomickou udržitelnost navrhovaného řešení.

3.1.5 Vymezení atributů a cílů produktu

Autonomní mobilní robot určený pro stavební prostředí představuje technologii, která se v současné době nachází ve fázi postupného vývoje a její praktické nasazení je zatím omezeno především na dílčí aplikace a testovací provozy. Na trhu se vyskytují převážně specializovaná řešení zaměřená na konkrétní úlohy, přičemž komplexní autonomní systémy schopné dlouhodobého provozu v reálných podmínkách staveniště jsou stále spíše výjimkou. Z tohoto důvodu není možné řadu konstrukčních a provozních aspektů ověřit na základě dlouhodobých zkušeností a návrh produktu vychází zejména z analýzy dostupných technických řešení, definovaných požadavků a modelových scénářů použití.

Hlavní cíle navrhovaného produktu vyplývají především z nároků kladených na jeho konstrukci a provoz v náročném a proměnlivém prostředí staveniště. Zásadním atributem je stabilita robota při pohybu po nerovném terénu, spolehlivý pohonný systém a schopnost bezpečného a předvídatelného pohybu v prostoru sdíleném s lidskou obsluhou. Konstrukční řešení a design robota musí vycházet z rozmístění vnitřních komponent, zejména pohonných jednotek, baterií a řídicí elektroniky, a zároveň respektovat prostorová omezení typická pro stavební provoz. Důraz je kladen na ochranu citlivých částí proti mechanickému poškození, prachu, vlhkosti a dalším nepříznivým vlivům, stejně jako na minimalizaci rizika kolizí s okolními objekty a pracovníky na staveništi.

Charakteristika	Cíle	Omezení	Funkce	Prostředky
Odolné materiálové a konstrukční řešení	✓			
Respektování rozměrů vnitřních komponent a jejich uspořádání		✓		
Tvarování a rozměry přizpůsobené pro pohyb na staveništi	✓	✓		
Autonomní řízení pohybu a navigace			✓	
Stabilita při jízdě v nerovném terénu	✓	✓		
Možnost přepravy nákladu do 1,5 t	✓		✓	
Zřetelné zvukové a vizuální signalizace				✓
Vhodná volba bateriového systému			✓	✓
Bezpečnost při práci v blízkosti lidí		✓		
Integrace senzorů – LiDAR, kamery, IMU	✓			✓
Odolnost vůči prachu, vlhkosti a vibracím			✓	
Snadný servis a údržba	✓			
Snadno dostupné ovládací prvky (vč. nouzového vypnutí)	✓			
Kompatibilita s digitálními systémy (BIM, IoT)	✓		✓	✓
Připojení pro dobíjení a diagnostiku			✓	
Propojení funkční a estetické stránky	✓			✓

Tabulka 3-1 Zhodnocení cílů

3.2 Cíle vývoje

Hlavním cílem vývoje je navrhnout koncepční design autonomního mobilního robota určeného pro provoz ve stavebním prostředí, který je schopen samostatného a bezpečného pohybu v rámci staveniště. Návrh usiluje o vytvoření uceleného řešení, jež reflektuje současné technologické možnosti a reaguje na požadavky efektivity, bezpečnosti a ergonomie. Výsledkem má být koncept autonomního zařízení, které podporuje pracovní procesy na stavbě a představuje realistický základ pro další technický vývoj a budoucí praktické nasazení.

3.2.1 Globální cíl

Globálním cílem navrhovaného produktu je vytvoření autonomního mobilního robota, který přispívá ke zvýšení efektivity a bezpečnosti stavebních procesů a současně nabízí smysluplné řešení pro stavební firmy. Cílem je navrhnout zařízení schopné dlouhodobého provozu v náročných podmínkách staveniště, které podporuje plynulost logistiky a omezuje potřebu manuální manipulace s materiálem.

3.2.2 Dílčí cíle

Dílčí cíle vývoje produktu, které směřují k vytvoření funkčního a realizovatelného řešení:

- Schopnost plně autonomního provozu ve stavebním prostředí bez nutnosti trvalého dohledu obsluhy
- Efektivní zajištění logistických a podpůrných činností na staveništi, zejména přepravy materiálu a vybavení
- Stabilní a bezpečný pohyb po nerovném, znečištěném a proměnlivém terénu typickém pro stavební provoz
- Vysoká manévrovatelnost umožňující pohyb v omezeném prostoru a přesné otáčení v blízkosti překážek
- Konstrukční řešení zajišťující ochranu vnitřních komponent proti prachu, vlhkosti a mechanickému namáhání
- Odolnost konstrukce vůči kolizím a nárazům vznikajícím při běžném provozu na staveništi
- Dlouhá provozní životnost zařízení při každodenním nasazení v náročných podmínkách
- Snadná přístupnost servisních a ovládacích prvků s cílem minimalizovat čas potřebný na údržbu a diagnostiku
- Možnost autonomního dobíjení odpovídající provoznímu režimu robota na stavbě

- Čitelný a funkčně orientovaný design, který podporuje bezpečnost, přehlednost a důvěru v chování robota

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

V této kapitole jsou představeny tři rozdílné koncepční přístupy k návrhu autonomního mobilního robota určeného pro stavební provoz. Jednotlivé varianty se soustředí na odlišné způsoby řešení funkčních částí, přičemž rozdíly se promítají také do tvarového řešení.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

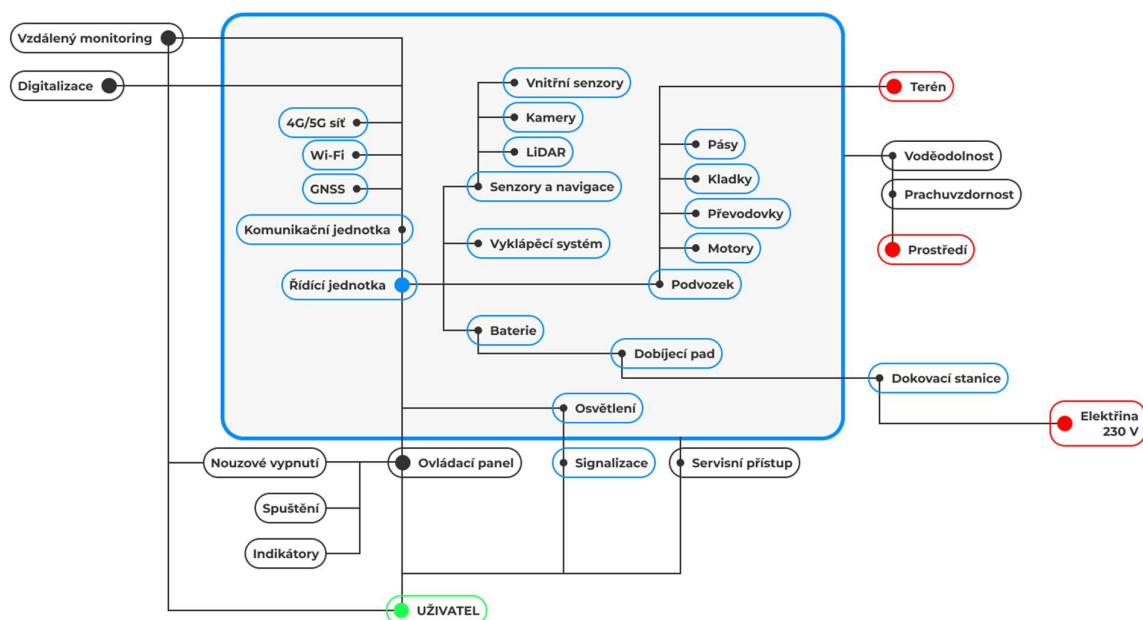
Pro další rozpracování koncepčních variant bylo nutné systematicky vymezit hlavní požadavky a okrajové podmínky, které ovlivňují výslednou podobu robota. V rámci této podkapitoly jsou proto shrnuty klíčové cíle a základní omezení vyplývající z provozu ve stavebním prostředí, technických možností a návrhových rozhodnutí, jež slouží jako vodítko pro posuzování jednotlivých variant z hlediska funkčnosti, konstrukce i designu.



Obr. 4-1 Strom cílů

4.2 Technická funkční analýza

Na základě provedené technické a funkční analýzy vzniklo schematické zobrazení typu glassbox, které slouží k přehlednému znázornění struktury navrhovaného autonomního mobilního robota. Toto schéma zachycuje hlavní funkční celky zařízení, jejich vzájemné vazby a principy spolupráce jednotlivých komponent. Glassbox umožňuje nahlédnout do vnitřního uspořádání robota, objasňuje tok energie, informací a pohybu a vytváří rámec pro další detailní rozpracování technického řešení a funkčních vztahů mezi jednotlivými částmi systému.



Obr. 4-2 Glassbox

4.2.1 Specifikace vnitřních komponent

Tato podkapitola se soustředí na přehled a popis klíčových vnitřních částí navrhovaného autonomního mobilního robota. Jednotlivé komponenty jsou posuzovány nejen z hlediska své funkce v rámci celého systému, ale také s ohledem na jejich prostorové nároky, orientační hmotnost a vzájemné vazby, které ovlivňují celkové uspořádání robota.

Baterie

Akumulátor tvoří základní zdroj energie autonomního mobilního robota a zajišťuje napájení pohonného systému, řídicí elektroniky i všech přídavných zařízení. V rámci návrhu je uvažován trakční lithium-iontový akumulátor s celkovou kapacitou přibližně 35 kWh, která umožňuje autonomní provoz robota po dobu několika hodin v závislosti na hmotnosti nákladu a provozním režimu. Orientační rozměry akumulátoru se pohybují přibližně $1300 \times 800 \times 250$ mm a jeho hmotnost je odhadována v rozmezí 250–300 kg, což z něj činí jeden z nejtěžších vnitřních komponentů systému. Z tohoto důvodu je akumulátor umístěn v dolní části konstrukce robota, kde přispívá ke snížení těžiště a zlepšení stability při pohybu po nerovném stavebním terénu. Akumulátor je integrován do nosné struktury podvozku a chráněn uzavřeným krytem s odpovídajícím stupněm krytí proti prachu a vlhkosti. Součástí akumulátorového systému je rovněž bateriový management systém, který zajišťuje řízení nabíjení, ochranu proti přebíjení a hlubokému vybití a sledování provozních teplot, přičemž jeho funkce jsou úzce provázány se systémem dobíjení a celkovou bezpečností robota.

Dobíjecí systém

Vnitřní část dobíjecího systému autonomního mobilního robota je řešena formou bezdrátového indukčního nabíjení, které umožňuje automatické doplňování energie bez nutnosti mechanického spojení. Příjímací cívka je integrována ve spodní části robota a je navržena pro spolupráci s externím dobíjecím padem. Celý systém je dimenzován na nabíjecí výkon přibližně 20 kW, což umožňuje efektivní dobíjení trakčního akumulátoru během provozních přestávek. Vnitřní výkonová elektronika zajišťující usměrnění a řízení nabíjecího procesu je prostorově soustředěna v blízkosti akumulátoru a je propojena s bateriovým managementem. Orientační rozměry celého dobíjecího padu činí přibližně $600 \times 600 \times 50$ mm a jeho hmotnost se pohybuje v rozmezí 80–120 kg.

Řídící jednotka

Řídící systém autonomního mobilního robota je tvořen kombinací výpočetního modulu NVIDIA Jetson AGX Orin a bezpečnostního programovatelného automatu Siemens S7-1200, které společně zajišťují autonomní chování i provozní bezpečnost zařízení. Modul NVIDIA Jetson AGX Orin slouží jako hlavní výpočetní jednotka pro zpracování dat ze senzorů, autonomní navigaci, plánování trajektorie a vyhodnocování okolního prostředí, přičemž poskytuje vysoký výpočetní výkon při relativně kompaktních rozměrech. Bezpečnostní PLC Siemens S7-1200 je určeno pro řízení kritických funkcí robota, jako je řízení pohonu, nouzové zastavení a dohled nad bezpečnostními okruhy, a zajišťuje provoz v souladu s průmyslovými bezpečnostními standardy. Obě jednotky jsou integrovány v chráněném krytu umístěném uvnitř konstrukce robota, jehož orientační rozměry činí přibližně $350 \times 250 \times 120$ mm a hmotnost se pohybuje kolem 6–8 kg.

Systém senzorů

Senzorický systém autonomního mobilního robota je navržen jako kombinace prostorových, vizuálních a inerciálních senzorů, které společně zajišťují orientaci robota v prostředí, detekci překážek a bezpečný autonomní pohyb. Základním prvkem systému je LiDAR senzor, který slouží k mapování okolního prostoru a detekci statických i dynamických objektů v reálném čase. Pro vizuální vnímání prostředí jsou použity kamery, konkrétně stereo kamery a RGB-D kamery pro detailnější snímání blízkého okolí a identifikaci překážek v pracovní zóně robota. Doplňujícím prvkem je inerciální měřicí jednotka (IMU), která poskytuje informace o zrychlení, náklonu a orientaci robota a podporuje stabilní navigaci zejména na nerovném terénu. Součástí senzorického systému jsou rovněž stavové senzory, jako jsou enkodéry kol, snímače polohy, proudové a teplotní senzory, které slouží k monitorování provozního stavu robota a k zajištění bezpečného a spolehlivého chodu celého systému.

GPS a komunikace

Robot je vybaven GNSS modulem s podporou RTK pro venkovní polohování a hybridním komunikačním systémem zahrnujícím Wi-Fi pro lokální přístup a mobilní síť (4G / 5G) pro vzdálenou telemetrii a diagnostiku. Taková kombinace zajišťuje připojení jak v bezprostřední blízkosti obsluhy, tak ve vzdáleném režimu bez závislosti na lokální infrastruktuře. Základní vnitřní komunikace robota by měla být postavena na sběrnici CAN, doplněné o průmyslový Ethernet pro nadřazené a datově náročné systémy.

Motory

Pohon robota je řešen pomocí dvou nezávislých kompaktních trakčních jednotek, které jsou konstrukčně integrovány přímo do nábojů hnacích kol pásů. Každá jednotka představuje zapouzdřený celek sestávající z vysokoúčinného synchronního elektromotoru s permanentními magnety (PMSM) o výkonu 10-15 kW a vícešupňové planetové převodovky s převodovým poměrem v řádu 1:30 až 1:50. Tento převod zajišťuje transformaci vysokých otáček motoru na požadovaný krouticí moment nezbytný pro pohyb v náročném terénu. Sestava o přibližných rozměrech $\varnothing 250 \times 300$ mm a hmotnosti 35–45 kg obsahuje rovněž integrovanou elektromagnetickou parkovací brzdu

Vyklápěcí systém

Pro manipulaci s ložnou plochou byly zvoleny dva kompaktní elektro-hydraulické aktuátory. Tyto jednotky integruje elektromotor, hydrogenerátor, nádrž na hydraulickou kapalinu a teleskopický přímočarý hydromotor do jednoho samostatného konstrukčního celku. Zvolený aktuátor pracuje s napětím palubní sítě a je schopen vyvinout výtlačnou sílu v řádu 60–80 kN.

4.2.2 Specifikace vnějších komponent

Tato kapitola se zabývá vnějšími prvky autonomního mobilního robota, které přímo ovlivňují jeho funkčnost, odolnost a bezpečný provoz ve stavebním prostředí. Popsány jsou komponenty vystavené okolním vlivům, jež se podílejí na ochraně zařízení, orientaci v prostoru a čitelnosti chování robota vůči okolí. Pozornost je věnována jejich funkčnímu významu, umístění na konstrukci a základním rozměrovým souvislostem.

Podvozek a pásy

Podvozek robota je koncipován jako pásový systém navržený s ohledem na provoz v náročném a proměnlivém prostředí stavenišť. Použití pásů umožňuje rovnoměrné rozložení hmotnosti, čímž se snižuje měrný tlak na podklad a zvyšuje stabilita při pohybu po nerovném, měkkém nebo sypkém povrchu. Tento typ podvozku zároveň zlepšuje trakční schopnosti robota při překonávání překážek, prahů a lokálních výškových nerovností. Konstrukce podvozku je navržena jako robustní a částečně krytá, aby byly pohyblivé části chráněny před prachem, blátem a stavebními nečistotami, které by mohly negativně ovlivnit životnost a spolehlivost celého systému.

Systém osvětlení a viditelnost

Systém osvětlení a viditelnosti je navržen s cílem zajistit bezpečný a spolehlivý provoz robota v prostředí se zhoršenými světelnými podmínkami. Součástí řešení jsou výkonná LED pracovní světla orientovaná na pracovní prostor před a za robotem, doplněná o signalizační prvky zvyšující jeho viditelnost pro okolní pracovníky. Osvětlení je koncipováno tak, aby podporovalo nejen lidskou orientaci v okolí stroje, ale také správnou funkci kamerových a senzorických systémů, přičemž je zajištěno pokrytí všech klíčových směrů.

4.3 Návrh alternativních řešení

Prvotní část tvůrčího procesu zahrnovala současně volné skicování variantních řešení a hledání základní logiky uspořádání komponent. Tyto prvotní ideové skici měly již na počátku sloužit především k ověření proporcí mezi pásovým podvozkem a ložnou plochou a k definování základní siluety stroje. Zatímco některé skici zkoumaly spíše organické a futuristické tvarosloví, jiné se držely přísně utilitárních a geometrických forem, které by lépe korespondovaly s výrobními technologiemi.

Specifikace technického uspořádání hrála klíčovou roli při formování exteriéru, neboť vnitřní komponenty se výrazně propisovaly do celkového objemu. Bylo nezbytné nalézt vhodný prostor pro umístění všech komponent tak, aby bylo zachováno nízké těžiště pro stabilitu v terénu. Design tak musel balancovat mezi požadavkem na maximální ložnou plochu a nutností vytvořit ochrannou schránku pro citlivé technologie.

Následně už byly rozpracovány hrubé 3D modely, které sloužily k testování celkového konceptu bez zabíhání do konstrukčních detailů. Vzhledem k tomu, že kategorie autonomních stavebních robotů této velikosti je na trhu novinkou a postrádá ustálené přístupy, poskytovalo zadání značnou volnost, ale zároveň nutilo hledat inspiraci v širším kontextu. Tvarosloví čerpalo prvky jak z klasické těžké stavební techniky, tak z oblasti moderní robotiky, která evokuje technologickou vyspělost. Cílem bylo vytvořit objekt, který

působí odolně jako pracovní stroj, ale zároveň svým vzhledem jasně deklaruje, že se jedná o inteligentní a autonomní zařízení.

4.3.1 Varianta I

První varianta reprezentuje minimalistický přístup k tvarování, jehož cílem je vizuální sjednocení podvozkové platformy a nákladové části do jednoho monolitického celku. Dominantním prvkem je zde plynulá, prohnutá boční plocha, která organicky obepíná celé tělo robota a vytváří tak elegantní „pas“, jenž opticky odlehčuje hmotu mezi pásy a horní hranou korby. Funkční zóny, jako jsou přední a zadní nárazníky ukrývající senzoriku, z tohoto základního objemu jasně vystupují ve formě předsazených, silně zaoblených bloků, což stroji dodává robustní, avšak neagresivní výraz.

Samotný ložný prostor je zde koncipován jako hluboká výklopná korba, která však není pojata jako pouhá utilitární nástavba. Ve výchozí poloze její linie plynule navazují na základní tvarosloví karoserie, čímž je zachována designová čistota celku. Toto řešení nabízí díky vysokým bočnicím velkorysý objem, který je spolu s funkcí vyklápění ideální zejména pro efektivní transport a složení sypkých materiálů, jako je zemina či štěrk. Uzavřený kónický tvar korby navíc eliminuje riziko ztráty nákladu během jízdy, ačkoliv pevně daná geometrie může představovat limit při manipulaci s kusovými břemeny.



Obr. 4-3 Varianta I, zepředu



Obr. 4-4 Varianta I, zezadu

4.3.2 Varianta II

Druhá varianta se odklání od tradičního užitkového vzhledu a přichází s výrazně organickým tvaroslovím, které sjednocuje podvozek i nástavbu do jednoho plynulého, aerodynamicky působícího celku. Karoserie zde funguje jako ochranná skořepina, která vizuálně změkčuje technický charakter stroje a dodává mu futuristický, avšak přívětivý výraz. Tento přístup uzavřené formy zajišťuje, že žádné konstrukční prvky (s výjimkou ramene) nevystupují z obrysu stroje, což přispívá k lepší průchodnosti stísněnými prostory a minimalizuje riziko zachycení o překážky.

Zásadní změnou oproti první variantě je koncepce ložné plochy, která je zde plně integrována do horní části trupu robota. Místo hluboké korby disponuje tato varianta mělkou úložnou vanou s výraznou texturou dna, která je materiálově i barevně odlišena od zbytku karoserie. Toto řešení sice nabízí menší přepravní objem a kvůli absenci výklopného mechanismu a vysokých bočnic je méně vhodné pro sypké materiály, avšak tento handicap je vyvážen přítomností víceosého robotického manipulátoru. Ten posouvá stroj z role pasivního přepravníku do role aktivního pracovníka, který je schopen si v rámci nosnosti ramene materiál či nástroje samostatně naložit i složit, čímž výrazně zvyšuje svou autonomii na staveništi.



Obr. 4-5 Varianta II, zepředu



Obr. 4-6 Varianta II, zezadu

4.3.3 Varianta III

Třetí varianta přináší do návrhu výrazně technický a dynamický ráz, který je definován ostře řezanými rysy a lomenými plochami. Na rozdíl od předchozích přístupů zde design pracuje s principem, kde samotné tvarování karoserie přímo definuje a ohraničuje jednotlivé funkční plochy. Ostře hrany a zkosení tak nejsou pouze estetickým prvkem, ale logicky navádějí pozorovatele po konstrukci stroje a zvýrazňují ochranné zóny podvozku a sensoriky, což navozuje dojem odolnosti a strojové přesnosti.

Výrazným rysem tohoto konceptu je striktní tvarové oddělení ložného prostoru od samotné pojezdové platformy. Korba zde nevyrůstá plynule z podvozku, ale vystupuje jako samostatný, jasně ohraničený prvek. Tato vizuální separace hmoty dává stroji lehčí výraz a zároveň svou logikou přirozeně komunikuje koncept modularity. Uživatel tak na první pohled vnímá, že horní nástavba není pevnou součástí šasi, což naznačuje možnost její případné výměny.



Obr. 4-7 Varianta III, zepředu



Obr. 4-8 Varianta III, zezadu

4.4 Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího

Předložené koncepční návrhy byly podrobeny komparativní analýze na základě deseti stanovených kritérií (viz Tabulka 2), která reflektují jak estetické nároky, tak především technologické a provozní aspekty autonomního stroje. Hodnocení probíhalo na bodové škále 1–10, přičemž cílem nebylo pouze mechanické sečtení bodů, ale především identifikace klíčových vlastností, které definují životaschopnost produktu na trhu. Zatímco základní parametry pohonu a podvozku byly definovány již v úvodu práce, tato fáze se soustředila na architekturu nástavby, interakci s nákladem a integraci senzorických systémů.

Varianta I se v hodnocení ukázala jako stabilní, avšak konzervativní řešení. Její monolitické tvarování sice nabízí vizuální čistotu a maximalizuje objem pro sypké hmoty, avšak v kontextu moderní robotiky naráží na své limity. Hlavním nedostatkem se ukázala být nízká míra modularity a výrobní náročnost rozměrných karosářských dílů. Ačkoliv jde o esteticky vyvážený návrh, postrádá výraznější inovativní prvek, který by produkt odlišil od konvenční techniky.

KRITÉRIUM HODNOCENÍ	VARIANTA I	VARIANTA II	VARIANTA III
Sjednocení funkční a vizuální identity	9	9	6
Jednoduchost výroby	4	2	9
Využitelnost nákladového prostoru	9	4	8
Míra autonomie	5	10	6
Ochrana komponent (odolnost)	6	8	9
Modularita a variabilita	2	5	10
Servisní přístup	5	3	9
Originalita a inovace	6	9	5
Dynamika vzhledu	6	9	8
Začlenění technologií	6	10	8
Celkové skóre	58	69	78

Tabulka 4-1 Zhodnocení variant

Naproti tomu Varianta II představovala nejprogresivnější směr. Díky organickému tvarování a integraci manipulátoru získala vysoké hodnocení v oblasti autonomie a designové dynamiky. Její „uzavřená“ koncepce navíc výborně chrání citlivé vnitřní komponenty. Nicméně, praktická využitelnost byla zásadně limitována malou ložnou plochou a extrémní složitostí výroby. Tato varianta tak zůstala spíše vizionářskou studií, která je v čisté podobě pro sériovou výrobu pracovního stroje neefektivní.

Vítězem bodového hodnocení se stala Varianta III, a to především díky svému důrazu na funkci. Striktní oddělení podvozkové platformy od nástavby přináší bezkonkurenční modularitu a servisní přístupnost, což jsou pro provozovatele klíčové benefity. Její ostře řezané rysy navíc dobře korespondují s představou odolného stroje.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Předběžný návrh posouvá vítězný koncept do podoby reálného konstrukčního a designérského řešení. Protože finální vzhled vzniká spojením dvou předchozích variant, bude hlavním úkolem této kapitoly aplikovat dynamické tvarosloví na funkční a modulární základ stroje. Klíčovým krokem bude optimalizace prostorového uspořádání vnitřních komponent, volba materiálů a kultivace vnějších ploch tak, aby vyhovovaly jak technologickým limitům, tak požadavkům na ochranu. Výsledkem této etapy je pokročilý model, který již definuje veškeré podstatné funkční celky a slouží jako pevné východisko pro finální detailování produktu.

5.1 Určení tvarů, rozměrů a materiálů

5.1.1 Tvar

Finální podoba pojízdné platformy vznikla syntézou předchozích dvou koncepčních návrhů. Cílem bylo vytvořit tvarosloví, které propojí technickou logiku a modularitu s dynamickým a vizuálně uceleným designem. Výsledná geometrie šasi je tak záměrně koncipována jako robustní ochranná skořepina, která chrání vnitřní technologie před náročnými podmínkami staveniště, ale zároveň si zachovává vizuální lehkost a moderní výraz autonomního stroje. Při modelování byl kladen primární důraz na funkčnost, snadnou údržbu a celkovou mechanickou odolnost vnějších ploch.

Klíčovým aspektem návrhu platformy je její univerzálnost a připravenost pro nesení rozličných nástaveb. Konstrukce rámu a kapotáže je uzpůsobena tak, aby umožňovala integraci vyklápěcího mechanismu a efektivní spolupráci se dvěma odlišnými typy nákladových modulů. Prvním z nich je hluboká korba optimalizovaná pro transport sypkých materiálů, druhým pak otevřená ložná plocha určená pro manipulaci s kusovými břemeny. Tvarování samotného podvozku tak vytváří stabilní a vizuálně sjednocenou základnu, která funguje konzistentně bez ohledu na to, který z těchto modulů je aktuálně nasazen.

Tvarování robota s nástavbou pro kusová břemena

Design modulu určeného pro transport kusového materiálu a technického vybavení je definován především požadavkem na maximální využitelnost ložné plochy a snadnou přístupnost. Na rozdíl od objemné korby je zde zvolena koncepce otevřené platformy s plochým dnem, která je po obvodu vymezena nízkými bočnicemi. Tyto lemy plní primárně zádržnou funkci, aby nedocházelo k sesouvání nákladu vlivem vibrací při jízdě, avšak jejich výška je záměrně minimalizována, aby nebránila manipulaci s břemeny a neomezovala pracovní rozsah robotického ramene.

Významným aspektem návrhu je tvarová integrace této nástavby se spodní pojízdnou platformou. Ačkoliv se jedná o funkčně samostatný výměnný modul, jeho vnější linie nejsou řešeny jako prostý kvádr. Boční profil nástavby plynule navazuje na křivky blatníků a krytů pásů podvozku, čímž vzniká vizuální kontinuita celého stroje. Toto jemné protvarování vnějších ploch zbavuje robota dojmu strohé účelovosti a sjednocuje horní a dolní část do jednoho kompaktního, esteticky vyváženého celku.



Obr. 5-1 Tvarování robota s nástavbou pro kusová břemena, pohled zepředu



Obr. 5-2 Tvarování robota s nástavbou pro kusová břemena, pohled zezadu

Tvarování robota s nástavbou pro sypké materiály

Alternativní modul, koncipovaný pro transport zeminy, suti a kameniva, přistupuje k tvarování s důrazem na maximalizaci přepravního objemu při zachování kompaktního půdorysu stroje. Na rozdíl od ploché platformy je zde hmota formována do podoby hluboké vany s výrazně zvýšenými bočnicemi. Jejich profil není kolmý, nýbrž se směrem vzhůru mírně rozevívá, což nejen usnadňuje plnění korby nakladačem či vlastním ramenem robota, ale také zajišťuje lepší vysypávání materiálu při sklápění, kdy se eliminuje riziko ulpívání vlhké zeminy v rozích.

I v případě tohoto robustního modulu bylo dbáno na estetickou provázanost s podvozkem. Vnější plášť korby kopíruje zaoblení blatníků a využívá stejných stylistických linek, díky čemuž stroj i v této těžké konfiguraci působí jako integrovaný designový celek, nikoliv jako náhodná sestava komponent.



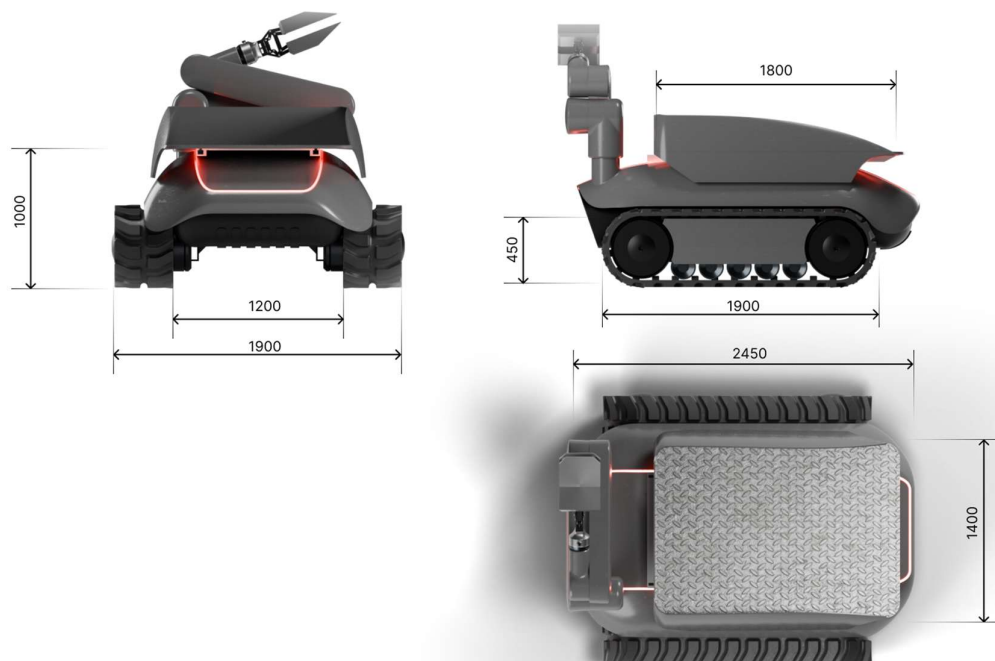
Obr. 5-3 Tvarování robota s nástavbou pro sypké materiály, pohled zepředu



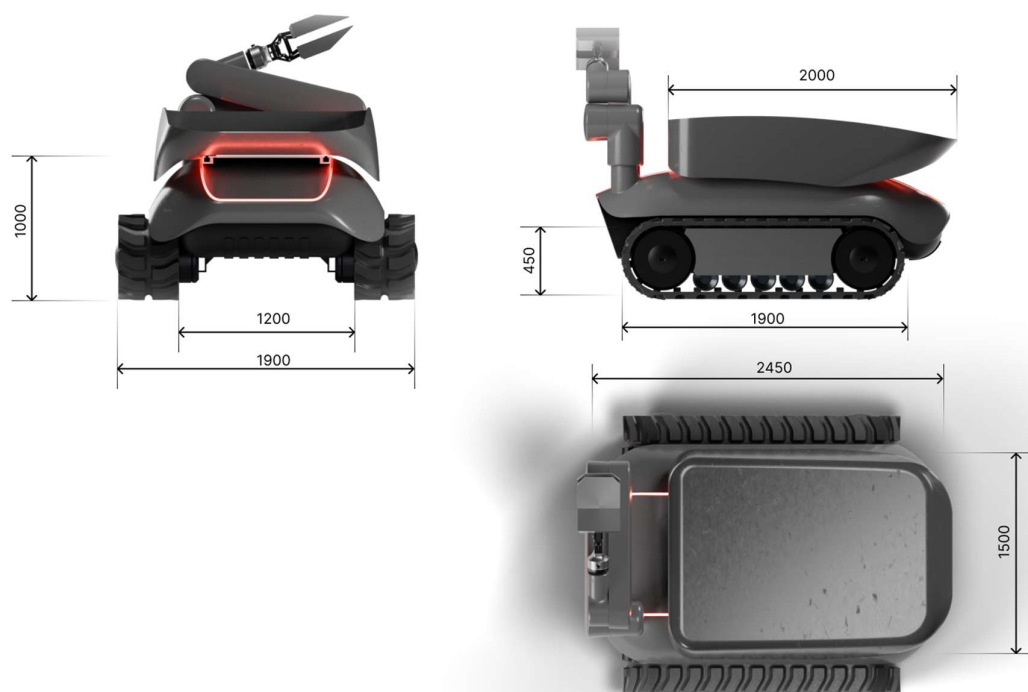
Obr. 5-4 Tvarování robota s nástavbou pro sypké materiály, pohled zezadu

5.1.2 Rozměry

Celkové rozměrové řešení stroje není výsledkem náhodného tvarování, ale vychází striktně z provozních požadavků na manipulaci s materiálem. Výchozím parametrem, který determinoval základní proporce robota, se stala velikost ložné plochy. Ta byla dimenzována tak, aby umožňovala transport nákladu odpovídajícího půdorysu dvou standardních europalet (1200×1600 mm). Tomuto klíčovému požadavku byla následně přizpůsobena geometrie pásového podvozku, jehož vnitřní objem musel být současně navržen s dostatečnou rezervou pro integraci komponent.

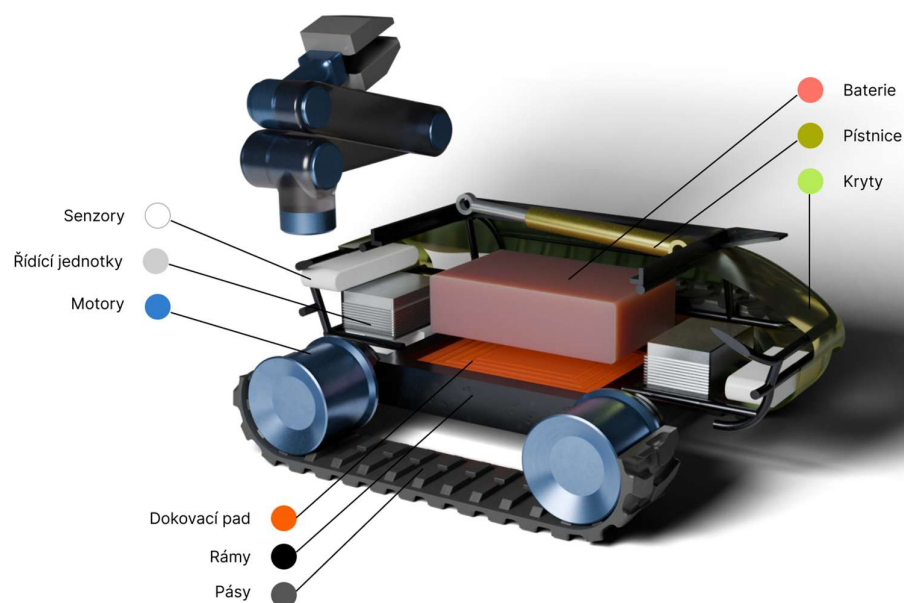


Obr. 5-5 Rozměry robota s nástavbou pro kusová břemena



Obr. 5-6 Rozměry robota s nástavbou pro sypké materiály

5.1.3 Materiály



Obr. 5-7 Průhledové schéma

Rámy a nosná konstrukce: Jako páteř celého stroje slouží svařenec z konstrukční oceli, která byla zvolena pro svou vysokou mez kluzu a schopnost odolávat cyklickému dynamickému namáhání při jízdě v terénu. Ocel zajišťuje nezbytnou tuhost šasi a bezpečné uložení těžkých bateriových modulů. Pro méně namáhané části rámu a nástaveb připadá v úvahu využití hliníkových slitin, které výrazně snižují těžiště a celkovou hmotnost stroje.

Krytování a karoserie: Vnější plášť robota je koncipován jako multimateriálová sestava, která kombinuje specifické vlastnosti kovů a technických plastů. Pro prvky vyžadující vysokou strukturální pevnost a odolnost proti proražení se počítá s využitím oceli či hliníkových slitin. Pro tvarově složitější panely karoserie a transparentní či ochranné kryty jsou naopak zvažovány odolné plasty, konkrétně dicyklopentadien (DCPD) a polykarbonát (PC). Tato volba materiálů umožňuje flexibilně reagovat na požadavky jednotlivých zón stroje od rázové houževnatosti a nízké hmotnosti až po estetickou kvalitu povrchu.

Pásový podvozek a těsnění: Pro zajištění trakce jsou navrženy kontinuální pryžové pásy vyztužené vnitřním ocelovým kordem, což je standard pro stavební techniku zajišťující dlouhou životnost. Pro těsnění, průchodky kabeláže a krytí elektroniky (IP ochrana) jsou využity syntetické kaučuky. Konkrétně se jedná o nitrilový kaučuk (NBR) pro odolnost vůči olejům a mazivům, a EPDM či silikon pro prvky vystavené UV záření a teplotním výkyvům.

Pohonné jednotky: Konstrukce trakčních elektromotorů a aktuátorů využívá pro statorové a rotorové plechy speciální elektrotechnickou ocel s nízkými ztrátami. Vinutí je realizováno z elektrotechnické mědi pro zajištění maximální vodivosti a účinnosti. Pláště motorů a chladiče jsou vyrobeny z hliníku, který díky své tepelné vodivosti efektivně odvádí odpadní teplo z pohonného ústrojí.

Elektronika: Základním materiálem pro řídicí jednotky a senzoriku jsou desky plošných spojů (PCB) na bázi sklolaminátu FR4 s měděnými cestami. Pro konektory, pouzdra senzorů a izolační prvky je využit polyamid (PA66) a další technické plasty, které zajišťují mechanickou pevnost a teplotní odolnost elektronických komponent.

KOMPONENTA	ODHADOVANÁ HMOTNOST
Rám	250 – 400 kg
Podvozek	150 – 200 kg
Motory	120 – 200 kg
Baterie	150 – 400 kg
Elektronika	30 – 40 kg
Další materiál	20 – 50 kg
Celkový odhad (průměr)	~1 090 kg

Tabulka 5-1 Odhad hmotnosti komponent

5.2 Odhad výrobních nákladů

Ekonomická analýza výrobních nákladů slouží jako indikátor tržní realizovatelnosti navrženého řešení. Kalkulace byla sestavena na základě předpokládaných cen klíčových nakupovaných komponent a odhadu nákladů na výrobu vlastních konstrukčních dílů. Z rozpočtu je patrné, že dominantní nákladovou položku tvoří v souladu s trendy v emobilitě pohonná soustava, konkrétně sestava dvou trakčních elektromotorů s převodovkami a vysokokapacitní bateriový modul. Významnou část investice dále představuje robustní mechanická konstrukce podvozku a rámu, dimenzovaná na vysokou zátěž. Do celkového odhadu byly zahrnuty i nemateriálové náklady spojené s finální montáží, kontrolou kvality (QA) a nezbytnou certifikací pro uvedení stroje do provozu.

Následující tabulka shrnuje předpokládané cenové rozpětí pro kusovou až malosériovou výrobu.

KOMPONENTY	CENA
Rám	84 600 – 120 800 Kč
Podvozek (pásky, kladky, mechanismy)	96 600 – 144 900 Kč
Motory a převodovky (2× jednotka)	120 800 – 193 300 Kč
Bateriový pack	108 700 – 193 300 Kč
Elektronika (řídící jednotky, senzory, atd.)	72 500 – 120 800 Kč
Krytování	16 900 – 36 200 Kč
Montáž a testování	36 200 – 60 400 Kč
Tooling + QA amortizace	12 100 – 24 200 Kč
Certifikace	20 000 – 60 000 Kč
Celkem	568 000 – 953 000 Kč

Tabulka 5-2 Odhad ceny

5.3 Matematický model

5.3.1 Provoz a energetická bilance

Cílem matematického modelu je ověření provozní efektivity navrženého řešení. Klíčovým parametrem pro nasazení autonomního robota na staveništi je poměr mezi dobou aktivní práce a dobou nezbytnou pro dobíjení. Výpočet vychází z navržené konfigurace trakčních LiFePO4 baterií o celkové kapacitě 34 kWh, která je vzhledem k odhadované hmotnosti stroje 1100 kg a užitečnému zatížení až 1500 kg dimenzována pro zajištění robustní energetické rezervy v cyklickém provozu.

Pro stanovení doby provozu byl vytvořen model průměrné hodinové spotřeby energie (P_{total}), který zohledňuje čtyři hlavní složky odběru: trakční pohon v náročném terénu, provoz pracovních nástaveb (hydraulika/aktuátory), napájení palubní elektroniky (AI výpočty, LIDAR, senzorika) a aktivní termomanagement (TMS).

SYSTÉM	CHARAKTERISTIKA PROVOZU	ODHADOVANÝ PRŮMĚRNÝ PŘÍKON
Trakční systém	Jízda v terénu, valivý odpor pásů, $v \approx 4 \text{ km/h}$	4,5 kW
Pracovní nástavby	Cyklické zvedání korby / manipulace ramenem	1,5 kW
Elektronika a řízení	Výpočetní jednotky, senzory, chlazení, osvětlení	0,5 kW
Termomanagement	Aktivní chlazení baterie a trakčních motorů	1,5 kW
Celkem (P_{total})	Průměrná kombinovaná zátěž	8,0 kW

Tabulka 5-3 Odhad energetické náročnosti systémů

Při uvažování využitelné kapacity v bezpečném okně 10 % až 90 % SoC (pro zajištění životnosti článků) je k dispozici 27,2 kWh energie. Doba autonomního provozu (T_{op}) je pak dána vztahem:

$$T_{op} = \frac{E_{bat} \cdot DoD}{P_{total}} = \frac{27,2}{8} \approx 3,4 \text{ hod}$$

Výsledek ukazuje, že stroj je schopen na jedno nabití pracovat přibližně 3,5 hodiny v maximálním zatížení.

Koncept počítá s využitím automatizované bezdrátové nabíjecí stanice s výkonem 20 kW. Při kalkulaci je nutné zohlednit účinnost bezdrátového přenosu energie ($\eta \approx 0,9$) a vlastní spotřebu robota během nabíjení, kdy je nutné napájet řídicí jednotku a aktivní chlazení baterie ($P_{idle} = 1,5$ kW). Čistý nabíjecí výkon směřující do baterie je tedy 16,5 kW. Reálný nabíjecí čas nutný pro doplnění využitelné kapacity (jednoho cyklu) je vypočten následovně:

$$T_{charg} = \frac{E_{bat}}{P_{pad} \cdot \eta - P_{idle}} = \frac{27,2}{20 \cdot 0,9 - 1,5} \approx 1,65 \text{ hod}$$

Z provedené energetické bilance je zřejmé, že zvolená kapacita akumulátoru 34 kWh představuje optimální kompromis mezi celkovou hmotností stroje a jeho provozní dostupností. Ačkoliv energetická náročnost trakčního systému v terénu a výkonných hydraulických prvků neumožňuje nepřetržitý provoz na jedno nabití, tak je robot navržen pro 24hodinový provoz metodou cyklování. Stroj střídá přibližně 3,5 hodiny aktivní práce s 1,5 hodinou rychlého dobíjení. Tyto nabíjecí bloky efektivně korespondují s technologickými přestávkami a střídáním směn lidských pracovníků na staveništi. Provozní efektivita je navíc zvýšena strategií příležitostného dobíjení. Pokud má robot během směny prostoj, může tyto krátké časové úseky využít k průběžnému doplňování energie. Tím se operativně doplňuje stav nabití a reálná doba aktivního nasazení se tak dále prodlužuje bez nutnosti zařazení plného nabíjecího cyklu. Případné další navyšování kapacity baterie by vedlo k neúměrnému nárůstu hmotnosti na úkor užitečného zatížení.

6 DETAILNÍ NÁVRH

Tato kapitola detailně popisuje a zdůvodňuje finální návrh autonomního mobilního robota. Věnuje se propojení technického řešení s vnějším designem stroje. Důležitou součástí je také ergonomie, která se zde soustředí hlavně na servis a obsluhu. Závěr kapitoly shrnuje udržitelnost návrhu, definuje barevné provedení a řeší výsledné technické parametry.

6.1 Tvarové řešení

V této podkapitole je představeno celkové designérské řešení stroje z hlavních pohledů. Pozornost je věnována jak vnějším proporcím platformy, tak detailním vizualizacím jejích jednotlivých funkčních částí. Cílem textu je rovněž objasnit myšlenkový vývoj návrhu a klíčová rozhodnutí, která směřovala k finální podobě produktu.

6.1.1 Celkové proporce a kompozice



Obr. 6-1 Přední perspektivní pohled finálního návrhu

Výsledný koncepční návrh přímo navazuje na dříve představené variantní řešení č. 2 a č. 3, které bylo v rámci finální fáze designérského procesu dále tvarově kultivováno. Proces finalizace se soustředil především na vybalancování poměru mezi technickou robustností podvozkové platformy a aerodynamickou lehkostí, která je pro novou generaci autonomních systémů charakteristická. Výsledkem je design, který nepůsobí jako pouhý soubor mechanických komponentů, ale jako kompaktní inteligentní systém.

Základním sjednocujícím prvkem celého tvarosloví je fragment eliptické křivky, který se systematicky propisuje do všech klíčových linií stroje. Tento geometrický motiv definuje dynamiku siluety a zajišťuje vizuální propojení jednotlivých, jinak funkčně odlišných celků. Eliptické vedení křivek propůjčuje stroji organický charakter, který komunikuje jeho autonomní povahu a technologickou vyspělost. V kontextu stavebního prostředí tento přístup vytváří zajímavý kontrast k tradičnímu, často strohému a ryze utilitárnímu designu těžké techniky, čímž platformě dodává unikátní identitu.

Vnější karoserie stroje je založena na promyšleném kontrastu mezi organickými bočními partiemi a funkčními rovinnými plochami. Zatímco zaoblené boky podvozku evokují čistotu a odolnost, přední a zadní čela jsou tvořena zkosenými rovinami. Tato změna tvarosloví není pouze estetickým záměrem, ale vychází z technických požadavků na integraci klíčových systémů. Rovinné plochy jsou nezbytné pro správnou kalibraci a výhled senzorických jednotek, umístění osvětlení a v neposlední řadě pro zajištění přístupových bodů pro servis a údržbu.



Obr. 6-2 Proporce vzhledem k muži 50P

Z hlediska prostorové kompozice je robot rozdělen do tří hlavních funkčních celků: pásového podvozku, výměnné nástavby (korby) a robotického manipulátoru. Konstrukční pojetí ramene bylo navrženo tak, aby plynule vybíhalo z hmoty podvozku, čímž vzniká dojem organického srůstu a funkční nedělitelnosti těchto částí. Naopak rozhraní mezi korbou a podvozkem je definováno příznáním vizuálním zlomem. Toto výraznější oddělení slouží k jasné definici pracovní plochy stroje a podtrhuje jeho modulární charakter. Korba tak v kompozici figuruje jako samostatný vkládaný element, který jasně vymezuje prostor určený pro manipulaci s materiálem.

I přes cílené oddělení funkčních zón působí stroj jako jeden kompaktní a tvarově provázaný celek. Vzájemná interakce mezi podvozkem a modulárními prvky je řešena tak, aby v jakékoliv pracovní konfiguraci nedocházelo k vizuálnímu rozpadu. Čistota ploch a absence zbytečných detailů zvyšuje odolnost karoserie v prostředí staveniště a usnadňuje pravidelnou údržbu. Celková kompozice tak úspěšně naplňuje vizi moderního dělníka, který v sobě kombinuje inženýrskou racionalitu s progresivním designem, reflektujícím budoucí směřování plně automatizovaného stavebnictví.



Obr. 6-3 Perspektivní pohled finálního návrhu zezadu

6.1.2 Přední pohled

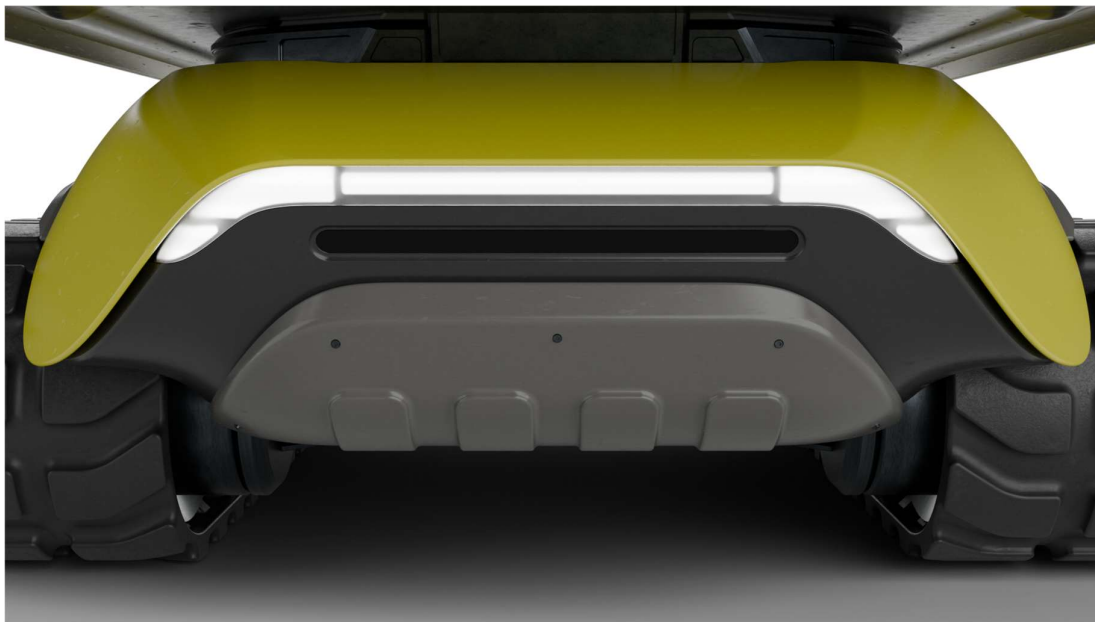
V přední části stroje došlo v průběhu designérského procesu k velmi výrazné změně oproti předběžnému návrhu. Tvarování v této zóně bylo cíleně a výrazně zjednodušeno, čímž zde vznikla dominantní, téměř rovinná plocha. Přestože hlavní silueta a linky stroje vycházejí z mnohem organičtějšího tvarování inspirovaného eliptickou křivkou, tato přední rovina s nimi dobře vizuálně funguje a podporuje celkový čistý a vizuálně nerušivý dojem z celého stroje, což je u autonomních platforem vysoce žádoucí. Zároveň toto plošné zjednodušení čelní partie výrazně usnadňuje integraci všech nezbytných funkčních prvků, které by do složitě zakřivených ploch bylo obtížné zapracovat.



Obr. 6-4 Perspektivní pohled přední části

Mezi tyto klíčové funkční prvky patří v první řadě systém předního osvětlení. Jeho design byl koncipován tak, aby světla přirozeně navazovala na celkové tvarování karoserie a tvořila s ní jeden celek. Hlavní snahou bylo navrhnout osvětlení v maximálně minimalistickém duchu, aby co nejméně narušovalo tvarové řešení masky stroje. Tento přístup výrazně podporuje inovativní autonomní povahu robota a dodává mu vysoce moderní průmyslový vzhled. Při navrhování bylo nicméně nutné nalézt rovnováhu mezi tímto designovým minimalismem a požadavky na bezpečnost provozu. Musely být dodrženy rozměry, které zaručí dostatečnou svítivost a potřebný světelný tok pro bezpečnou práci platformy i za výrazně zhoršených podmínek viditelnosti. Zásadní je také fakt, že tato světla u plně autonomního stroje neslouží pouze pro klasické osvětlení okolního pracovního prostoru. Fungují zároveň jako rozhraní pro vizuální komunikaci s okolím a lidskými pracovníky. Světelné segmenty mohou dynamicky měnit barvy a režimy svícení, čímž dokážou intuitivně signalizovat zamýšlený směr pohybu stroje, upozorňovat na vzniklou systémovou chybu nebo indikovat jiné specifické provozní stavy a záměry robota.

V přímé návaznosti na osvětlení se na čelní ploše nachází integrovaný senzorický panel. Záměrem bylo sdružit veškeré přední senzory nezbytné pro orientaci stroje do jedné ucelené horizontální linie. I tento prvek byl tvarově řešen velmi minimalisticky, aby na masce stroje nepůsobil rušivě. Panel je vizuálně sjednocen do jednoho pásu, který robotovi poskytuje potřebný výhled do prostoru a sběr dat z okolí. Pro zvýšení pasivní bezpečnosti drahé optiky a citlivé elektroniky je tento senzorický pás v ploše masky lehce zapuštěn. Míra tohoto zapuštění byla volena tak, aby byla podpořena fyzická ochrana senzorů vůči mechanickému poškození, ale aby zároveň v žádném ohledu nebyl omezen pozorovací úhel kamer a snímačů.



Obr. 6-5 Detailní pohled přední části

Celkové tvarování přední masky vytváří přirozený přesah, který funguje jako integrovaný kšilt. Vzniklý přesah karoserie efektivně chrání jak citlivou sensoriku, tak i hlavní světla před přímým mechanickým nárazem. Zároveň výrazně omezuje jejich znečištění padajícím prachem, deštěm či stékající vodou z horních krytů. Tvar masky tak přímo reaguje na reálná rizika a podmínky provozu na staveništi.

Ve spodní části předního pohledu kompozici uzavírá masivní a robustní nárazník. Jeho tvarování plynule navazuje na horní krytování a celou přední masku logicky i vizuálně uzavírá ze spodní strany. Tento prvek plní primárně ochrannou funkci. Zajišťuje bezpečí pro podvozek a vnitřní komponenty před kontaktem s terénními nerovnostmi a menšími překážkami, se kterými se stroj může při svém pohybu běžně potýkat. Stejně důležitá je však u tohoto dílu i jeho vizuální funkce. Se silným horním krytovaním propůjčuje tento spodní nárazník celému stroji stabilní, pevný a odolný dojem.

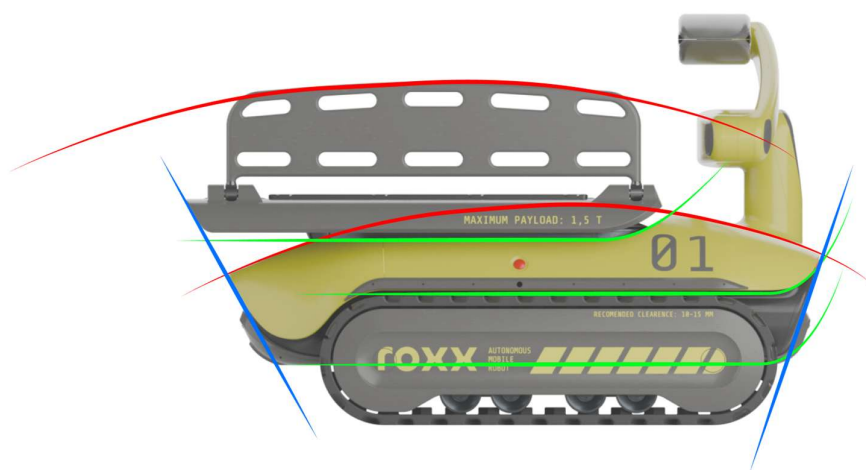
6.1.3 Boční pohled

Při pohledu z boku se nejvýrazněji projevuje celková dynamika stroje a naplno zde vyniká eliptická křivka, což je hlavní geometrický motiv celého návrhu. Tato křivka nedefinuje pouze celkovou siluetu platformy, ale v různých variacích a proporcích se promítá i do dalších dílčích prvků karoserie. Její opakování napříč designem vytváří dojem organické kontinuity. Tento organický přístup k tvarosloví pomáhá autonomnímu stroji lépe zapadnout do prostředí a nepůsobit pouze jako strohý, mechanický shluk součástek. Nízký profil a plynulé linie boční siluety zároveň opticky snižují těžiště robota, čímž už na první pohled komunikují stabilitu a pevné ukotvení stroje k terénu.



Obr. 6-6 Perspektivní boční pohled

Zásadním cílem v rámci horizontálního členění byla snaha opticky propojit tři klíčové části stroje, a to podvozek, hlavní tělo platformy a výměnnou korbu. Bylo proto nezbytné pracovat se samotným pásovým ústrojím nejen jako s technickým prvkem, ale volit jej i s ohledem na celkový design. Zvolený oválný tvar pásu nabízí to nejčistší možné řešení, které výborně spolupracuje s organickým tvarováním karoserie a přirozeně se přibližuje k ústřednímu motivu eliptické křivky. Tvarosloví karoserie, a to především v její spodní části, na tento výrazný funkční prvek reaguje, čímž zásadně podporuje jeho přirozené začlenění do jednoho uceleného produktu. K této vizuální integraci navíc výrazně přispívá i částečné zakrytování pásů, které plynule navazuje na čisté a hladké plochy hlavní karoserie. Složitě vnitřní ústrojí podvozku, které by jinak svou technickou členitostí nevyhnutelně narušovalo celkové působení stroje, je tak z velké části elegantně skryto.



Obr. 6-7 Ortografický boční pohled s hlavními křivkami

Z bočního pohledu můžeme také vidět členění vnější karoserie a řešení dělicích spár. Vedení těchto nutných spár však bylo navrženo s maximálním ohledem na celkové tvarování, aby v čistých plochách nepůsobily rušivě nebo nahodile. Naopak, linie těchto přechodů jsou pečlivě vedeny tak, aby kopírovaly a podtrhovaly směr hlavních nosných křivek designu. Díky tomu se funkční spáry stávají přirozenou součástí estetiky stroje a podporují jeho dynamický vzhled, místo aby jej narušovaly.

Kromě čistých ploch boční pohled odhaluje také důležité funkční a bezpečnostní prvky. Výrazným detailem je jednoduše tvarovaný blatník, respektive chránič, umístěný nad pásy. Tento prvek nejenže zvyšuje odolnost karoserie, ale plní i další funkci. V jeho těle jsou elegantně a bezpečně integrovány boční senzory, které monitorují periferní prostor robota. Tím, že jsou tyto citlivé prvky ukryty v masivnějším chrániči, je zajištěna jejich ochrana bez narušení celkové linie stroje. V přímém vizuálním dosahu z boku je rovněž umístěno tlačítko nouzového zastavení. To muselo být do boční plochy zasazeno tak, aby bylo z bezpečnostních důvodů okamžitě rozpoznatelné a snadno přístupné, ačkoliv jeho výrazná červená barva přirozeně tvoří silný vizuální kontrast se zbytkem karoserie.



Obr. 6-8 Detailní boční pohled

Posledním výrazným aspektem, který boční pohled definuje, je vizuální oddělení výměnné korby od samotné platformy. Mezi hlavní nosnou platformou a korbou se nachází jasná a výrazná spára. Její přiznání má silné logické opodstatnění. Jasně a na první pohled definuje, kde končí platforma a kde začíná čistě pracovní, funkční část určená pro náklad. Tento radikální zlom v hmotě je však zmírněn tím, že tvarování samotné korby opakuje klíčové úhly a křivky použité na podvozkové části. Díky tomuto pečlivému sladění geometrie spolu i přes fyzické oddělení obě části vizuálně komunikují a vytváří tvarově propojený celek.

6.1.4 Zadní pohled

Zadní pohled na autonomní platformu do značné míry zrcadlí designérský přístup aplikovaný na čelní masce, avšak celkové pojetí je zde záměrně zjednodušeno. Opakování klíčových tvarových prvků zajišťuje vizuální sjednocení celého stroje, takže platforma působí konzistentně ze všech úhlů. Oproti přední části je zadní plocha karoserie objemnější a její tvarování je o něco více zaoblené. Navazuje tak na celkový organický průběh karoserie a přirozeně uzavírá siluetu stroje. Zvětšení a vyhlazení této zadní plochy má primárně funkční opodstatnění. Díky větší, celistvé a odnímatelné ploše je zajištěn mnohem lepší a pohodlnější přístup k vnitřním technickým uzlům.



Obr. 6-9 Perspektivní pohled zadní části

Nedílnou součástí zadní partie je komunikační osvětlení a senzorika. Zadní světla zachovávají nastavený minimalistický ráz, oproti těm předním jsou však menší. Jejich tvar plynule navazuje na karoserii a elegantně vybíhá z bočních linií směrem do zadní roviny, aniž by jakkoliv narušoval čistotu samotné plochy. Pod světelnými prvky je umístěn zadní senzorický panel. Z hlediska komponentů i designu je tento panel naprosto identický s čelním provedením.

Spodní část kompozice je zakončena ochranným nárazníkem, který konstrukčně a vizuálně vychází z předního dílu. V zadní části je však jeho tvarování plošší a méně protvarované. To odpovídá odlišné povaze rizika. Zatímco předek musí odolávat přímým nárazům suti při jízdě vpřed, zadní nárazník plní spíše pasivní ochrannou funkci pro případ kontaktu s překážkou při couvání. Spolehlivě uzavírá spodní část stroje a společně s vrchními zaoblenými kryty dotváří celkový robustní a odolný dojem, kterým platforma působí.



Obr. 6-10 Detailní pohled zadní části

6.1.5 Výměnné nástavby

Korba pro kusový materiál

První z navržených výměnných nástaveb je koncipována jako plošší, nízkoprofilová korba, určená primárně pro transport a manipulaci s kusovým materiálem. Hlavním technickým požadavkem zde bylo nabídnout maximální a dobře přístupnou ložnou plochu. Pro zajištění stability nákladu během transportu je dno korby opatřeno lehkým strukturálním protvarováním, které plní nezbytnou protiskluzovou funkci. Z hlediska vnějšího designu byla nástavba modelována tak, aby její siluetu definovaly úhly a nosné křivky vycházející z hlavní platformy. Nejvýraznější tvarování je patrné po stranách korby, kde plocha přechází do výrazného zaoblení. Toto zaoblení plynule navazuje na hlavní karoserii, díky čemuž korba nepůsobí jako cizorodý přidaný element.

Vysoce funkčním a zároveň vizuálně dominantním prvkem této nástavby jsou sklopné bočnice. Ačkoliv se primárně jedná o utilitární mechanický díl ohraničující nákladový prostor, byly bočnice navrženy s důrazem na to, aby plně respektovaly nastavené organické tvarování a nepůsobily na rušivě. Jejich horní hrana je proto opět jasně definována ústřední eliptickou křivkou. Specifickým designovým detailem jsou pak rozměrnější otvory rozmístěné po obvodu těchto bočnic. Ty plní především estetickou roli, kdy díl vizuálně odlehčují a dodávají mu moderní, technický ráz. Jelikož je však hlavní středová plocha bočnice ponechána plná a objemná, tyto odlehčovací průduchy nijak nenarušují celkový dojem vizuální pevnosti a robustnosti, který je pro tento prvek nezbytný.



Obr. 6-11 Perspektivní pohled na korbu na kusový materiál

Prostor bezprostředně pod sklopnými bočnicemi je po stranách doplněn o jednoduchou podélnou lištu. Ta je osazena integrovanými oky a slouží jako standardizovaný vázací bod pro případy kdy bude nutné náklad zajistit manuálně.

Korba pro sypký materiál

Druhou variantou výměnné nástavby je objemnější korba určená primárně pro transport sypkého materiálu. Její celkové tvarování je o poznání jednodušší a striktněji se podřizuje své funkci. Geometrie byla navržena s maximálním ohledem na plynulost nakládání a vyklápění, aby na dně a v záhybech nezůstával žádný materiál. I přes tuto silnou funkční podřízenost však korba navazuje na zavedené tvarosloví platformy. Její objem plynule kopíruje stěžejní úhly a křivky podvozku. Důležitým detailem je v tomto ohledu specifické zkosení ve spodní části korby, které tvarově kopíruje průběh dělicí spáry mezi nástavbou a platformou. Toto zkosení výrazně podporuje plynulost přechodu a vizuální propojení obou částí, díky čemuž na sebe logicky navazují. Horní silueta nástavby je pak opět charakteristicky oříznuta eliptickou křivkou, čímž si celý stroj i s touto hrubší nástavbou zachovává svou ucelenou identitu.



Obr. 6-12 Perspektivní pohled na korbu na sypký materiál

Vzhledem k většímu objemu nástavby zde vznikly rozsáhlé, celistvé plochy. Aby tyto stěny nepůsobily vizuálně těžkopádně a fádně, byly pláště rozčleněny pomocí prolisů. Tyto prolisy kopírují celkové tvarování korby a rozbíjejí velké plochy, mají však také funkční význam, kdy zvyšují tuhost stěn, které tak lépe odolávají tlaku nákladu. Dalším funkčně-estetickým detailem je znatelné rozšíření horní hrany po celém obvodu korby. Tento masivnější lem logicky podporuje celkovou pevnost a mechanickou odolnost nástavby proti poškození při nakládce, a zároveň je tvarován tak, aby mohl sloužit jako kotvicí prvek.

6.1.6 Robotické rameno

Posledním stěžejním prvkem modulárního systému je robotické rameno. Z hlediska celkové kompozice je navrženo tak, aby plynule vybíhalo přímo z hmoty hlavní karoserie podvozku. Díky tomuto přechodu nevypadá manipulátor jako pouhý dodatečně namontovaný doplněk, ale přirozeně navozuje dojem jednoho vizuálně i konstrukčně propojeného celku. Hlavním designérským záměrem v této části bylo vytvořit prvek, který na sebe nebude strhávat nadměrnou pozornost na úkor zbytku stroje, ale bude plně respektovat jak zavedené tvarosloví platformy, tak svou primární pracovní funkci.



Obr. 6-13 Perspektivní pohled na rameno

Z tohoto důvodu byl do designu ramene opět promítnut ústřední motiv elipsy, který jasně definuje vnější obrysy jednotlivých ramen při pohledu shora. Konstrukce jednotlivých ramen se vyznačuje plynulými tvarovými přechody. Ze středového obdélníkového průřezu hmota ramene elegantně a měkce přechází do válcovitých kloubů. Díky tomuto na sebe všechny pohyblivé díly dokonale a bez rušivých zlomů navazují. Tvarovou provázanost celé soustavy navíc umocňuje zkosení na prvním a posledním článku ramene, které tyto dva funkčně odlišné prvky opticky sjednocuje. Samotné zakončení manipulátoru v podobě úchopných radlic bylo modelováno především s ohledem na funkci. Jeho tvar byl navržen a optimalizován tak, aby umožňoval manipulaci s co nejširší škálou stavebních materiálů rozličných proporcí.

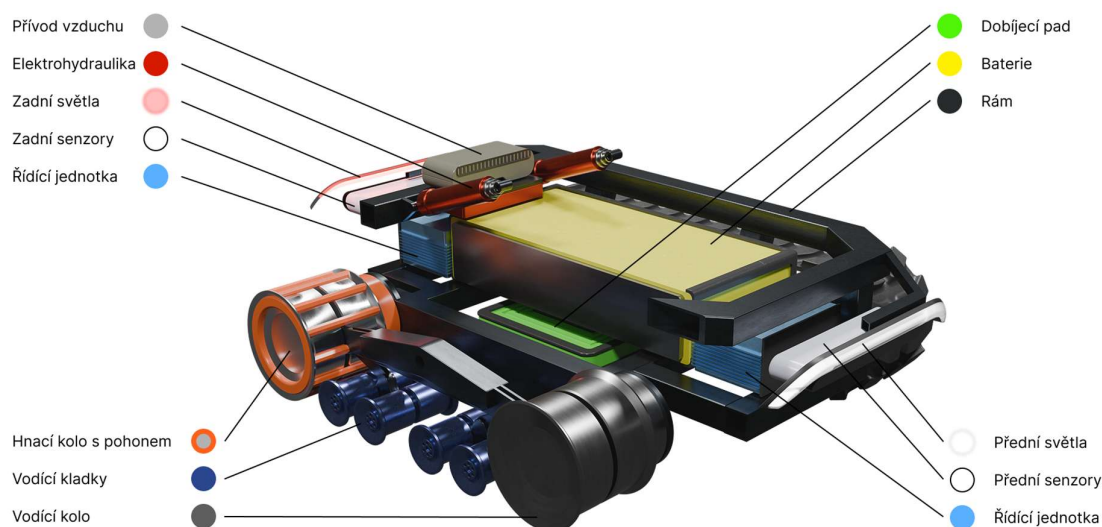
6.2 Technické řešení

Základem předkládaného technického a konstrukčního řešení jsou poznatky z úvodní technické analýzy, na které plynule navazují napříč celou diplomovou prací. Primárním cílem tohoto projektu však nebylo vypracovat detailní dokumentaci ke každé mechanické součástce, ale především pochopit logiku klíčových konstrukčních uzlů a adekvátně jim vymezit potřebný fyzický prostor uvnitř stroje. Prezentované schéma vnitřních komponent tak slouží jako základní koncepční náhled do možného funkčního uspořádání, jehož reálná podoba by byla složitější. S ohledem na tento fakt jsem záměrně ponechal prostorovou rezervu pro budoucí integraci veškeré kabeláže, chlazení a dalších nezbytných rozvodů. Přibližné trasování těchto systémů demonstruje vizualizace GLASSBOX, která je představena ve čtvrté kapitole. Při řešení prostorové zástavby elektrického pohonného ústrojí a bateriových bloků jsem vycházel z aktuálních trendů a technického uspořádání u příbuzných moderních autonomních konceptů. Jako užitečný referenční základ mi rovněž posloužily technické specifikace reálných pracovních a stavebních strojů, které navržené platformě odpovídají svou velikostní a výkonnostní kategorií. Detailní specifikace a celkový soupis těchto vnitřních komponent byly definovány již během fáze koncepčního návrhu a staly se výchozím bodem pro tvarování karoserie.

Podvozek

Základním článkem celého stroje je masivní rámová konstrukce. Tento nosný rám tvoří pevnou páteř celé platformy a jsou na něj přímo vázány veškeré další komponenty stroje. Samotná hlavní konstrukce pásového ústrojí je k nosnému rámu připojena pevně, což maximalizuje celkovou tuhost podvozku. Aby se však zamezilo přenosu silných rázů z terénu, využívá podvozek integrovaný tlumicí mechanismus. Konkrétně se předpokládá využití systému bogie wheels (odpružených kyvných kol). Tato spodní pojezdová kola nejsou uchycena staticky, ale dokážou nezávisle kopírovat terénní nerovnosti. Tento systém zaručuje neustálý a optimální kontakt pásu s povrchem, rovnoměrně rozkládá vysokou hmotnost stroje a efektivně absorbuje vibrace. Stroj tak získává nejen vysokou průchodnost terénem, ale i stabilnější a klidnější chod.

Vnitřní uspořádání



Obr. 6-14 Vnitřní schéma uspořádání komponent

Prostorové uspořádání vnitřních komponent bylo od počátku navrhováno s ohledem na efektivní využití prostoru, těžiště a ochranu. Trakční elektromotory včetně příslušných převodovek jsou integrovány přímo v samotných pásech. Toto řešení šetří cenný prostor uvnitř šasi a zároveň minimalizuje složitost systému a ztráty při přenosu točivého momentu. Nejtěžší komponentou celého systému je pochopitelně bateriový blok. Ten je strategicky uložen v nejnižší možné poloze na samotném dně hlavní karoserie. Výrazné snížení těžiště zásadně přispívá k celkové stabilitě stroje, což je u autonomní platformy, která běžně manipuluje s těžkým nákladem v terénu, naprosto klíčový parametr. Přímo pod bateriovým modulem, ve spodní části podvozku, je umístěn dobíjecí pad. Dno stroje představuje pro tuto technologii nejpřirozenější a nejvhodnější plochu, jelikož umožňuje snadné, plně automatizované najetí robota nad stacionární bezdrátovou dobíjecí stanicí.

Veškerá citlivá elektronika, zahrnující výpočetní jednotky, distribuční uzly a senzoriku, je koncentrována do přední a zadní části stroje. Toto rozmístění má jasný ergonomický a servisní důvod. Tyto zóny jsou pod odnímatelnými kryty nejlépe přístupné. Servisním technikům to poskytuje ideální cestu pro diagnostiku a pravidelnou údržbu bez nutnosti zasahovat do hlavní nosné konstrukce nebo složitě demontovat ložnou plochu.

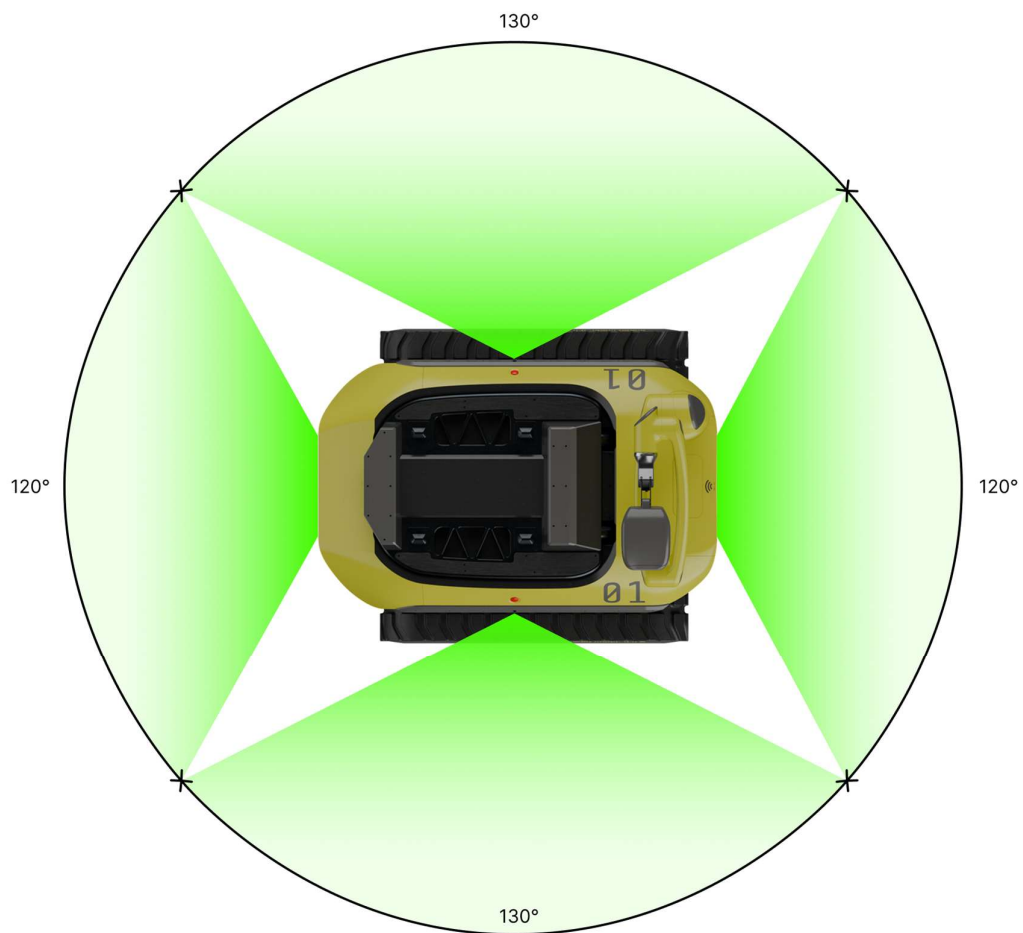
Specifickou výzvou při návrhu vnitřního uspořádání bylo umístění pístnic určených pro vyklápění korby. Jejich ukotvení v rámu bylo voleno s ohledem na kinematiku pohybu a startovací úhel, který je nezbytný pro vyvinutí potřebné počáteční zvedací síly. Současně však byla velkou prioritou snaha tyto robustní mechanismy co nejlépe schovat do karoserie. Cílem bylo zajistit, aby v základní poloze nijak nenarušovaly vnější tvarování stroje.

Nedílnou součástí technického uspořádání je management proudění vzduchu. Aktivní chlazení je důležité pro udržení optimální provozní teploty baterií i výpočetních jednotek. Vzhledem k relativně nízké jezdové rychlosti stroje, která nevytváří dostatečný přirozený nápor vzduchu, a především kvůli vysoké prašnosti na staveništi, bylo výhodné sací i výdechové otvory strategicky skrýt. Tímto zapuštěním a vizuálním potlačením otvorů se efektivně minimalizuje přímý vstup nečistot do chladicích okruhů. Z důvodu těchto extrémně náročných pracovních podmínek stavebního prostředí konstrukce počítá s buď kompletně uzavřeným vnitřním prostorem, nebo vysokým stupněm krytí jednotlivých částí (IP67 a vyšším), aby bezpečně a dlouhodobě odolaly všudypřítomnému prachu a vlhkosti.

Senzorická výbava a osvětlení

Pro plně autonomní platformu je klíčové dokonalé a nepřetržité vnímání okolního prostředí. Základem senzorické výbavy tohoto stroje jsou dva hlavní integrované panely, umístěné v čelní a zadní masce. Ty v sobě koncentrují kombinaci různých typů snímačů a zajišťují tak komplexní pokrytí prostoru ve směru jízdy i při manipulaci s nákladem. K těmto hlavním uzlům se přidávají ještě doplňkové senzory po bocích. Jejich úkolem je vykrývat případné slepé úhly a monitorovat bezprostřední blízkost boků stroje. K celkové přesnosti autonomní navigace navíc zásadně přispívá integrovaný systém GNSS s korekcí RTK. Antény nezbytné pro příjem tohoto signálu jsou strategicky umístěny v těle robota pod vrchním krytím tak, aby byl zaručen čistý příjem signálu bez nutnosti narušovat vnější design stroje vystouplými prvky.

S orientací stroje v prostoru a bezpečností úzce souvisí i systém vnějšího osvětlení. Jeho design a funkce primárně reflektují pohyb robota a jeho jasně definovanou směrovost. Přestože je platforma schopna plnohodnotného pohybu oběma směry, z provozního hlediska se nepředpokládá, že by robot couval na delší úseky. Osvětlení je potom dimenzováno tak, aby poskytovalo dostatečný světelný tok pro bezpečné osvětlení pracovního prostoru, a to i za výrazně zhoršené viditelnosti.



Obr. 6-15 Pozorovací úhly senzorů a kamer, pohled shora



Obr. 6-16 Pozorovací úhly senzorů, pohled z boku

Funkce světel se však u tohoto autonomního konceptu neomezuje pouze na pasivní osvětlení terénu. Systém slouží jako důležitý nástroj pro vizuální komunikaci s okolím. Světelné segmenty umožňují plynulou změnu barvy, úpravu intenzity svítivosti nebo spouštění různých dynamických sekvencí. Platforma tak dokáže svému okolí signalizovat své aktuální záměry od změny směru jízdy a indikace probíhajícího nakládání, až po varovné blikání v případě systémové chyby.

Ovládací prvky

Vzhledem k plně autonomní povaze stroje se primárně předpokládá, že veškeré operativní řízení, zadávání úkolů a průběžný monitoring stavu bude probíhat výhradně bezdrátově prostřednictvím vzdáleného přístupu přes počítač nebo tablet. Pro přímou fyzickou interakci s robotem, která je nezbytná zejména při jeho prvotním zavádění do provozu, pravidelné údržbě nebo při řešení nestandardních situací, je však platforma vybavena sdruženým ovládacím panelem. Aby bylo toto citlivé rozhraní chráněno před povětrnostními vlivy i před neoprávněnou manipulací, je panel elegantně skryt pod odklopným krytem, který je zabezpečen elektronickým zámekem. Přístup k němu má tak výlučně autorizovaný a proškolený personál.



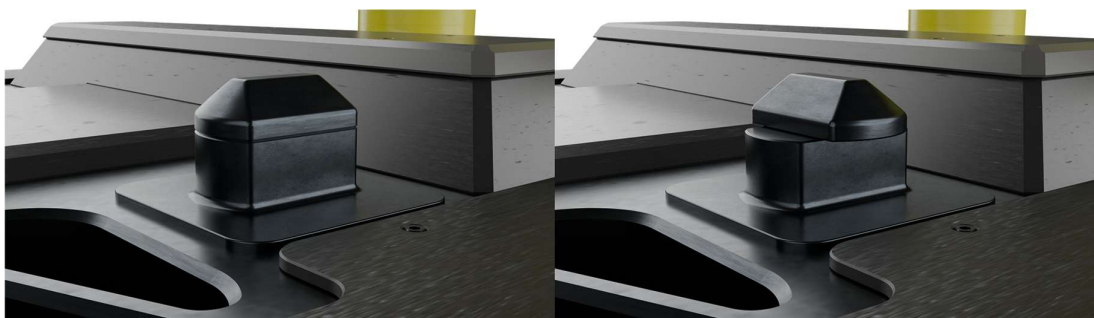
Obr. 6-17 Detailní pohled – ovládací panel

Rozvržení samotného ovládacího panelu bylo navrženo s důrazem na přehlednost a funkci. Dominantním prvkem je zde hlavní hardwarový vypínač stroje, který je doplněn voličem provozních režimů umožňujícím přepínání mezi stavy Auto, Manual a Service, a tlačítkem pro finální potvrzení zapnutí. Značná část rozhraní je vyčleněna pro bezprostřední ovládání mechanických uzlů při údržbě. Obsluha zde najde prvky pro manuální odbrzdění stroje, systémové odemčení uchycení výměnné korby a přímé ovládání pístnic pro vyklápění ložné plochy či sklápění bočnic. Pro účely řešení softwarových či komunikačních problémů je panel osazen tlačítky pro celkový restart systému a rychlý restart bezdrátového připojení. Celý panel uceluje standardizovaný konektor pro připojení servisní diagnostiky a kompaktní informační displej ovládaný třemi tlačítky pro rychlé lokální nastavení.

Zcela kritickým a na ovládacím panelu nezávislým bezpečnostním prvkem jsou pak hardwarové vypínače pro okamžité nouzové zastavení stroje. Tyto výrazně zbarvené bezpečnostní hříby nejsou schované pod žádným krytem, ale jsou strategicky rozmístěny po obou bocích karoserie. Jejich umístění bylo pečlivě voleno na základě ergonomických zásad tak, aby byly intuitivně, rychle a bezpečně dosažitelné prakticky z jakékoliv pozice člověka pohybujícího se v těsné blízkosti robota v případě hrozící kolize či jiné krizové situace.

Systém upínání nástaveb a jištění nákladu

Základním předpokladem úspěšného fungování celé modulární koncepce je bezpečné, pevné a vysoce spolehlivé propojení hlavní nosné platformy s jednotlivými výměnnými nástavbami. Pro tento kritický konstrukční uzel byl zvolen osvědčený a extrémně odolný uzamykací mechanismus na bázi tzv. twistlocků. Tato technologie, standardně využívaná v těžké kontejnerové logistice, byla pro návrh vybrána primárně pro svou bezkonkurenční schopnost přenášet obrovské statické i dynamické zatížení. Systém musí bezpečně ustát nejen samotnou hmotnost plně naložené korby, ale také síly vznikající při pohybu stroje v náročném terénu.



Obr. 6-18 Twistlock mechanismus



Obr. 6-19 Perspektivní pohled s vyklopenou korbou

Zásadní výhodou tohoto technického řešení je jeho vysoká provozní spolehlivost i ve velmi nepříznivých pracovních podmínkách. Systém twistlocků je konstrukčně natolik robustní a mechanicky přímočarý, že jeho funkčnost neohrožuje všudypřítomný prach, vlhkost ani hrubé zacházení, které je pro prostředí staveniště typické. Odjištění a zajištění tohoto spojení je elektronicky řízeno, což zaručuje rychlou a bezpečnou výměnu pracovních modulů.

Na systém bezpečného ukotvení nástaveb navazuje u modulu pro kusové materiály prvek pro dodatečné jištění přepravovaného materiálu. Jedná se o mechanismus automaticky sklopných bočnic, které slouží k lepší stabilizaci nákladu. Tento proces probíhá autonomně po dokončení, kdy se bočnice plynule sklopí a naložené břemeno mechanicky zajistí. Tímto technickým řešením se omezuje nežádoucí pohyb materiálu na ložné ploše během jízdy. Zvyšuje se tak celková bezpečnost transportu a snižuje se riziko vysypání nákladu, aniž by bylo nutné jeho manuální kurtování či jiné zajišťování lidskou obsluhou. Významně se tak zvyšuje nejen bezpečnost transportu, ale také celková autonomní funkce stroje

Materiálové řešení

Materiálové řešení stroje je od počátku navrhováno s ohledem na kusovou až malosériovou výrobu, což vylučuje použití nákladných lisovacích forem. Předpokládá se, že základní nosný rám bude svařován z ocelových profilů, což platformě zajistí nezbytnou tuhost a schopnost odolávat namáhání v terénu. Na menší a méně namáhané konstrukční prvky může být naopak použit hliník, což pomůže snížit celkovou hmotnost a udržet nízko položené těžiště.

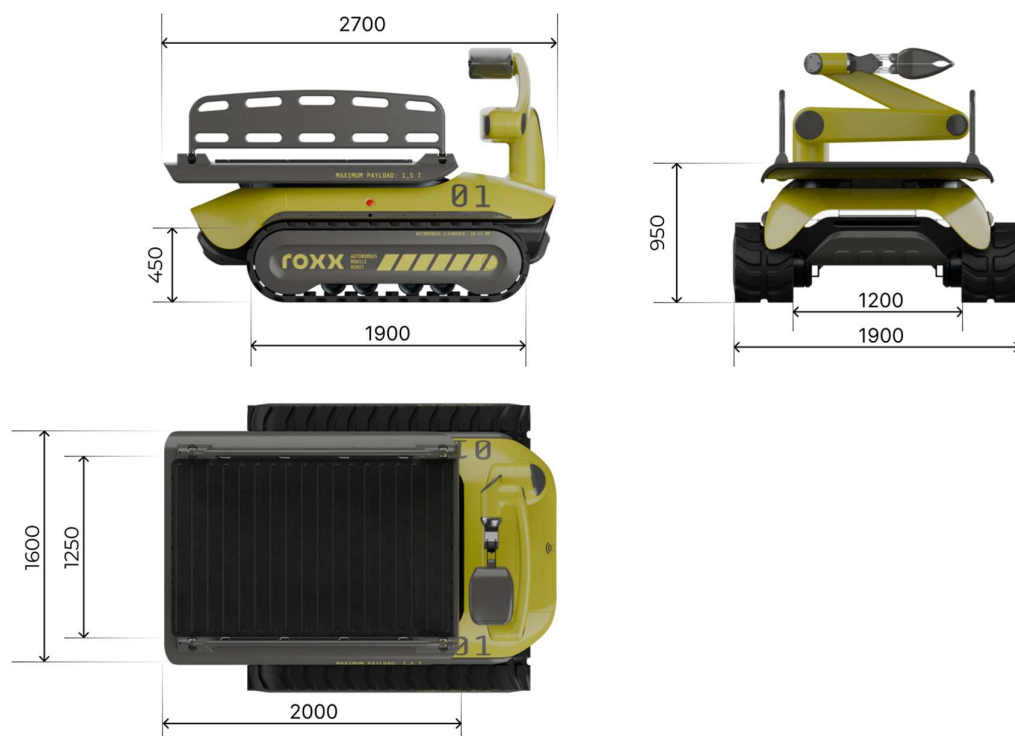
Vnější karoserie, která dává stroji jeho charakteristický tvar a chrání vnitřní komponenty, bude vyrobena především z odolných plastů jako DCPD. Pro malosériovou produkci se tyto díly dají efektivně vyrábět pomocí technologie nízkotlakého reakčního vstřikování. Nejvíce namáhané části krytování by potom byly vyráběny z HDPE. Pro jejich efektivní malosériovou výrobu se nabízí využití technologie vakuového tváření nebo rotačního odlévání. Tyto metody zaručují vysokou mechanickou odolnost výsledných dílů bez nutnosti extrémních počátečních investic do lisovacích forem.



Obr. 6-20 Materiálový rozpad

Tato materiálová a výrobní logika se přirozeně propisuje i do výměnných nástaveb a robotického manipulátoru. Při jejich konstrukci se uplatňují naprosto stejné principy a postupy jako u samotné platformy, tedy efektivní kombinace pevných nosných profilů s plastovým krytovaním.

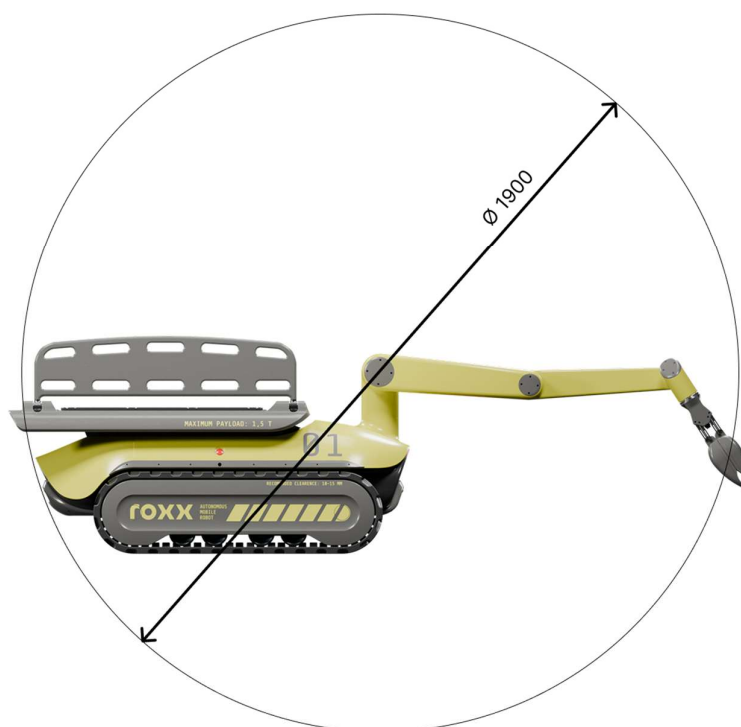
Rozměrové řešení



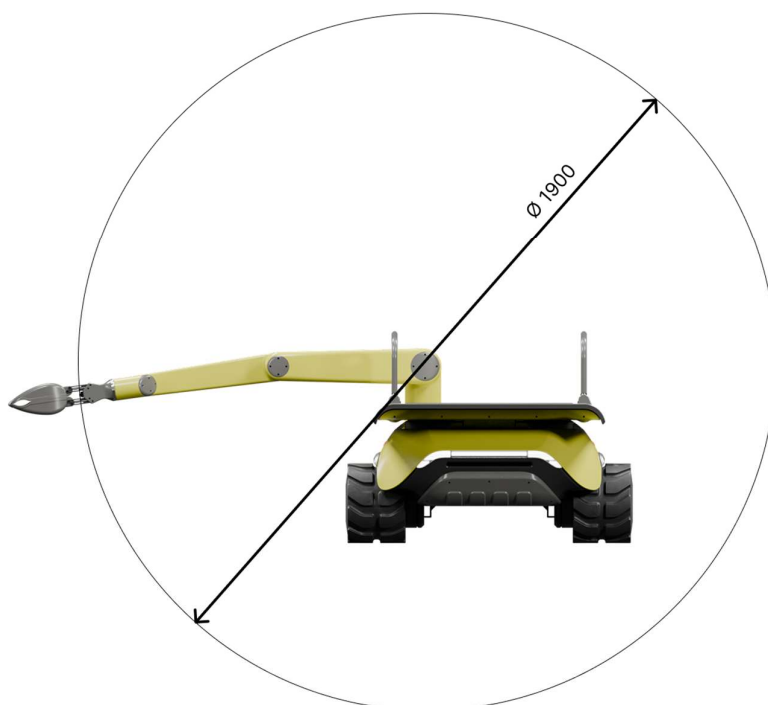
Obr. 6-21 Rozměrové řešení s korbou pro kusové materiály



Obr. 6-22 Rozměrové řešení s korbou pro sypké materiály



Obr. 6-23 Dosah ramene, pohled z boku



Obr. 6-24 Dosah ramene, pohled zepředu

6.3 Ergonomické řešení a bezpečnost

Vzhledem k tomu, že se jedná o plně autonomní stroj, se předpokládá, že většina interakce, jako je zadávání pracovních úkolů nebo sledování provozu, bude přesunuta do virtuálního prostředí počítače, tabletu či telefonu. I tak je ale nutné počítat s fyzickým zásahem lidské obsluhy. Ten bude probíhat především při pravidelném servisu nebo v krajních situacích během provozu.



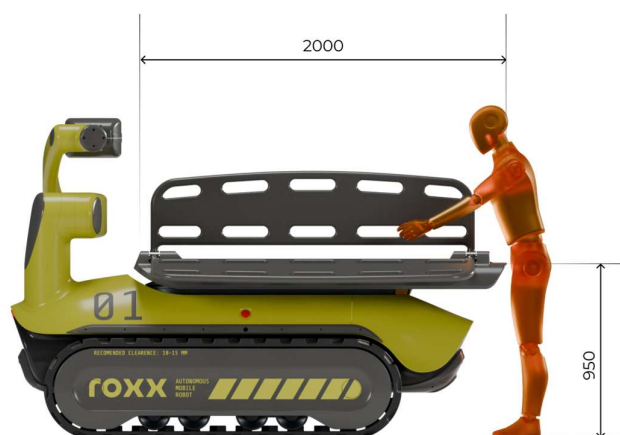
Obr. 6-25 Boční ergonomický pohled

Zásadním aspektem z hlediska údržby je snadná přístupnost ke klíčovým technickým uzlům. Pro rutinní kontrolu a menší servisní úkony jsou určeny odnímatelné kryty v čelní a zadní rovině karoserie. Tento systém umožňuje rychlý přístup k nejcitlivějším komponentům, jakými jsou senzorické jednotky, řídicí moduly a příslušná elektroinstalace. Mechanik tak může provádět nezbytnou diagnostiku, výměnu dílů či kalibraci senzorů bez nutnosti složitého rozebírání hlavních konstrukčních prvků platformy.

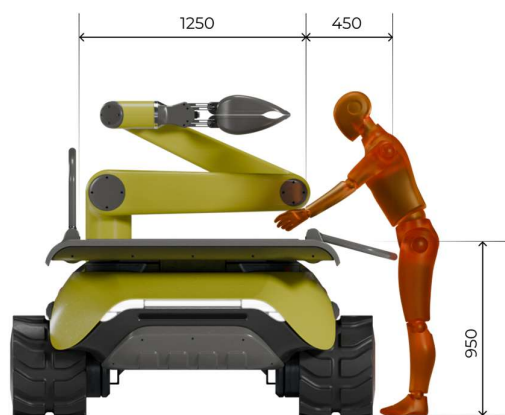


Obr. 6-26 Boční ergonomický pohled – servisní přístupy

Důležitým bodem z hlediska ergonomie je také nákladová plocha. I když stroj funguje primárně sám, velmi často může nastat situace, kdy bude muset člověk přímo manipulovat s nákladem nebo jej ručně zajistit a ukotvit. Z tohoto důvodu je nákladová plocha umístěna do přijatelné manipulační roviny, aby se pracovník nemusel při práci zbytečně natahovat, a nakládka pro něj byla co nejvíce přirozená.



Obr. 6-27 Boční ergonomický pohled – manipulace s nákladem



Obr. 6-28 Přední ergonomický pohled – manipulace s nákladem

Pro případy, kdy je nutná přímá manuální obsluha stroje na místě například při prvotním zavádění robota do provozu na novém staveništi, při specifických servisních úkonech nebo při řešení nestandardních situací, které nelze vyřešit na dálku, je platforma vybavena sdruženým řídicím panelem. Vzhledem k tomu, že se stroj běžně pohybuje v rušném prostředí stavby, je naprosto klíčové zamezit jakékoli neoprávněné manipulaci. Veškeré ovládací prvky jsou proto bezpečně skryty pod ochrannými dvířky. Z bezpečnostního hlediska využívá tento kryt systém smart lock a odjistí se výhradně po přiložení autorizované karty. Tím je spolehlivě zaručeno, že do fyzického nastavení a řízení stroje může zasahovat pouze k tomu proškolený a pověřený pracovník.



Obr. 6-29 Boční ergonomický pohled – obsluha ovládacího panelu

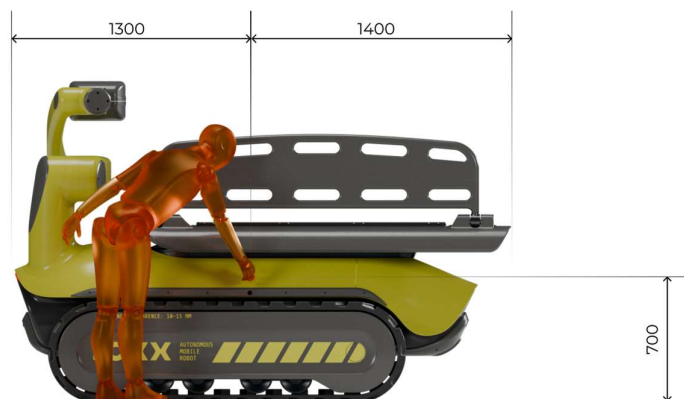


Obr. 6-30 Detailní pohled – ovládací panel



Obr. 6-31 Ergonomický pohled – ovládací panel

Posledním, avšak kriticky důležitým aspektem je celková bezpečnost. Pro případ nouze je robot vybaven tradičním červeným hříbovým tlačítkem pro okamžité zastavení. To je umístěno z obou bočních stran přibližně ve středu stroje, aby bylo v krizové situaci vždy rychle a snadno přístupné z jakéhokoliv úhlu. Je ale potřeba zdůraznit, že tento mechanický prvek je až tou nejzazší pojistkou. Samotné bezpečnostní algoritmy robota a jeho senzory jsou navrženy tak, aby jakoukoli kritickou situaci předvídaly a vůbec ji nedopustily.



Obr. 6-32 Boční ergonomický pohled – nouzové vypnutí

6.4 Barevné a grafické řešení

6.4.1 Barevné řešení

Tato fáze projektu se podrobně věnuje definování finálního barevného konceptu. Vzhledem k primárnímu určení stroje pro náročné stavební a průmyslové prostředí bylo zvoleno použití povrchové úpravy s plnými, sytými tóny. V rámci hledání ideálního vizuálního výrazu byly navrženy celkem tři barevné varianty, které reflektují jak současné standardy, tak předpokládaný budoucí vývoj pracovního prostředí. První dvě varianty vycházejí z tradičního přístupu, kde je prioritou maximalizace viditelnosti a silný vizuální kontrast. To představuje klíčový bezpečnostní faktor v současném provozu, kde se stroje neustále setkávají s lidskými pracovníky. Třetí varianta se naopak od tohoto striktně signálního kontrastu vědomě odpoutává. Je koncipována pro budoucí, více automatizovaná staveniště, kde interakce s lidským faktorem klesne, a vizuální priority se tak posunou spíše k čisté technologické estetice a integraci do prostředí. Napříč všemi variantami však platí, že barvy na karoserii cíleně podtrhují zavedené tvarosloví. Hladký povrch nechává vyniknout hlavní organické křivky designu a rozložení barevných ploch pomáhá jasně oddělovat funkční celky stroje. Následující text jednotlivé varianty detailněji představuje a obhajuje.

Finální barevná varianta



Obr. 6-33 Finální barevná varianta

Pro hlavní barevné schéma byl zvolen tradiční a praxí ověřený přístup, který respektuje zavedené vizuální standardy v oblasti těžké a stavební techniky. Dominantní barvou vnější karoserie je výrazná žlutá, přesněji odstín RAL 1016 (Sulfur yellow). Tato volba plní dvě stěžejní funkce. Zaprvé garantuje bezkonkurenční viditelnost stroje i za zhoršených světelných a povětrnostních podmínek, což představuje na staveništi bezpečnostní prioritu. Zadruhé pak v pozorovateli okamžitě a podvědomě asociuje příslušnost zařízení do kategorie výkonných pracovních strojů.

Výrazná žlutá je v rámci designu cíleně vyvažována promyšlenou skladbou neutrálních tónů, které stroji dodávají potřebný vizuální kontrast a moderní technický ráz. Na vybrané doplňkové plochy karoserie a výměnných nástaveb je aplikován střední šedý odstín RAL 7039 (Quartz grey). Jeho úkolem je opticky rozbít velké objemy karoserie a jemně podpořit dynamiku celkového tvarování. Zcela specifickou roli pak hraje tmavý odstín RAL 7021 (Black grey), který je vyhrazen pro vnitřní krytování. Aplikací této velmi tmavé barvy na vnitřní partie je dosaženo vizuálního efektu, kdy vnitřní části stroje opticky ustupují do pozadí a nechávají světlé, tvarované panely vnější karoserie mnohem výrazněji a plastičtěji vystoupit do prostoru.

Barevná varianta II



Obr. 6-34 Barevná varianta II

Druhá navržená varianta nadále plně respektuje současný požadavek na vysokou viditelnost, avšak přistupuje k němu s mnohem razantnějším a méně konvenčním vizuálním výrazem. Dominantní barvou vnějších panelů karoserie je v tomto případě sytá oranžová, přesněji odstín RAL 2004 (Pure orange). Tato volba záměrně opouští zažitý stereotyp žluté stavební techniky a propůjčuje stroji podstatně agresivnější a dynamičtější charakter. Extrémní vizuální průbojnost a sytost oranžové barvy spolehlivě poutá lidskou pozornost a zaručuje okamžitou identifikaci stroje.

Pro dosažení optimální barevné harmonie a umocnění celkového výrazu je zářivá oranžová kombinována s tmavším, tlumeným odstínem RAL 6015 (Black olive). Tento odstín na vybraných sekundárních plochách nástaveb a karoserie nahrazuje světlejší šedou ze základní varianty. Výsledný kontrast mezi agresivní oranžovou a tímto tmavě šedým tónem s lehkým olivovým nádechem dává stroji ještě robustnější a dynamičtější vzhled.

Aby byla zachována promyšlená optická struktura stroje, zůstává i u této varianty nezměněno použití velmi tmavého odstínu RAL 7021 (Black grey). Ten je opět striktně aplikován na zapuštěné vnitřní krytování, díky čemuž je zajištěna potřebná vizuální hloubka, ze které mohou jasně zářivé vnější plochy maximálně vystoupit do prostoru.

Barevná varianta III



Obr. 6-35 Barevná varianta III

Třetí barevné schéma se na rozdíl od předchozích verzí záměrně vzdává velkých, agresivně kontrastních ploch a volí mnohem klidnější, vizuálně integrovanější přístup. Hlavní hmota karoserie je opatřena neutrálním, zemitějším odstínem RAL 7003 (Moss grey). Tento základ je na vybraných sekundárních panelech doplněn o něco tmavší šedou RAL 6015 (Black olive). Kombinace těchto dvou tónů vytváří pouze velmi jemný, kultivovaný kontrast, který stroji propůjčuje vysoce moderní a sofistikovaný technologický výraz, aniž by vizuálně křičel do svého okolí. Pro zachování optické hloubky a struktury designu je vnitřní prostor opět sjednocen nejtmaším odstínem RAL 7021 (Black grey).

Zásadním oživením této jinak spíše monochromatické a zdrženlivé palety je strategické použití signální oranžové barvy RAL 2004 (Pure orange), která je však aplikována výhradně v detailech a grafických polepech. Tyto výrazné lokální akcenty ostře vystupují z neutrálního pozadí, efektivně rozbíjejí barevnou fádnost celku a současně plní funkci nezbytných reflexních a orientačních bodů.

Přestože tato esteticky čistá varianta perfektně zapadá do vize moderního, vysoce robotizovaného provozu, její reálné nasazení v současnosti by naráželo na určité překážky. Z hlediska bezpečnosti je nutné konstatovat, že absence velkých signálních ploch objektivně snižuje celkovou viditelnost stroje. To činí tuto elegantní variantu prozatím méně vhodnou pro běžná staveniště, kde dochází k neustálé interakci těžké techniky s lidskými pracovníky.

6.4.2 Grafické řešení

Tato podkapitola je věnována grafickému zpracování produktového označení navržené autonomní platformy „roxx“ a definování doplňkových informačních polepů. V první části bude představen samotný logotyp stroje, přičemž pozornost je zaměřena na analýzu zvolené typografie a základní barevnost. Následující odstavce pak detailně popíší praktickou implementaci loga a dalších polepů přímo na karoserii robota. Při navrhování rozložení této grafiky byl kladen důraz na to, aby veškeré polepy přirozeně korespondovaly s tvaroslovím stroje, nenarušovaly jeho estetickou čistotu, ale zároveň plně vyhovovaly nárokům na čitelnost a bezpečnost.

Základním grafickým prvkem stroje je jeho produktový název „roxx“, který je v logotypu záměrně vyveden výhradně minuskami. Pro tento účel byl zvolen moderní bezpatkový font Chillax v řezu Semibold. Tato volba vychází ze specifické geometrie písma, která v sobě kombinuje čisté linie a výrazná zaoblení. Právě tento charakteristický radius a měkkost v kresebných detailech písma Chillax ideálně navazuje na organické tvarování karoserie robota, čímž dochází k přirozenému vizuálnímu sjednocení grafického symbolu s fyzickým produktem. Vzhledem k vysoké míře originality samotného fontu a jeho tvarové shodě s designem stroje nebylo nutné do struktury loga dále zasahovat.



Obr. 6-36 Základní logotyp

Pro veškeré doplňkové textové části, technické specifikace a informační polepy na stroji bylo zvoleno sekundární písmo Share Tech Mono. Tento font, inspirovaný estetikou programovacího kódu a terminálů, svou neproporcionální povahou podtrhuje technický a autonomní charakter produktu. Zároveň zajišťuje vynikající čitelnost i při menších velikostech štítků.



Obr. 6-37 Písmo Share Tech Mono

Rozmístění grafických a textových prvků na karoserii platformy bylo navrženo s ohledem na ergonomii, bezpečnost provozu a snadnou údržbu. Veškeré aplikované polepy korespondují se zvoleným barevným schématem stroje, tudíž využívají promyšleného kontrastu vůči podkladovému laku, čímž si zachovávají perfektní čitelnost, aniž by vizuálně narušovaly celistvost designu.

Klíčovým a vizuálně nejvýraznějším prvkem je sdružený polep umístěný na obou bočních krytech pásů. Tento blok v sobě chytře integruje hned tři roviny informací: hlavní logotyp „roxx“, definující text „autonomous mobile robot“ a výstražné šikmé pruhy. Umístění na krytu pásu bylo zvoleno zcela záměrně z funkčního i estetického hlediska. Jedná se o nízko položenou plochu, která stroj vizuálně ukotvuje k zemi. Šikmé šrafování zde plní primární bezpečnostní roli, protože výrazně upozorňuje na nejvíce nebezpečnou, pohybující se část podvozku. Nápis potom jasně komunikuje autonomní povahu stroje okolí.



Obr. 6-38 Grafické řešení finálního návrhu

Pro zajištění plynulé logistiky na stavbě je zadní část bočních panelů z obou stran stroje opatřena výrazným číselným označením. Tato nadstandardně velká typografie slouží k okamžité a bezproblémové identifikaci konkrétního stroje v rámci větší flotily, a to i na velkou vzdálenost nebo za snížené viditelnosti.

Značná pozornost byla věnována také prvkům usnadňujícím každodenní obsluhu a servis. Přímo na krytu pásu je umístěn drobný textový polep udávající doporučenou vůli pásu. Obdobná logika je aplikována na výměnných korbách, kde je z jedné strany jasně deklarováno maximální povolené zatížení. Přítomnost tohoto limitu snižuje riziko přetížení a poškození stroje.

Základní informační vrstvu uzavírá rozsáhlejší textový panel umístěný na zadním čele platformy. Tento blok obsahuje nezbytná bezpečnostní upozornění a základní provozní specifikace. Zásadním inovativním prvkem je zde integrace QR kódu. Ten představuje moderní most mezi fyzickým produktem a digitálním prostředím, kdy po jeho načtení dojde okamžitě k přesměrování na podrobnou elektronickou příručku, čímž zcela odpadá nutnost manipulace s papírovou dokumentací v terénu.

6.5 Udržitelnost produktu

Téma dlouhodobé udržitelnosti a minimalizace negativních dopadů na životní prostředí se stává jedním z nejzásadnějších parametrů při vývoji jakékoliv nové průmyslové techniky. Stavebnictví a těžký průmysl historicky patří k odvětvím s největší ekologickou zátěží, ať už z hlediska produkce emisí, hlukového smogu nebo spotřeby primárních surovin. Následující podkapitoly proto detailně analyzují ekologické benefity produktu z hlediska jeho energetické koncepce, inovativní modulární stavby a volby materiálů.

6.5.1 Energetická koncepce a bezemisní provoz

Základním pilířem udržitelnosti navrženého robota je jeho plně elektrický, bateriemi poháněný systém. Konvenční stavební technika se doposud spoléhala téměř výhradně na vznětové spalovací motory, které jsou zdrojem značného množství lokálních emisí. Přechodem na čistě elektrický pohon generuje platforma v místě svého nasazení absolutně nulové lokální emise. Tato vlastnost je zcela klíčová nejen pro snižování celkové uhlíkové stopy stavebních projektů, ale také umožňuje bezproblémové nasazení robota v uzavřených, špatně větraných halách, v podzemních stavbách nebo v centrech měst s přísnými emisními limity.

Dalším významným a často opomíjeným aspektem bateriového pohonu je drastické snížení hlukové zátěže a vibrací. Elektromotory zajišťující pojezd i chod manipulátoru pracují nesrovnatelně tišeji než konvenční hydraulické a dieselové systémy. To nejen prokazatelně zlepšuje pracovní podmínky pro lidi v bezprostředním okolí stroje, ale také otevírá nové možnosti pro nasazení stroje v nočních hodinách v rezidenčních oblastech bez porušování hlukových norem.

Z hlediska provozní ekologie nelze opomenout ani fakt, že plně elektrický systém výrazně redukuje množství rizikových provozních kapalin na palubě. Absence rozsáhlých hydraulických okruhů, motorového oleje a palivové nádrže na naftu prakticky eliminuje riziko nebezpečných úniků do půdy či spodních vod. Samotná energetická účinnost elektromotorů navíc zajišťuje, že vložená energie je využita mnohem efektivněji, s minimálními ztrátami v podobě odpadního tepla.

6.5.2 Modulární koncepce

Ačkoliv v současné fázi návrhu disponuje platforma primárně dvěma typy výměnných koreb a robotickým manipulátorem, což z ní činí přizpůsobitelný prostředek pro převoz a manipulaci s materiálem, skutečný ekologický potenciál této modulární koncepce spočívá v její otevřené architektuře. Robot není navržen pouze jako inteligentní dumper, nýbrž jako univerzální nosná platforma připravená pro budoucí rozšiřování.

Výroba moderní, plně autonomní stavební techniky představuje obrovskou zátěž z hlediska spotřeby primárních surovin a vyprodukovaných emisí. Nejnáročnější fázi přitom představuje produkce samotného podvozku, který obsahuje těžké trakční baterie, pohonné elektromotory, složitou senzoriku a řídicí hardware. Pokud by se pro každý specifický stavební úkon musel vyvíjet a vyrábět zcela nový, jednoúčelový autonomní stroj, ekologický přínos plynoucí z bezemisního elektrického provozu by byl velmi rychle smazán právě v důsledku masivní spotřeby zdrojů při výrobě.

Zde se naplno uplatňuje koncept dlouhodobé udržitelnosti prostřednictvím škálovatelné modularity. Potenciální budoucí vývoj dalších, úzce specializovaných nástaveb, ať už by se jednalo o moduly pro míchání betonu, vrtné soupravy, systémy pro 3D tisk budov nebo pokročilé geodetické a senzorické stanice, teoreticky umožní jedinému podvozku zastat práci celé flotily různých strojů. Platforma se tak může v průběhu životního cyklu stavby plynule transformovat podle toho, jaké práce jsou zrovna vyžadovány. Zatímco výroba chytrého podvozku je extrémně náročná, produkce dodatečných pracovních nástaveb, které jsou často tvořeny jen pasivními ocelovými svařenci nebo jednodušší mechanikou, zanechává nesrovnatelně menší ekologickou stopu. Zvyšuje se tím efektivita využití těch nejvíce materiálově a energeticky náročných komponent.

6.5.3 Materiály a recyklovatelnost

Z hlediska dlouhodobé udržitelnosti a minimalizace ekologické zátěže je nezbytné posuzovat navržený autonomní stroj nejen během jeho aktivního bezemisního provozu, ale také na konci jeho životnosti. V této fázi hraje klíčovou roli primární volba konstrukčních materiálů a strategický přístup k technologicky a energeticky nejnáročnějším komponentám.

U hlavních nosných částí se počítá s využitím oceli a hliníkových slitin. Tyto kovy představují z pohledu cirkulární ekonomiky ideální surovinu. Ačkoliv je jejich prvovýroba energeticky velmi náročná, jsou v závěru životního cyklu prakticky beze zbytku recyklovatelné, aniž by ztrácely své původní mechanické vlastnosti. Jejich návratnost do hutního cyklu v podobě ocelového či hliníkového šrotu tak radikálně snižuje materiálovou a energetickou náročnost při produkci budoucí průmyslové techniky.

Podobná úvaha o udržitelnosti byla uplatněna i při volbě materiálů pro vnější krytování a panely karoserie. Upřednostnění odolných termoplastů před tvarově flexibilními, avšak složitými vrstvenými kompozity, vytváří předpoklad pro jejich úspěšnou recyklaci. Termoplasty lze po vyřazení stroje poměrně jednoduše drtit a opětovně přetavit, čímž se minimalizuje finální množství nerecyklovatelného plastového odpadu.

Nejsložitější výzvu v oblasti celkové udržitelnosti pak u moderních autonomních a elektrických strojů představují trakční baterie, sensorika a komplexní řídicí elektronika. Výroba těchto komponent, zejména pak moderních akumulátorů, je nevyhnutelně spojena s vysokou prvotní uhlíkovou stopou a ekologicky velmi náročnou těžbou vzácných kovů. Aby byla tato vysoká počáteční zátěž z dlouhodobého hlediska kompenzována, uvažuje se u těchto prvků o zapojení do moderních recyklačních řetězců.

U trakčních baterií, které vlivem náročného mobilního provozu po čase ztratí část své kapacity potřebné pro pohon těžkého stroje, se jako ideální teoretické východisko nabízí jejich kaskádové využití v rámci takzvaného druhého života. Mohou tak spolehlivě sloužit dalších několik let jako stacionární energetická úložiště přímo na staveništích či v průmyslových halách pro akumulaci energie. Teprve po úplném vyčerpání této zbytkové kapacity směřují k hloubkové recyklaci, která v současnosti umožňuje efektivní zpětné získávání cenných prvků pro výrobu nových bateriových článků. Analogický postup se předpokládá u vyřazených procesorových jednotek a složité sensoriky.

6.6 Hodnocení klíčových parametrů

Tato diplomová práce byla od samého počátku formována definicí klíčových parametrů a provozních požadavků, které musel finální návrh splňovat. Cílem bylo zpracovat technicky-výtvarnou studii autonomního mobilního robota pro staveniště, tudíž i samotný výběr specifikací a celkové koncepce výrazně ovlivnil konečný vzhled i funkčnost produktu. V prvopočátku procesu se uvažovalo o návrhu úzce specializovaného stroje, například čistě autonomního dumperu. Při hlubší rešerši však bylo od této myšlenky upuštěno. Bylo rozhodnuto vydat se mnohem progresivnější cestou a vytvořit modulární platformu střední velikosti. Toto rozhodnutí hodnotím zpětně jako klíčové, neboť definovalo veškeré další směřování práce.

Po důkladné analýze provozních požadavků na moderních stavbách, a to i v kontextu městské zástavby nebo vnitřních prostor, bylo zvoleno použití čistě elektrického bateriového pohonu v kombinaci s pásovým podvozkem. Toto řešení garantuje absolutně bezemisní a výrazně tišší provoz ve srovnání s konvenční diesellovou technikou. Absence rozměrného spalovacího motoru, a především chybějící kabina pro řidiče poskytly obrovskou tvarovou a dispoziční svobodu. Umožnily snížit celkové těžiště stroje a vytvořit kompaktní, vizuálně čistý produkt, který působí spíše jako pokročilý technologický produkt než jako tradiční těžká technika.

Z hlediska mechanické konstrukce a funkčnosti výměnných modulů hodnotím jako velmi úspěšné rozhodnutí implementovat pro upínání systém twistlocků. Ačkoliv se jedná o technologii primárně známou z těžké kontejnerové logistiky, její aplikace na středně velkou autonomní platformu se ukázala jako ideální, protože systém je dostatečně robustní, aby odolal extrémnímu znečištění i působícím silám v terénu, a přitom umožňuje rychlou, potenciálně plně automatizovanou výměnu modulů. Na tento systém plynule navazuje využití elektrohydraulických pístnic pro ovládání korby. Tato volba představuje ideální kompromis, kdy čistá elektrická energie z baterií pohání lokální hydraulické okruhy, což zajišťuje obrovskou sílu a spolehlivost nezbytnou pro náročné stavební práce při zachování ekologického standardu stroje. Za naprosto klíčový a nejvíce progresivní prvek však považuji integraci robotického ramene. Právě tento komponent posouvá celou platformu o úroveň výš, kdy stroj již nefunguje pouze jako pasivní transportní jednotka, ale stává se aktivním inteligentním stavebním asistentem schopným precizní manipulace. Tato schopnost vlastní nakládky je navíc podpořena systémem automatického sklápění bočnic. Zásadně se tím rozšiřuje užitná hodnota a autonomní potenciál v rámci moderního staveniště.

Celkové tvarování karoserie a proces hledání ideálních proporcí probíhal se snahou nalézt takový vizuální styl, který zajistí stoprocentní funkčnost, ale zároveň bude jasně respektovat specifickou roli stroje a jeho plně autonomní povahu. Namísto strohých geometrických ploch byly zvoleny organické, elipsou inspirované tvary. Tyto měkké, ale pevně definované křivky vytvářejí dojem maximální ucelenosti a odolnosti, což je v stavebním prostředí nezbytné, a zároveň dodávají stroji dynamiku. Právě tato plynulost tvarů odlišuje platformu od konvenční techniky a vizuálně akcentuje fakt, že se jedná o inteligentní, samostatně se pohybující produkt. Během vývoje bylo rovněž nutné vyřešit integraci citlivých senzorů, kamer a LiDARů tak, aby měly dostatečný přehled o okolí, ale zároveň byly chráněny před poškozením. Výsledné řešení, kdy je sensorika soustředěna do přední a zadní masky, kde navazuje na ostatní funkční prvky, nabízí kompromis mezi čistou estetikou a funkcí. Vytváří to charakteristický výraz stroje, který přirozeně nahrazuje psychologickou funkci chybějící kabiny a komunikuje s okolím.

Z pohledu bezpečnosti a interakce stroje s člověkem považuji za klíčové zachování výrazných fyzických prvků, jako jsou bezpečnostní vypínače, a promyšlené grafické řešení. Kombinace hladkých organických ploch s technickou typografií a výstražnými šrafami na krytech pásů dodává stroji potřebnou vizuální dynamiku a zároveň plní nezbytnou orientační a bezpečnostní funkci pro lidské pracovníky na stavbě.

Závěrečným a v dnešní době nezbytným klíčovým parametrem je celková udržitelnost návrhu. Ačkoliv počáteční výroba těžkých trakčních baterií a složité elektroniky představuje nevyhnutelnou ekologickou zátěž, hodnotím celkový dopad projektu jako spíše pozitivní. Hlavním přínosem je právě samotná modularita, kdy schopnost jednoho chytrého podvozku zastat s využitím nástaveb práci několika různých strojů potenciálně snižuje potřebu výroby dalších jednotek. V kombinaci s plně bezemisním provozem a volbou snadno recyklovatelných materiálů, jako jsou ocel a termoplasty, se tento návrh snaží zodpovědně reagovat na aktuální ekologické výzvy a nabízí smysluplnou vizi pro budoucí vývoj stavební techniky.

7 ZÁVĚR

V úvodní fázi této diplomové práce bylo nezbytné jasně definovat samotnou podstatu navrhovaného zařízení. Jelikož se jedná o typ stroje, který se do reálného provozu teprve postupně zavádí, nabízela se celá řada různých přístupů. Zásadním krokem tak bylo rozhodnutí o primárním úkolu robota. Na základě úvodních rešerší a analýz bylo zvoleno zaměření na logistické procesy a přesun materiálu, protože právě tyto úkony tvoří velkou část práce na staveništi a jsou pro automatizaci nejpřívětivější. Z této definice následně vyplynuly klíčové technické požadavky na celkovou velikost stroje a volbu podvozku, na který mohlo dále efektivně reagovat samotné tvarování.

Základem celého návrhu byla široká analýza možných technických řešení a konkurenčních produktů, která vytvořila reálný základ pro vlastní inovativní přístupy. Práce produkt řeší i po technické stránce, především z hlediska vnitřních a vnějších komponent, jejich logického uspořádání a využití pro spolehlivý a bezpečný chod. Zvolen byl plně elektrický pohon, který stroji zajišťuje lokálně bezemisní a tichý provoz, který je výhodný pro práci v městských zástavbách, uzavřených halách, nebo při nočním provozu. Pro přibližné ověření této koncepce byl zpracován matematický model provozu, který potvrdil životaschopnost navrženého energetického konceptu. Výpočty modelových cyklů ukázaly příznivý poměr mezi dobou aktivního nasazení a časem potřebným k následnému dobíjení akumulátorů. Díky tomu může stroj efektivně fungovat v opakujících se fázích a zajišťovat tak plynulý, téměř nepřetržitý provoz na staveništi. Právě tento technický vhled poskytl nezbytný a racionální základ pro následné zpracování tvarového řešení.

Již na základě provedených analýz se začal jasně rýsovat potenciál modulárního řešení. Ačkoliv se u menších robotů tento přístup pomalu stává trendem, v segmentu větších platforem se stále jedná o poměrně inovativní řešení. Aplikace modularity tak nabídla zcela logickou a přínosnou odpověď na potřebu maximálního využití stroje na stavbě i s ohledem na jeho potenciální budoucí vývoj. Právě přenesení této modulární architektury tak představuje jednu z významných inovací návrhu. Dalším klíčovým prvkem je integrace robotického manipulačního ramene. To platformu posouvá od pouhého transportního prostředku k aktivnímu pomocníkovi a radikálně tak rozšiřuje míru její celkové autonomie.

Veškeré tyto funkční a technické inovace se přímo promítají do finálního tvarového řešení, které propojuje funkční stránku stroje s tou estetickou. Jelikož se jedná o nový typ produktu, který na trhu ještě nemá pevně ustálené designové přístupy, nabízely se při jeho výtvarném řešení poměrně otevřené možnosti. Pro zachování vizuální soudržnosti jsou na karoserii použity opakující se výchozí křivky. Zvolené organické tvarování vizuálně podporuje odolnost a plynulost stroje. Tato plynulost je pak zcela záměrně narušena v ostřeji definované přední a zadní ploše, kde jsou soustředěny klíčové funkční prvky, světla a senzory. Takto koncipovaná přední a zadní maska dává stroji nejen jasnou směrnost pro orientaci v prostoru, ale dodává mu také specifický a čitelný výraz.

Výsledkem diplomové práce je komplexní výtvarně-technická studie autonomního mobilního robota pro stavební prostředí. I když je představený stroj navržen jako samostatně fungující jednotka, je důležité zmínit jeho širší přesah. Skutečný přínos totiž nastane ve chvíli, kdy v rámci projektu nebude operovat pouze jeden robot, ale celá kooperující flotila schopná plnit širší škálu provázaných úkonů. Přestože samotný segment autonomní stavební techniky se teprve formuje, podařilo se přijít s návrhem, který plní definované cíle a přináší ucelený a plně funkční produkt, který představuje inovaci jak z hlediska svého technologického a pracovního potenciálu, tak z hlediska estetiky.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Druh výsledku	Funkční vzorek
Název výsledku	Autonomní mobilní robot pro stavební prostředí
Autoři	Bc. Matěj Krejčí
Místo uložení výsledku	VUT Brno

Tabulka 8-1 Výsledek výzkumu RIV

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SRIVASTAVA, Amit, Sajjaf JAWAID, Rajesh SINGH, Anita GEHLOT, Shaik VASEEM AKRAM, Neeraj PRIYADARSHI a Baseem KHAN. Imperative Role of Technology Intervention and Implementation for Automation in the Construction Industry. *Advances in Civil Engineering* [online]. 2022, **18**(9) [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2022/6716987>
- [2] BARBOSA, Filipe a Jan MISCHKE. Improving construction productivity. In: *McKinsey & Company* [online]. c1996-2025 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/improving-construction-productivity>
- [3] A smarter way of building with mobile robots. In: *Fraunhofer* [online]. c2025 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2020/june/a-smarter-way-of-building-with-mobile-robots.html>
- [4] MUSARAT, Muhammad Ali, Wesam Salah ALALOUL, Nur Aqilah Qistina Ahmad ROSTAM a Abdul Mateen KHAN. Substitution of workforce with robotics in the construction industry: a wise or witless approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* [online]. 2024, (10) [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100420>
- [5] ASHRAF FAHEEM, Muhammad, Nabeel ZAFAR, Parkash KUMAR, Mehedi Hassan MELON, Nayem UDDIN PRINCE a Mohd Abdullah AL MAMUN. AI AND ROBOTIC: ABOUT THE TRANSFORMATION OF CONSTRUCTION INDUSTRY AUTOMATION AS WELL AS LABOR PRODUCTIVITY. *AI AND ROBOTIC: ABOUT THE TRANSFORMATION OF CONSTRUCTION INDUSTRY AUTOMATION AS WELL AS LABOR PRODUCTIVITY* [online]. 2024, (9) [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.33282/rr.vx9i2.42>
- [6] NEWTON, Emily. 4 Reasons Mobile Construction Robots Are a Contractor's Best Friend. In: *Robotics Tomorrow* [online]. c2010-2025 [cit. 2025-05-17]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/story/2024/02/4-reasons-mobile-construction-robots-are-a-contractors-best-friend/22101/>

- [7] Accidents at work statistics. In: *Eurostat* [online]. 2024 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics
- [8] 3 Ways Robots Are Making Construction Safer. In: *FORT* [online]. c2025 [cit. 2025-05-17]. Dostupné z: <https://www.fortrobotics.com/news/3-ways-robots-are-making-construction-safer>
- [9] CAO, Veanne. Digitizing construction sites with Scaled Robotics. In: *TechCrunch* [online]. c2025 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://techcrunch.com/2019/08/02/digitizing-construction-sites-with-scaled-robotics/>
- [10] Global Construction Robot Market By Function (Bricklaying, Material Handling, Demolition, Other Functions), By Robot Type (Robotic Arms, Traditional Robots, Exoskeletons), By End-Use (Residential Use, Commercial Use, Industrial Use), By Region, and Key Companies - Industry Segment Outlook, Market Assessment, Competition Scenario, Trends and Forecast 2024-2033. In: *Market.us* [online]. c2025 [cit. 2025-05-17]. Dostupné z: <https://market.us/report/construction-robot-market/#overview>
- [11] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. *Construction robots: Elementary technologies and single-task construction robots* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016 [cit. 2025-05-17]. Cambridge handbooks on construction robotics. ISBN 978-1-107-07599-3. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=V1IYDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&ots=uHOERjmIAC&sig=X_Qx1mY32kFJabGwmpV7dUx5Q2M&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [12] *NASKA.AI* [online]. c2025 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://naska.ai/>
- [13] Panther. *HUSARION* [online]. c2026 [cit. 2026-02-03]. Dostupné z: <https://husarion.com/manuals/panther/overview/>
- [14] BUNKER PRO. *AGILEX ROBOTICS* [online]. C2026 [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://global.agilex.ai/products/bunker-pro>
- [15] RB-FIQUUS. *ROBOTNIK* [online]. c2026 [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://robotnik.eu/products/mobile-robots/rb-fiquus/>

- [16] *AION ROBOTICS* [online]. c2026 [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://www.aionrobotics.com/>
- [17] CONSTRUCTION AUTOMATION PRODUCTS. *BAUBOT* [online]. c2025 [cit. 2026-02-04]. Dostupné z: <https://www.baubot.com/products>
- [18] HILTI JAIBOT. *HILTI* [online]. c2025 [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://www.hilti.com/content/hilti/W1/US/en/business/business/trends/jaibot.html>
- [19] THEMIS. *MILREM ROBOTICS* [online]. c2026 [cit. 2026-02-25]. Dostupné z: <https://milremrobotics.com/themis-family/>
- [20] Volvo Autonomous Hauler wins Red Dot award. *VOLVO CE* [online]. 2020, 23.06.2020 [cit. 2026-02-05]. Dostupné z: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2020/volvo-autonomous-hauler-wins-red-dot-award/>
- [21] *VOLVO Autonomous Solution* [online]. c2026 [cit. 2026-02-05]. Dostupné z: <https://www.volvoautonomoussolutions.com/en-en/>
- [22] RUBIO, Francisco, Francisco VALERO a Carlos LLOPIS-ALBERT. a review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2019, 2019-03-01, **16**(2) [cit. 2025-05-17]. ISSN 1729-8806. Dostupné z: doi:10.1177/1729881419839596
- [23] GUO, Tianyou, Junlong GUO, Bo HUANG a Huei PENG. Power consumption of tracked and wheeled small mobile robots on deformable terrains—model and experimental validation. *Mechanism and Machine Theory* [online]. 2019, (133), 347-364 [cit. 2026-02-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X18312783>
- [24] The diagram of operation of differential drive. In: *42Bots.com* [online]. c2025 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://42bots.com/tutorials/differential-steering-with-continuous-rotation-servos-and-arduino/>
- [25] The Benefits of Tracks vs Tires. In: *Elmer's manufacturing* [online]. [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://elmersmfg.com/benefits-tracks-vs-tires/>

- [26] BRUZZONE, Luca, Shahab EDIN NODEHI a Pietro FANGHELLA. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: a Review. *Machines* [online]. 2022, **10**(8), 648 [cit. 2026-02-07]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/648>
- [27] KOROBEENKO, Yaroslav, Dmytro MISHCHUK a Maksym BALAKA. Overview of suspension systems for mobile wheeled robots. In: *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [online]. Kyiv National University of Construction and Architecture, 2024, 2024-12-19, s. 28-37 [cit. 2026-02-07]. ISSN 2709-6149. Dostupné z: doi:10.32347/gbdmm.2024.104.0301
- [28] GAO, Junfeng, Yi LI, Jingfu JIN, Zhicheng JIA a Chao WEI. Design, Analysis and Control of Tracked Mobile Robot with Passive Suspension on Rugged Terrain. *Actuators* [online]. MDPI, 2025, 2025-8-6, **14**(8), 389 [cit. 2026-02-07]. ISSN 2076-0825. Dostupné z: doi:10.3390/act14080389
- [29] TRAILED TRACK SYSTEMS. In: *CAMSO* [online]. c2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://camso.co/en/agriculture/trailed-tracks-systems/>
- [30] FRANCIS, N. a S. KAMALESH RAO. Automotive Chassis Frame Structural Analysis and Design Modification for Weight Reduction. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation* [online]. 2020, **24**(10), 7827-7858 [cit. 2026-02-28]. Dostupné z: <https://www.psychosocial.com/index.php/ijpr/article/download/7537/6739/13509>
- [31] LAJUNEN, Antti, Jussi SUOMELA, Jenni PIPPURI, Kari TAMMI, Teemu LEHMUSPELTO a Panu SAINIO. Electric and Hybrid Electric Non-Road Mobile Machinery – Present Situation and Future Trends. *World Electric Vehicle Journal* [online]. MDPI, 2016, 2016-3-25, **8**(1), 172-183 [cit. 2026-02-08]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj8010172
- [32] Peak load management summary. In: *Wiley Online Library* [online]. c1999-2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.202101055?saml_referrer
- [33] HUSAIN, Iqbal. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals* [online]. Third edition. Boca Raton, 2021 [cit. 2026-03-22]. ISBN 978-0-429-49092-7. Dostupné z: https://www.academia.edu/118407148/Electric_and_Hybrid_Vehicles

- [34] Electric Traction and Steering Solutions Provide Rugged, Economical, User-friendly Solutions for Autonomous Robots, AGVs, Lift Trucks, and Similar Vehicles. In: *Allied Motion* [online]. c2026 [cit. 2026-02-08]. Dostupné z: <https://www.alliedmotion.com/electric-traction-and-steering-for-robotic-vehicles/>
- [35] Schematic of electric traction system. In: *MDPI* [online]. 2024 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/2/47>
- [36] ŞEN, Mehmet a Mümtaz MUTLUER. a Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection. *Energies* [online]. MDPI, 2025, 2025-12-8, **18**(24), 6402 [cit. 2026-02-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en18246402
- [37] ZUBI, Ghassan, Rodolfo DUFO-LÓPEZ, Monica CARVALHO a Guzey PASAOGLU. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **89**, 292-308 [cit. 2026-02-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
- [38] LITHIUM NMC VS LIFEP04. In: *JMHPower* [online]. 2024 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://jmhpower.com/lithium-nmc-vs-lifepo4-how-to-choose-the-best-one-for-your-needs/>
- [39] XING, Yinjiao, Eden W. M. MA, Kwok L. TSUI a Michael PECHT. Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. *Energies* [online]. MDPI, 2011, 2011-10-31, **4**(11), 1840-1857 [cit. 2026-02-21]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en4111840
- [40] Diagram of a Battery Management System (BMS). In: *Upsbatterycenter.com* [online]. 2025 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://blog.upsbatterycenter.com/capital-b-for-brain-in-batteries/>
- [41] The rise of the 48V robots. In: *POWER ELECTRONIC NEWS* [online]. 2020, 9.3.2020 [cit. 2026-02-21]. Dostupné z: <https://www.powerelectronicsnews.com/the-rise-of-the-48v-robots/>
- [42] PIEDEL, Emma, Enrico LAUTH, Alexander GRAHLE a Dietmar GÖHLICH. Review and Evaluation of Automated Charging Technologies for Heavy-Duty Vehicles. *World Electric Vehicle Journal* [online]. MDPI, 2024, 2024-5-29, **15**(6), 235 [cit. 2026-02-21]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj15060235

- [43] Wireless charging of a mobile robot. In: *Research Gate* [online]. 2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/401562148_A_Power-Factor-Corrected_Wireless_Charging_System_with_Simple_Control_for_Indoor_Mobile_Robots/figures
- [44] OKONKWO, Chinedu a Ibukun AWOLUSI. Environmental sensing in autonomous construction robots: Applicable technologies and systems. *Automation in Construction* [online]. Elsevier BV, 2025, **172**, 106075 [cit. 2026-02-21]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2025.106075
- [45] High-Resolution 2D LiDAR Scanning. In: *Neuvition* [online]. 2023 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://www.neuvition.com/media/exploring-the-applications-of-high-resolution-2d-lidar-scanning-in-construction-and-architecture.html>
- [46] The basic concept of standalone GNSS localization (left) and the principle of RTK GNSS (right), where the base station measures the carrier phase and sends it to the rover, the mobile device. In: *Research Gate* [online]. 2020 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/344743765_RTK-LoRa_High-Precision_Long-Range_and_Energy-Efficient_Localization_for_Mobile_IoT_devices/figures?lo=1
- [47] AL-OKBY, Mohammed, Steffen JUNGINGER, Thomas RODDELKOPF a Kerstin THUROW. UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems: a Comprehensive Review. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2024, 2024-11-26, **14**(23), 11005 [cit. 2026-02-21]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app142311005
- [48] REN, Zhihao a Jung In KIM. The Role of AI in On-Site Construction Robotics: a State-of-the-Art Review Using the Sense–Think–Act Framework. *Buildings* [online]. MDPI, 2025, 2025-7-7, **15**(13), 2374 [cit. 2026-02-25]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings15132374
- [49] LIU, Shaoshan, Liangkai LIU, Jie TANG, Bo YU, Yifan WANG a Weisong SHI. Edge Computing for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges. *Proceedings of the IEEE* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2019, **107**(8), 1697-1716 [cit. 2026-02-25]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/jproc.2019.2915983

- [50] Jetson Thor Developer Kit. In: *NVIDIA.DEVELOPER* [online]. c2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/embedded/buy-jetson?product=all&location=CZ>
- [51] LI, Yong, Jiexin AN, Na HE, Yanbo LI, Zhenyu HAN, Zishan CHEN a Yaping QU. a Review of Simultaneous Localization and Mapping Algorithms Based on Lidar. *World Electric Vehicle Journal* [online]. MDPI, 2025, 2025-1-21, **16**(2), 56 [cit. 2026-02-27]. ISSN 2032-6653. Dostupné z: doi:10.3390/wevj16020056
- [52] WIJAYATHUNGA, Liyana, Alexander RASSAU a Douglas CHAI. Challenges and Solutions for Autonomous Ground Robot Scene Understanding and Navigation in Unstructured Outdoor Environments: a Review. *Applied Sciences* [online]. MDPI, 2023, 2023-8-31, **13**(17), 9877 [cit. 2026-02-27]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app13179877
- [53] KIM, Kyunghwan, Kangeun KIM a Soyeon JEONG. Application of YOLO v5 and v8 for Recognition of Safety Risk Factors at Construction Sites. *Sustainability* [online]. MDPI, 2023, 2023-10-23, **15**(20), 15179 [cit. 2026-02-27]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su152015179
- [54] Planned path based on the A-star algorithm. In: *Research Gate* [online]. 2020 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/346351885_Fast_Path_Planning_for_On-Water_Automatic_Rescue_Intelligent_Robot_Based_on_Constant_Thrust_Artificial_Fluid_Method/figures?lo=1
- [55] MENDOZA, Jessica, Isabel DE-LA-BANDERA, Carlos Simón ÁLVAREZ-MERINO, Emil Jatib KHATIB, Jesús ALONSO, Sebastián CASALDERREY-DÍAZ a Raquel BARCO. 5G for Construction: Use Cases and Solutions. *Electronics* [online]. MDPI, 2021, 2021-7-17, **10**(14), 1713 [cit. 2026-02-27]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics10141713
- [56] Network Slicing in 5G. In: *Research Gate* [online]. 2024 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/385321905_AI-Driven_5G_Network_Optimization_A_Comprehensive_Review_of_Resource_Allocation_Traffic_Management_and_Dynamic_Network_Slicing/figures?lo=1

- [57] DESAI, Nitin a Sasikumar PUNNEKKAT. Safety-oriented flexible design of Autonomous Mobile Robot systems. *2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* [online]. IEEE, 2019, 1-7 [cit. 2026-03-01]. Dostupné z: doi:10.1109/isse46696.2019.8984481
- [58] Hydraulics in Autonomous Construction Equipment. In: *Worldwide hydraulic professionals* [online]. c2025 [cit. 2026-02-28]. Dostupné z: <https://whyps.com/hydraulics-in-autonomous-construction-equipment>
- [59] Handling Heavy Loads in Tight Spaces - Comparing electro-hydraulic actuators and hydraulic cylinders. In: *THOMSON* [online]. c2000-2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: https://www.thomsonlinear.com/en/support/articles/Comparing-electro-hydraulic-actuators-and-hydraulic-cylinders-eu?srsId=AfmBOorRnIo_rpICESHM-Rj1klPspjvmfjWacVmYU4PJ-ODcs_5gpmO
- [60] ZENG, Lingdong, Shuai GUO, Jing WU a Bernd MARKERT. Autonomous mobile construction robots in built environment: a comprehensive review. *Developments in the Built Environment* [online]. Elsevier BV, 2024, **19**, 100484 [cit. 2026-02-28]. ISSN 2666-1659. Dostupné z: doi:10.1016/j.dibe.2024.100484
- [61] BOCK, Thomas a Thomas LINNER. *Logistics, site automation, and robotics: automated and robotic on-site factories* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016 [cit. 2026-03-22]. Cambridge handbooks on construction robotics. ISBN 978-110-7075-979. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139872027
- [62] UR20. In: *UNIVERSAL ROBOTS* [online]. c2026 [cit. 2026-04-25]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/ur20/>
- [63] Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2023/1230 ze dne 14. června 2023 o strojních zařízeních a o zrušení směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/42/ES a směrnice Rady 73/361/EHS. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS, s.r.o. 2010–2026 [cit. 2026-03-01]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/pravoecu/dokument?celex=32023R1230>
- [64] ISO 17757. *Earth-moving machinery and mining — Autonomous and semiautonomous machine system safety*. Second edition. Switzerland, 2019.
- [65] ISO 13849-1. *Safety of machinery - Safety-related parts of control system*. Fourth edition. Switzerland, 2023.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam použitých zkratk

2D	two-dimensional
3D	three-dimensional
AI	Artificial Intelligence
BIM	Building Information Modeling
BLDC	Brushless DC Motor
BMS	Battery Management System
CAN	Controller Area Network
CAGR	Compound Annual Growth Rate
DC	Direct Current
DCPD	Dicyclopentadiene
DWA	Dynamic Window Approach
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EHA	Electro-Hydraulic Actuator
EPDM	Ethylene propylene diene monomer
EU	European Union
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit

HDPE	High-Density Polyethylene
IoT	Internet of Things
IP	Ingress Protection
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
LFP	Lithium iron phosphate
LiDAR	Light Detection and Ranging
MavLink	Micro Air Vehicle Link
MPC	Model Predictive Control
NMC	Lithium nickel manganese cobalt oxide
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
PC	Polycarbonate
PCB	Printed Circuit Board
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
QA	Quality Assurance
QR	Quick Response
RAL	Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen (mezinárodní barevný standard)
RGB-D	Red, Green, Blue + Depth
ROS	Robot Operating System

RTK	Real-Time Kinematic
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SoC	State of Charge
TMS	Thermal Management System
UGV	Unmanned Ground Vehicle
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
UTV	Utility Task Vehicle
USD	United States Dollar
UV	Ultraviolet
UWB	Ultra-Wideband
Wi-Fi	Wireless Fidelity
YOLO	You Only Look Once

10.2 Seznam použitých veličin a jednotek

%	procento
<i>kg</i>	kilogram
°	symbol stupně
<i>Wh/kg</i>	Watt-hodina na kilogram
<i>V</i>	volt
<i>t</i>	tuna
<i>kWh</i>	kilowatt-hodina
<i>kW</i>	kilowatt

<i>mm</i>	milimetr
<i>kN</i>	kilonewton
<i>Kč</i>	koruna česká
<i>hod</i>	hodina

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 PRISMA diagram.....	19
Obr. 2-2 Porovnání produktivity stavebnictví [2]	20
Obr. 2-3 Rámec využití autonomních robotů ve stavebnictví [4]	21
Obr. 2-4 Analýza trhu se stavební robotikou [10].....	23
Obr. 2-5 Senzorické vybavení [12].....	24
Obr. 2-6 Naska.AI Noether [12].....	24
Obr. 2-7 Husarion Panther [13].....	25
Obr. 2-8 AGILEX BUNKER PRO [14]	27
Obr. 2-9 Robotnik RB-FIQUUS [15]	28
Obr. 2-10 AION ROBOTICS L4 [16]	29
Obr. 2-11 BAUBOT MRS15 [17]	31
Obr. 2-12 HILTI JAIBOT [18]	32
Obr. 2-13 MILREM ROBOTICS THEMIS [20].....	33
Obr. 2-14 VOLVO TA15 [21]	34
Obr. 2-15 The diagram of operation of differential drive [24].....	37
Obr. 2-16 The Benefits of Tracks vs Tires [25].....	39
Obr. 2-17 double oscillating bogie suspension [29]	41
Obr. 2-18 Peak load management summary [32]	43
Obr. 2-19 Schematic of electric traction system [35]	44
Obr. 2-20 LITHIUM NMC VS LIFEP04 [38]	47
Obr. 2-21 Diagram of a Battery Management System (BMS) [40].....	49
Obr. 2-22 Wireless charging of a mobile robot [43]	51
Obr. 2-23 High-Resolution 2D LiDAR Scanning [45]	53
Obr. 2-24 The basic concept of standalone GNSS localization (left) and the principle of RTK GNSS (right) [46]	55
Obr. 2-25 The NVIDIA® Jetson AGX Thor™ [50]	58
Obr. 2-26 Example of object detection [53].....	61
Obr. 2-27 Planned path based on the A-star algorithm [54]	62

Obr. 2-28 Network Slicing in 5G [56]	63
Obr. 2-29 Electro-hydraulic actuator [59]	66
Obr. 2-30 COBOT UR20 [62]	67
Obr. 6-1 Přední perspektivní pohled finálního návrhu	99
Obr. 6-2 Proporce vzhledem k muži 50P	100
Obr. 6-3 Perspektivní pohled finálního návrhu zezadu	101
Obr. 6-4 Perspektivní pohled přední části	102
Obr. 6-5 Detailní pohled přední části.....	103
Obr. 6-6 Perspektivní boční pohled	104
Obr. 6-7 Ortografický boční pohled s hlavními křivkami.....	105
Obr. 6-8 Detailní boční pohled	106
Obr. 6-9 Perspektivní pohled zadní části.....	107
Obr. 6-10 Detailní pohled zadní části	108
Obr. 6-11 Perspektivní pohled na korbu na kusový materiál	109
Obr. 6-12 Perspektivní pohled na korbu na sypký materiál	110
Obr. 6-13 Perspektivní pohled na rameno	111
Obr. 6-14 Vnitřní schéma uspořádání komponent	113
Obr. 6-15 Pozorovací úhly senzorů a kamer, pohled shora.....	115
Obr. 6-16 Pozorovací úhly senzorů, pohled zboku	115
Obr. 6-17 Detailní pohled – ovládací panel	116
Obr. 6-18 Twistlock mechanismus.....	117
Obr. 6-19 Perspektivní pohled s vyklopenou korbou	118
Obr. 6-20 Materiálový rozpad	119
Obr. 6-21 Rozměrové řešení s korbou pro kusové materiály	120
Obr. 6-22 Rozměrové řešení s korbou pro sypké materiály	120
Obr. 6-23 Dosah ramene, pohled zboku.....	121
Obr. 6-24 Dosah ramene, pohled zepředu	121
Obr. 6-25 Boční ergonomický pohled.....	122
Obr. 6-26 Boční ergonomický pohled – servisní přístupy	123
Obr. 6-27 Boční ergonomický pohled – manipulace s nákladem	123

Obr. 6-28 Přední ergonomický pohled – manipulace s nákladem	124
Obr. 6-29 Boční ergonomický pohled – obsluha ovládacího panelu	124
Obr. 6-30 Detailní pohled – ovládací panel	125
Obr. 6-31 Ergonomický pohled – ovládací panel	125
Obr. 6-32 Boční ergonomický pohled – nouzové vypnutí	126
Obr. 6-33 Finální barevná varianta	127
Obr. 6-34 Barevná varianta II	128
Obr. 6-35 Barevná varianta III	129
Obr. 6-36 Základní logotyp	130
Obr. 6-37 Písmo Share Tech Mono	130
Obr. 6-38 Grafické řešení finálního návrhu	131

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Zhodnocení cílů.....	75
Tabulka 4-1 Zhodnocení variant	88
Tabulka 5-1 Odhad hmotnosti komponent	95
Tabulka 5-2 Odhad ceny	96
Tabulka 5-3 Odhad energetické náročnosti systémů.....	97

13 SEZNAM PŘÍLOH

- Sumarizační poster
- Ergonomický poster
- Technický poster
- Designérský poster

Samostatné přílohy:

- Sumarizační poster
- Ergonomický poster
- Technický poster
- Designérský poster
- Fyzický model

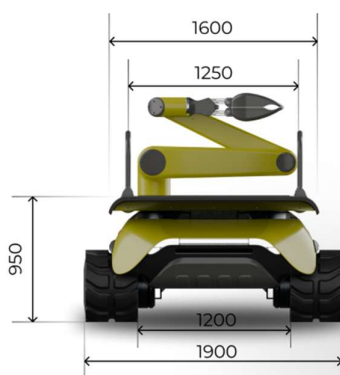
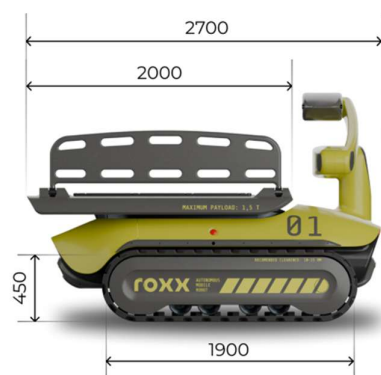
14 PŘÍLOHY



roxx

SUMARIZAČNÍ POSTER

Předložený koncept představuje vizi plně autonomního mobilního robota určeného pro zefektivnění logistiky ve stavebním prostředí. Základem řešení je elektricky poháněná pásová platforma, zaručující bezemisní provoz a výbornou prostupnost terénem. Stěžejní inovací návrhu je modulární architektura v kombinaci s integrovaným manipulačním ramenem, jež robota posouvá z pasivního nosiče na flexibilní a aktivní pracovní jednotku. Tvarování karoserie staví na organických a plynulých křivkách, které stroji dodávají výraz kompaktnosti a pevnosti. Komplexní senzorická výbava a funkční prvky jsou integrovány přímo do celkového tvarování stroje. Klíčové orientační prvky se soustředí v jasně definované přední a zadní masce, které ve spojení s LED osvětlením slouží jako hlavní komunikační rozhraní s okolím. Výsledkem je inovativní a esteticky ucelená platforma, jež tvoří základ pro budoucí nasazení.



DESIGN AUTONOMNÍHO MOBILNÍHO ROBOTA PRO STAVEBNÍ PROSTŘEDÍ / DIPLOMOVÁ PRÁCE / Autor: Bc. Matěj Krejčí / Vedoucí práce: doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD. / VUT v Brně / FSI / ÚK / OPD / 2025/26

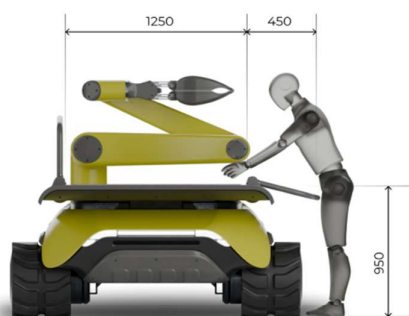


roxx

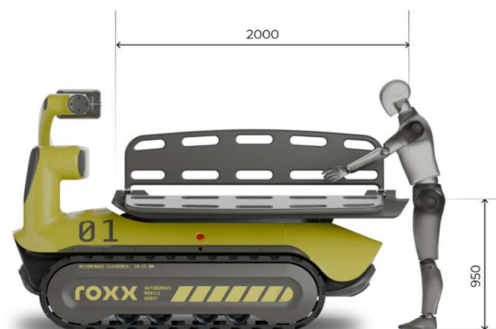
ERGONOMICKÝ POSTER

Vzhledem k plně autonomní povaze stroje se přístup k ergonomii logicky přesouvá k celkové bezpečnosti provozu a řešení okrajových situací, které mohou v provozu nastat. Cílem návrhu je zajistit bezproblémové a maximálně bezpečné sdílení pracovního prostoru mezi robotem a lidmi. Ergonomické řešení se proto soustředí především na vnější ovládací prvky, nouzové systémy a přístupnost servisních zón. Veškerá tato místa vyžadující manuální zásah jsou navržena tak, aby byla snadno přístupná a jejich obsluha byla intuitivní. Optimalizována je rovněž výška platformy, aby v případě potřeby umožňovala snadnou manipulaci s nákladem. Jakýkoliv fyzický zásah, kontrola či údržba stroje jsou díky tomu rychlé, dostupné a intuitivní. Tento funkční základ je doplněn o základní vizuální komunikaci. Promyšlený systém osvětlení a tvarování karoserie zajišťují jasnou signalizaci aktuálního stavu a pohybu stroje, čímž bezpečně a srozumitelně předcházejí jakýmkoliv kolizním situacím.

Manipulace s nákladem z boku



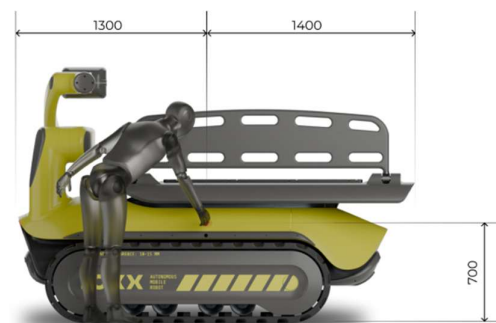
Manipulace s nákladem zepředu



Obsluha ovládacího panelu



Bezpečnostní stop tlačítko



Technické řešení stroje je plně podřízeno nárokům stavebního prostředí s důrazem na spolehlivost a odolnost. Základem platformy je robustní pásový podvozek, který zaručuje vynikající trakci, stabilitu a nízký měrný tlak na podloží i v tom nejnáročnějším terénu. Pohon je řešen čistě elektricky prostřednictvím trakčních elektromotorů napájených z vysokokapacitních bateriových modulů. Tento systém zajišťuje nejen lokálně bezemisní a tichý chod, ale především okamžitý nástup vysokého točivého momentu, který je nezbytný pro efektivní pohyb s těžkým materiálem.

Nosná struktura platformy počítá s využitím oceli, aby bezpečně odolala vysokému mechanickému a torznímu namáhání během pracovních cyklů. V kontrastu s tím je vnější tvarovaná kapotáž navržena z lehkých a vysoce odolných průmyslových plastů. Tyto materiály nejenže umožňují realizaci charakteristického organického tvarování, ale efektivně snižují celkovou hmotnost stroje a slouží jako spolehlivá ochrana vnitřních technologických uzlů.

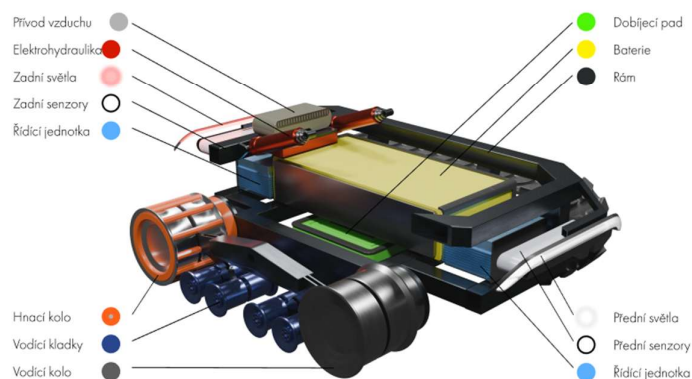
Značná péče je věnována integraci citlivé elektroniky. Klíčová sensorika, zahrnující LIDARy, kamery a radary, je bezpečně ukryta za panely z tvrdých polymerů. Ty zaručují optimální propustnost signálů a zároveň chrání optiku před prachem, vodou a mechanickým poškozením. Modularita stroje je pak technicky podpořena standardizovaným upínacím mechanismem, který zajišťuje pevné ukojení výměnných nástavb.



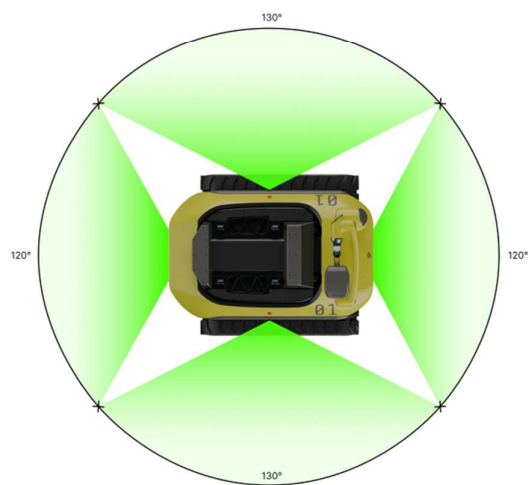
Materiálový rozpad



Schéma vnitřních komponent



Pozorovací úhly senzorů



Rozměrové řešení



Design autonomního mobilního robota pro stavební prostředí

2026

Matěj Krejčí

vedoucí: doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD.

Autonomní stavební platforma představuje koncepční vizi, která propojuje náročné prostředí těžkého průmyslu s pokročilou robotikou. Přítomnost tohoto stroje na staveništi přináší zcela nový pohled na kooperaci člověka a technologií. Záměrné opuštění rysů tradiční techniky dává vyniknout plynulému tvarování, které stroji propůjčuje výraz pevnosti a kompaktnosti. Karoserie je koncipována jako ucelený, vizuálně čistý objem, do něhož je zcela přirozeně začleněna veškerá senzorická výbava a funkční prvky. Tento specifický designový přístup podtrhuje technologickou vyspělost platformy a podporuje bezpečnou interakci na pracovišti. Provozovateli pak návrh nabízí maximální flexibilitu a efektivitu díky modulární architektuře a integrovanému rameni. Celkový design reflektuje nutný posun od tradiční hrubé síly k inteligentním a udržitelným řešením. Svým výtvarným pojetím a zpracováním tak robot přináší estetickou i funkční rovnováhu, která plně respektuje potřeby moderního stavebnictví.

