



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 ZEMĚDĚLSKÉHO TRAKTORU

DESIGN OF AUTONOMOUS AGRICULTURAL TRACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kárych

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Kárych**
Studijní program: Průmyslový design ve strojírenství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. akad. soch. Ladislav Křenek, ArtD.**
Akademický rok: 2024/25

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

Design autonomního zemědělského traktoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Precizní zemědělství a automatizace strojů. Tyto dva faktory v současné době nabírají na stále větší důležitosti. Mnoho výrobců zemědělské techniky již představilo svůj autonomní stroj – stroj, který nepotřebuje řidiče. Výtvarně – technická studie takto koncipovaného zemědělského stroje by měla přinést nový a inspirující pohled na tuto problematiku a představit vizuálně atraktivní design.

Typ práce: vývojová – designérská

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

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je navrhnout vizi autonomního zemědělského traktoru na alternativní pohon. Návrh by měl respektovat designem, konstrukcí i výrobními technologiemi specifika prostředí ve kterém bude stroj pracovat.

Dílní cíle diplomové práce:

- analyzovat současný stav a vize v oblasti řešené problematiky,
- navrhnou originální design a technicky progresivní koncepci,
- 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 2024/25

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 zemědělského traktoru s vodíkovým pohonem, koncipovaného jako vize budoucího zemědělství v horizontu 30–40 let. Cílem je integrovat inovativní technologie a designové principy do funkčního a esteticky působivého celku.

Problém je řešen komplexní výtvarně-technickou studií, která kombinuje analýzu technologií s detailním návrhem nového pojetí stroje. Důraz je kladen na absenci kabiny řidiče a využití vodíkové nádrže jako centrálního designového prvku společně s organickým tvarováním karoserie.

Konkrétním výsledkem je ucelený koncepční návrh autonomního traktoru, který reflektuje potřeby plně automatizovaného zemědělství a demonstruje možnosti alternativního pohonu. Práce zahrnuje designérská řešení vzhledem k veškerým systémům a obhajuje vybraný alternativní pohon z hlediska doby provozu a lokální výroby vodíku.

Tato práce je užitečná pro průmyslový design a zemědělskou techniku, neboť poskytuje inovativní pohled na budoucí podobu autonomních strojů a inspiruje k dalšímu výzkumu v udržitelné a automatizované zemědělské výrobě.

KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní traktor, vodík, průmyslový design, zemědělství, udržitelnost

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the design of an autonomous hydrogen-powered agricultural tractor, conceived as a vision for the future of agriculture in a 30–40 year horizon. The aim is to integrate innovative technologies and design principles into a functional and aesthetically compelling unit.

The problem is addressed through a comprehensive artistic-technical study, combining technology analysis with a detailed design of a new machine concept. Emphasis is placed on the absence of a driver's cabin and the utilization of the hydrogen tank as a central design element with organic shaping used for body.

The specific result is a comprehensive conceptual design of an autonomous tractor that reflects the needs of fully automated agriculture and demonstrates the possibilities of alternative propulsion. The thesis includes design solutions, based on technical systems, and justifies the chosen alternative propulsion in terms of operating time and local hydrogen production.

This thesis is beneficial for industrial design and agricultural technology, providing an innovative perspective on the future form of autonomous machinery and inspiring further research in sustainable and automated agricultural production.

KEYWORDS

autonomous tractor, hydrogen, industrial design, agriculture, sustainability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KÁRYCH, Tomáš. *Design autonomního zemědělského traktoru*. Diplomová práce. Ladislav KŘENEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi jakkoli pomohli k dokončení této diplomové práce, děkuji:

doc. Ladislavu Křenkovi za podnětné připomínky a všem vyučujícím odboru průmyslového designu za inspirativní konzultace.

Dále vděčím převážně doc. Martinu Vrbkovi, za připomínky k technickému řešení a smysluplnosti celé práce s důrazem na textovou část.

Lidem, kteří spravují dílny StrojLabu, které poskytly kvalitní prostory k zpracování modelu.

Všem kamarádům, spolubydlícím, rodině a své přítelkyni, kteří poskytli svůj názor či jinak pomáhali k úspěšnému zvládnutí diplomové práce.

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.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Rešeršní metody	15
2.1.1	Kritéria relevance pro výběr informačních zdrojů	15
2.1.2	Použité sekundární zdroje	15
2.1.3	Rešeršní požadavek a rešeršní strategie	16
2.1.4	Výběr relevantních informačních pramenů	16
2.1.5	Užité metody zpracování dat	17
2.2	Motivační analýza	18
2.3	Designérská analýza	20
2.3.1	Historický vývoj	20
2.3.2	Současné koncepty	22
2.4	Technická analýza	43
2.4.1	Komponenty autonomního systému	43
2.5	Identifikace příležitostí	75
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	77
3.1	Vymezení problému	77
3.1.1	Název produktu a jeho klasifikace	78
3.1.2	Specifikace zákazníka	79
3.1.3	Specifikace uživatele	79
3.1.4	Vymezení atributů a cílů produktu	80
3.2	Cíl práce	81
3.2.1	Globální cíl práce	81
3.2.2	Díličí cíle diplomové práce	81
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	83
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	83
4.2	Technická funkční analýza	84
4.2.1	GLASSBOX	85
4.2.2	Specifikace vnitřních komponent	85
4.2.3	Specifikace vnějších prvků	89
4.3	Návrh variantních řešení	91
4.3.1	Varianta I	92
4.3.2	Varianta II	94

4.3.3	Varianta III	95
4.4	Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího	97
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	99
5.1	Matematický model	99
5.2	Určení tvaru rozměrů a materiálů	101
6	DETAILNÍ NÁVRH	111
6.1	Tvarové řešení	111
6.1.1	Proporce a kompozice	111
6.1.2	Přední pohled	113
6.1.3	Boční pohled	117
6.1.4	Zadní pohled	119
6.2	Konstrukční návrh	124
6.3	Ergonomické řešení a bezpečnost	130
6.4	Barevné a grafické řešení	133
6.4.1	Barevné řešení	133
6.4.2	Grafické řešení	136
6.5	Udržitelnost produktu	139
6.5.1	Udržitelnost autonomního traktoru	139
6.5.2	Vize udržitelného zemědělství budoucnosti	139
6.6	Hodnocení klíčových parametrů	144
7	ZÁVĚR	146
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	148
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	149
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	157
10.1	Seznam použitých zkratk	157
10.2	Seznam použitých veličin a jednotek	158
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	159
12	SEZNAM TABULEK	164
13	SEZNAM PŘÍLOH	165

1 ÚVOD

Zemědělství, jako jeden z pilířů lidské civilizace, prochází nepřetržitou transformací s cílem zvýšit efektivitu a udržitelnost produkce potravin. S rostoucí globální populací a tlakem na odpovědné využívání zdrojů se automatizace stává neodmyslitelnou součástí jeho budoucího rozvoje. V tomto kontextu se autonomní zemědělské stroje, a zvláště autonomní traktory, jeví jako klíčová inovace, jež přinese zásadní změny do zemědělských procesů v nadcházejících desetiletích. Tato diplomová práce se zabývá návrhem autonomního zemědělského traktoru s vizí jeho plného nasazení v horizontu 30 až 40 let, primárně pro střední a velké polnosti v evropském regionu.

Přední světoví výrobci zemědělské techniky již investují do vývoje autonomních systémů, což otevírá nové výzvy pro průmyslový design. Tradiční pojetí traktoru je v éře autonomie přehodnocováno, neboť absence řidiče eliminuje potřebu kabiny a zároveň nabízí prostor pro zcela nová konstrukční a estetická řešení. Práce se zaměřuje na analýzu aktuálních trendů v oblasti autonomních traktorů a na vypracování výtvarně-technické studie, která kombinuje estetické, funkční a výrobní požadavky.

Klíčovým aspektem práce byla volba alternativního pohonu a jeho integrace do celkového designu. Po důkladné technické a designérské analýze byl zvolen vodíkový pohon, který je v PEM palivovém článku elektrochemicky přeměňován na elektrickou energii. Toto rozhodnutí, společně s eliminací kabiny řidiče a volbou kolového podvozku, sloužilo jako základ pro inovativní tvarování. Výsledný design je charakteristický odhalenou vodíkovou nádrží, která zaujímá místo chybějící kabiny a vizuálně napomáhá akceptaci této nové koncepce. Karoserie se vyznačuje organickým tvarováním s plynulými liniemi, které symbolizují čistotu vodíkového pohonu a zároveň zachovávají robustní výraz zemědělského stroje. Součástí práce je také řešení integrace senzorických systémů, osvětlení, prvků pro údržbu a bezpečnostních systémů, včetně aplikace topologické optimalizace při návrhu konstrukčních částí.

Diplomová práce tak reflektuje nejen technické potřeby zemědělství v následujících desetiletích, ale především odpovídá na otázky, které zásadně ovlivní vzhled budoucích traktorů. Nabízí komplexní vizi udržitelného a multifunkčního stroje, společně s návrhem komplexního systému pro lokální výrobu čistého vodíku v místě zemědělské činnosti, který přináší nový pohled na efektivnější a udržitelnější budoucnost zemědělství.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

2.1.1 Kritéria relevance pro výběr informačních zdrojů

Před samotným vyhledáváním relevantních informačních zdrojů byla klíčová formulace rešeršních požadavků, což zahrnovalo definování specifických klíčových slov. Mezi hlavní klíčová slova a fráze patřila: „autonomní traktor, autonomous tractor“, „autonomní řízení, autonomous driving“, „budoucnost zemědělství, future of agriculture“, „zemědělství 4.0, Agriculture 4.0“, „alternativní energie, alternative source“, „řidičská kabina, driver's cabin“, „konstrukce, construction“, „bezpečnost, safety“, „ergonomie, ergonomics“, „design“, a „koncept, concept“. V některých případech byla použita kombinace těchto slov a také jejich synonyma nebo alternativní výrazy. Tento vytvořený seznam klíčových slov byl následně použit k vyhledávání ve vhodných primárních a sekundárních informačních zdrojích. Preferovány byly odborné články, akademické knihy, periodika a patenty. Vyhledávání bylo primárně prováděno v anglickém jazyce, aby se zajistil přístup k co nejširšímu spektru relevantních zdrojů. Vzhledem k tématu v oblasti autonomních traktorů nebylo stanoveno přísné časové omezení pro vyhledávané zdroje, jelikož se v tomto odvětví, přemýšlelo o traktorech bez řidiče léta. Prioritní byly především aktuální publikace z posledních let, které reflektují nejnovější pokroky a trendy v této oblasti. Samotné vyhledávání zdrojů bylo podpořeno stanovením konkrétních rešeršních otázek, které pomáhaly filtrovat a hodnotit relevanci nalezených materiálů. Po důkladném zhodnocení byly vybrány pouze ty zdroje, které poskytovaly nejdetailnější a nejrelevantnější informace k problematice autonomních zemědělských traktorů.

2.1.2 Použité sekundární zdroje

K vyhledání vhodných informačních zdrojů byla použita zmíněná klíčová slova a aplikace rešeršních metod. Databáze jako Primo, ScienceDirect, SciSpace, Google Scholar či Google Patents byly využity pro nalezení odborných článků, knih a publikací. Mezi prameny byly zahrnuty také patenty, stránky výrobců, obrázkové zdroje a další relevantní informace.

2.1.3 Rešeršní požadavek a rešeršní strategie

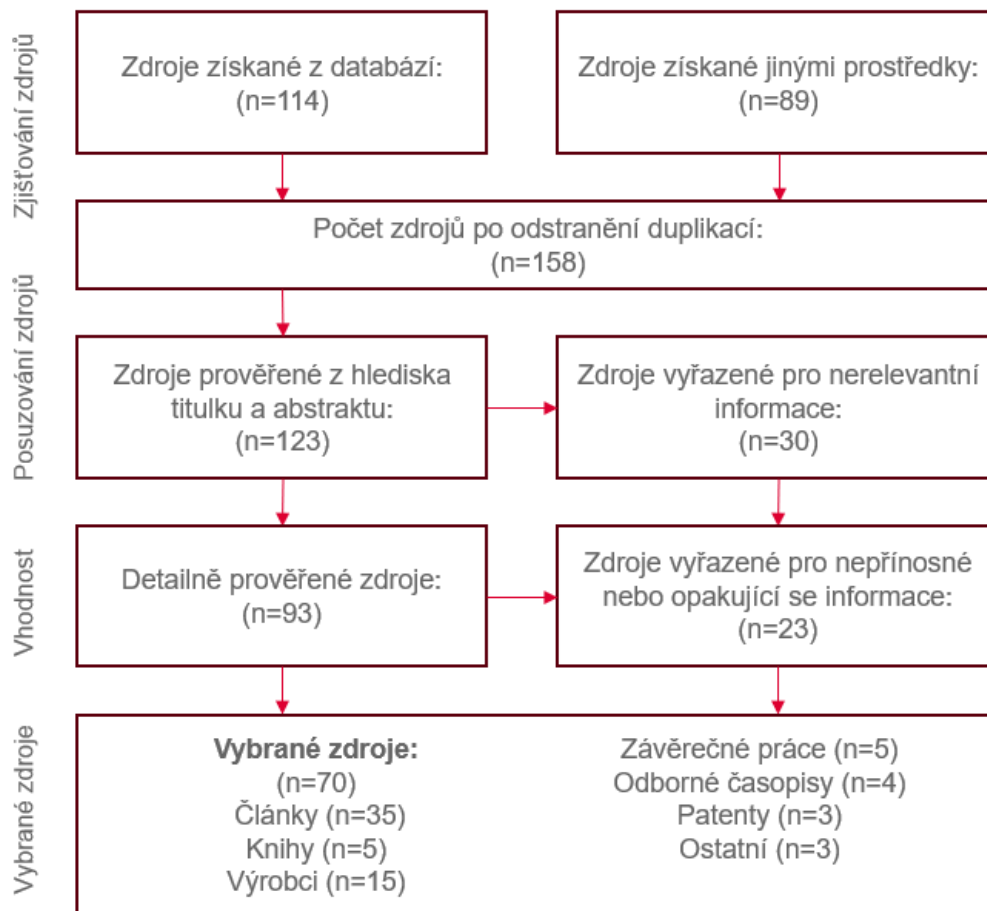
Při formulaci rešeršního požadavku a volbě vhodné strategie byly využity strategie stavebních kamenů a rostoucí perly. Strategie rostoucí perly byla využita pro postupné zpřesňování vyhledávacího dotazu. Začalo se obecným pojmem, který byl postupně upřesňován. Příkladem může být hledání informací ze začátku práce. Nejprve bylo vyhledáno "Tractor", což přineslo 40,043 zdrojů. Následně bylo téma zpřesněno na "Autonomous tractor", což snížilo počet na 3161 zdrojů. Další zpřesnění na "Autonomous tractor with alternative energy source" zúžilo výsledky na 863 nejrelevantnějších informačních zdrojů. Strategie stavebních kamenů spočívala v rozložení širokého tématu na klíčové pojmy, které byly následně kombinovány pomocí booleovských operátorů. Například při hledání informací o autonomním řízení, a zda je potřeba implementovat kabinu řidiče. Téma bylo rozděleno na klíčová slova jako "Tractor", "Autonomous driving", a "Drivers cabin". Tyto pojmy byly následně propojeny operátory AND či NOT pro zpřesnění vyhledávání. Například vyhledání "Tractor AND Autonomous driving" přineslo 1,393 výsledků, zatímco "Autonomous tractor NOT drivers cabin" vedlo k počtu 3,061 potenciálních pramenů.

Kombinací obou strategií, tedy rozložením tématu na klíčové pojmy a jejich postupným zpřesňováním, bylo dosaženo efektivního vyhledávání relevantních informačních zdrojů pro zpracování rešeršní části práce.

2.1.4 Výběr relevantních informačních pramenů

Při výběru relevantních informačních pramenů bylo použito kombinace strategií stavebních kamenů a rostoucí perly. Nejprve bylo provedeno prvotní vyhledávání v databázích, které přineslo 114 relevantních zdrojů. Dále bylo 89 pramenů získáno z jiných zdrojů, jako jsou webové stránky výrobců či články odborných i neodborných časopisů. Po prozkoumání všech dokumentů byl výběr zúžen na 158 relevantních zdrojů. Dále byla provedena analýza titulku a odstraněny duplicitní dokumenty, čímž se počet snížil na 123. Další fází bylo odstranění zdrojů, které obsahovaly nerelevantní informace, a to 30 zdrojů. Zbýlých 93 zdrojů bylo podrobena detailnímu prozkoumání, aby se zjistilo, zda splňují požadavky rešerše a mohou být zahrnuty do výsledků vyhledávání. Konečným výběrem prošlo 70 zdrojů, které byly relevantní pro diplomovou práci. Jednalo se o 35 odborných článků, 5 knih, 15 výrobců, 5 závěrečných studentských prací, 3 patenty, 4 periodika a 3 další zdroje. Tyto informace byly zpracovány do podoby PRISMA diagramu, který se nachází níže.

PRISMA DIAGRAM



Obr. 2-1 PRISMA diagram

2.1.5 Užití metody zpracování dat

Při sběru a analýze relevantních zdrojů pro tuto diplomovou práci jsem využil citačního manažeru CitacePRO, kde jsem uložil všechny nalezené informační zdroje a následně je roztrídil do skupin podle jejich typů. Tyto skupiny se jmenovaly články, knihy, patenty, periodika, webové stránky a závěrečné práce. Informační zdroje v těchto skupinách byly dále tříděny podle jejich obsahu, zejména se týkaly motivace a důvodů tvorby této diplomové práce, odhadu budoucího stavu v tomto odvětví, technických, konstrukčních, ergonomických a designových řešení, principů a omezení. Nejvíce využívanými databázemi byly Primo, Google Scholar, Science Direct a SciSpace.

2.2 Motivační analýza

Již od doby, kdy člověk opustil kočovný způsob života a začal obdělávat polnosti, se neustále v této oblasti inovuje. S rostoucím počtem lidí na planetě bylo nutné zefektivnit procesy v zemědělství a co nejvíce je automatizovat. „The ageing population, climate change, and labour shortages in the agricultural sector are driving the need to reevaluate current farming practices“ [1] Nyní stojíme na prahu úplné automatizace, co se týče obdělávání polností. Stále více výrobců zemědělské techniky vyvíjí autonomní stroje, které nepotřebují řidiče, což by mělo zlepšit produktivitu a snížit náklady. To mi osobně připadá jako logický krok u repetitivních úkonů, které jsou traktory prováděny. Farmář nemusí celý den sedět v traktoru, ale pouze jednou za čas nastavit, kontrolovat a optimalizovat, nehledě na možnost “zdvojnásobení“ efektivity při práci v noci. Autonomní traktory na alternativní pohon jsou jedním z možných řešení, které by mohlo přinést řadu výhod jak z ekologického, tak ekonomického hlediska. Díky novým technologiím jako je strojové učení, chytré databáze či řadě nejrůznějších senzorů zjišťujeme, jak velký dopad na efektivitu, ale například i zachování kvality půdy mají. Nabízí se tedy otázka, jak se změní traktory, které budou využívat tyto technologie, zda se změní základní koncepce a technické rozvržení, které již dlouho dominuje této oblasti.

Table 1. Technology and product development for the six major tractor manufacturers relating to autonomy

Technology Pathway to Autonomy	Tractor Manufacturer					
	John Deere	CNH	AGCO	CLAAS	SAME Deutz-Fahr	Kubota
Automated Tractor Guidance	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Variable Rate Technology	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Drive by wire functionality	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Performance Optimisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Operation & path planning	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>
Machine to machine communication	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>	-
Sensing - perception	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-
Sensing - process monitoring	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>
Telematics	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>
Infield coms. and data infrastructure	<input checked="" type="checkbox"/>	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>	-	<input checked="" type="checkbox"/>

Obr. 2-2 Developments in autonomous tractors [3]

K této tématice jsem hledal motivační zdroje, které přináší inspiraci a ukazují vizi budoucího zemědělství, od které se musí odvíjet výsledný design autonomního traktoru. Pro smysluplnost diplomové práce je nutná motivace. Otázka proč se zaobírat designem autonomních traktorů se částečně odpovídá sama, jist budeme potřebovat vždy, a cesta k úplné automatizaci je snem každého náročného segmentu průmyslu, nejen zemědělství. Motivaci posilují studie, které prokázali, že jsou traktory na alternativní pohon úspornější a hlavně ekologičtější. Dalším pramenem k této kapitole byly knihy, které se zabírají právě budoucností zemědělství, popisují možnosti, které se nabízí při využití nejnovějších vynálezů, které se časem stanou běžnou součástí práce. Například z knihy “Agriculture 4.0 The Future of Farming Technology“ vyplývá, že autonomní traktory na alternativní pohon povedou v budoucnosti ke snížení emisí a nákladů, zvýšení efektivity a menšímu zatížení půdy. [2] V odborných časopisech se můžeme dočíst, že velké společnosti masově investují do technologií spojených s autonomním a udržitelným provozem. Například v publikaci Energie21 se vyskytuje článek, kde se píše o tom, že firma JBC investovala 100 milionů liber do vývoje motoru na vodík pro stavební a zemědělské stroje. [3] Další podstatnou motivací bylo probrání tohoto tématu přímo s výrobcí traktorů a jejich příslušenství na veletrhu TechAgro2024, kde mi bylo potvrzeno, že jsou autonomní traktory budoucností tohoto odvětví, ale zároveň upozornili na možné problémy. Tyto tendence z různých pramenů převažují, a proto mohu konstatovat, že téma designu autonomního traktoru na alternativní pohon je vysoce aktuální již teď, bude i do budoucna a má smysl zpracovat na toto téma diplomovou práci. V průběhu let bude narůstat konkurence v inovovaném segmentu traktorů a design může tvořit rozhodující slovo při výběru mezi konkurencí. Zároveň je nutné myslet na psychologickou stránku věci, kdy tento výrazný přechod z řízeného stroje na autonomní může působit na člověka až děsivě a přívětivý design dokáže tento přechod zmírnit.

2.3 Designérská analýza

Úvodní část designérské analýzy se krátce zaměřuje na historický vývoj. Převážně ale na existující koncepty autonomních traktorů, které představují relevantní východisko pro návrh inovativního řešení v rámci této diplomové práce. Vzhledem k faktu, že plně autonomní zemědělské traktory dosud nejsou komerčně dostupné, analyzuje tato kapitola designové studie, koncepty a prototypy prezentované jak významnými aktéry v zemědělském průmyslu, tak kolegy designéry. Tyto studie slouží jako indikátory potenciálního tvarování a funkčního uspořádání autonomních zemědělských strojů v budoucnosti, jak bylo naznačeno v předchozí motivační analýze, která poukázala na značné investice do vývoje plně autonomních systémů. S ohledem na limitovaný počet existujících plně autonomních konceptů zahrnuje tato designérská analýza rovněž traktory s poloautonomními funkcemi, které poskytují cenné poznatky o integraci pokročilých technologií a jejich designovém ztvárnění v zemědělském kontextu. Předmětem této analýzy není pouze vizuální aspekt designu, nýbrž i funkční charakteristiky a umístění klíčových prvků, jako jsou senzory a kamery, nezbytné pro autonomní provoz. [4]

2.3.1 Historický vývoj

Myšlenka traktoru bez řidiče se objevila již v roce 1940, kdy Frank W. Andrew vynalezl svůj vlastní model. Jeho traktor byl naváděn pomocí kabelu navinutého kolem centrálního bodu pole, který byl připojen k řídicímu ramenu traktoru. Tato metoda byla sice inovativní, ale omezovala se na kruhové nebo eliptické pole. [5]



Obr. 2-3 Driverless tractor in Popular Mechanics Journal 1940 [5]

V 50. letech 20. století společnost Ford vyvinula traktor „The Sniffer“, který byl také naváděn pomocí kabelu, ale tentokrát zakopaného pod zemí. Tento systém byl přesnější, ale jeho instalace byla nákladná a prakticky neproveditelná pro velké plochy polí, což vedlo k tomu, že traktor nebyl nikdy sériově vyráběn. [6]

Po dlouhé době bez významných pokroků přišel v roce 1994 průlom, kdy inženýři ze Silsoe Research Institute vyvinuli systém analýzy obrazu. Tento systém umožnil navádět malý traktor bez řidiče určený pro pěstování kořenové zeleniny. Traktor byl schopen zvládnout i mírné otáčení na souvrati. [7]

V 80. letech 20. století došlo k významnému posunu v zemědělské technologii s nástupem precizního zemědělství. Traktory byly vybaveny GNSS zařízeními a palubními počítači, což umožnilo zemědělcům efektivněji využívat zdroje a maximalizovat výnosy. [8]

Následně, v 21. století, se inženýři zaměřili na vývoj poloautomatických traktorů. Tyto traktory měly řidiče, ale ti museli zasahovat pouze při otáčení na souvrati. [9]

V letech 2011 a 2012 se objevila myšlenka plně autonomních traktorů. Zpočátku byly tyto traktory navrženy tak, aby sledovaly hlavní traktor s řidičem, což umožnilo jednomu řidiči obsluhovat dva stroje současně. Tato technologie „follow-me“ se používala především pro přepravu mezi poli. [10]

V současnosti se vývoj autonomních traktorů zaměřuje na plnou autonomii, na schopnost samostatného provozu bez jakéhokoli zásahu člověka. [11]

2.3.2 Současné koncepty

V této podkapitole budou prezentovány současné koncepty velkých zemědělských firem či designové studie. Byla snaha o zařazení plně autonomních strojů, které nedisponují kabinou řidiče, a dávají zcela nový pohled na designovou problematiku budoucích zemědělských strojů obecně.

CASE IH Autonomous Concept



Obr. 2-4 CASE IH Autonomous Concept [12]

CASE IH je americká značka zemědělské techniky, která je součástí společnosti CNH Industrial. Koncept CASE IH Autonomous Concept byl poprvé představen v roce 2016 na veletrhu Farm Progress Show v USA. Tento koncept představuje vizi autonomního traktoru určeného pro velké polnosti v Severní Americe a Evropě. Koncept CASE IH Autonomous Concept vychází z designu traktoru CASE IH Magnum, ale s výraznými úpravami. Nejvýraznějším prvkem je absence kabiny řidiče, která u plně autonomního stroje přestává dávat smysl, čímž umožňuje maximální využití prostoru pro technologie a pohonné jednotky. Traktor je vybaven čtyřmi dvojitými koly, které zajišťují optimální trakci a minimalizují zhutnění půdy. To má z mého hlediska pozitivní dopad na celkový vzhled.

Tvarování karoserie je plynulé, připomínající streamline design. V kombinaci s koly je celek robustní a správně vyjadřuje, že se jedná o těžký zemědělský stroj. Přední část traktoru je vybavena senzory a kamerami, které slouží k navigaci a rozpoznávání překážek. Vzhledově přední maska působí odděleně od zbytku traktoru. Zadní část traktoru je vybavena závěsem pro připojení zemědělských nástrojů, a to je podpořeno i tvarováním karoserie. Z horního pohledu vzniká zajímavý tvar šipky, který lze vidět na obrázku níže.



Obr. 2-5 CASE IH Autonomous Concept [12]

Koncept CASE IH Autonomous Concept je vybaven dieslovým motorem o výkonu 419 koní. Traktor je vybaven bezstupňovou převodovkou CVX, která umožňuje plynulou změnu rychlosti. Je navržen pro plně autonomní provoz a vybaven pokročilými senzory, kamerami a GPS technologií, které umožňují traktoru orientovat se v terénu, rozpoznávat překážky a pracovat bez zásahu člověka. Traktor je schopen autonomně plánovat trasy, provádět zemědělské operace a monitorovat svůj stav. Systém umožňuje dálkové ovládání a monitorování prostřednictvím tabletu nebo chytrého telefonu. Traktor je vybaven systémem pro automatické vyhýbání se překážkám a systémem pro automatické zastavení v případě nebezpečí. [12; 13]

Celkově se, dle mého názoru, jedná o povedený funkční koncept, který již v roce 2016 představuje vizi budoucnosti zemědělství. Z dostupných informací však vyplývá, že jeho vývoj byl ukončen.

LEMKEN & KRONE Combined Powers



Obr. 2-6 Combined Powers [15]

Koncept Combined Powers, výsledek spolupráce společností Krone a Lemken, představuje autonomní "procesní jednotku", která se skládá z pohonné jednotky a různých zemědělských nástrojů. Tato jednotka prošla v minulém roce testováním v oblastech kultivace, orby, setí, sečení, obracení a shrabování. Díky své obrovské všestrannosti je jednotka navržena pro celoroční práci a dlouhou životnost. Intenzivní testování ve všech typech podmínek a získávání zpětné vazby od zemědělců a dodavatelů bude pokračovat i v tomto roce. [14]

Pohonná jednotka je vybavena diesel-elektrickým pohonem, který generuje výkon až 170 kW (230 koní). Tento výkon je elektricky přenášen na kola a vývodový hřídel (PTO) a odtud na připojený nástroj, který se připojuje pomocí třibodového závěsu. Jednotka se pyšní rozsáhlým systémem senzorů, které monitorují bezprostřední okolí a připojený nástroj, čímž zajišťují bezpečný provoz a optimální výsledky. Operátoři ovládají a monitorují práci z mobilního zařízení, přičemž úlohy a zprávy o úlohách jsou přenášeny prostřednictvím komunikačního modulu a agrirouteru, zavedeného centra pro výměnu dat. [15]

Zvláštěností této procesní jednotky je, že je řízena nástrojem, nikoli naopak. Tento detail byl považován za nezbytný pro dosažení optimálních výsledků. Nástroj a pohonná jednotka fungují jako jeden integrovaný inteligentní systém. Na základě dlouholetých zkušeností s aplikací ISOBUS a TIM na strojích Krone a Lemken, pohonná jednotka a nástroj komunikují a interagují, sdílejí doslova všechny typy dat. [16]



Obr. 2-7 Combined Powers (verze Krone) [15]

Z designového hlediska se jedná o robustní jednotku s převážně geometrickým tvarováním. Vzhledem k tomu, že je traktor navržen pro práci v obou směrech, není jeho orientace jednoznačně patrná, což je logické řešení. Nicméně, na přední části traktoru se nachází rozsáhlý sací otvor, který se táhne téměř přes celou masku a dodává stroji mohutný vzhled.

Výrazným prvkem designu traktoru je integrace senzorů, kamer a světel. Tyto komponenty jsou umístěny po celém obvodu stroje a z jeho karoserie vystupují v obloukovitých tvarech, které si však zachovávají geometrický charakter.

Barevné provedení odpovídá firemní identitě Lemken, s variantami ve světle modré a Krone, s variantami ve světle zelené. U obou barevných kombinací je patrné jasné odlišení barvy oblouků senzorů.

Celkově lze design hodnotit jako soudržný dobře promyšlený, avšak z mého pohledu působí poněkud agresivně a hrubě, což ale nemusí být negativní.

KUBOTA X Tractor



Obr. 2-8 Kubota X Tractor [17]

Kubota X Tractor (Kubota Cross Tractor) je koncept autonomního elektrického traktoru z roku 2021, který představuje inovativní vizi budoucnosti zemědělství od japonské společnosti Kubota. Tento traktor se vyznačuje nejen futuristickým designem, ale především pokročilými technologiemi, které mají za cíl transformovat zemědělské postupy.

Traktor je poháněn elektrickým pohonem, který je plně integrován do konstrukce stroje. Baterie jsou strategicky umístěny v dolní části traktoru, což zajišťuje nízké těžiště a optimální rozložení hmotnosti. Traktor je vybaven pokročilým navigačním systémem řízeným umělou inteligencí a senzory, které umožňují plně autonomní provoz. Kamery a senzory jsou elegantně integrovány do karoserie traktoru, což přispívá k čistému a provázenému designu. Traktor je vybaven čtyřmi pásy, které zajišťují optimální trakci a minimalizují ztuhnutí půdy. Pásy jsou navrženy tak, aby se přizpůsobily různým typům terénu a zajistily stabilní pohyb v náročných podmínkách. LED osvětlení je integrováno do karoserie traktoru a slouží nejen k osvětlení pracovního prostoru, ale také k signalizaci stavu baterie a komunikaci s okolím. [17]

Kubota X Tractor je vybaven řadou pokročilých technologií, které umožňují autonomní provoz a optimalizují zemědělské postupy. Umělá inteligence (AI) řídí navigaci traktoru, plánování tras a provádění zemědělských úkolů. Senzory monitorují okolí traktoru, detekují překážky a zajišťují bezpečný provoz. Elektrický pohon snižuje emise a hluk, což přispívá k udržitelnějšímu zemědělství. [17]

Design Kubota X Tractor se radikálně odlišuje od tradičních traktorů. Absence kabiny řidiče umožnila designérům vytvořit kompaktní a aerodynamicky působící stroj s plynulými křivkami a organickými tvary, které kontrastují s robustními pásy [1]. Dynamické tvarování propůjčuje tomuto konceptu unikátní estetiku, která nepochybně upoutá pozornost. Aplikace pásového podvozku přispívá k futuristickému vzezření traktoru při zachování jeho funkčních vlastností. Kontrast ostrých křivek je dále akcentován barevným řešením stroje. Koncept je prezentován v oranžové barvě, která je typická pro značku Kubota. Oranžová barva je doplněna černými a šedými prvky, které zdůrazňují moderní a technologický charakter stroje. V horní části se nachází rozměrný solární panel, který během provozu kontinuálně dobíjí baterie. Boční strany integrují indikátor stavu baterií a nad nimi vedlejší větrací otvory. Hlavní se nachází v zadní části, kde společně se zadními LED světly tvoří robustní ukončení karoserie. Přední maska, evokující písmeno „X“ z názvu traktoru, představuje z mého pohledu zdařilý prvek, plynule navazující na zbytek karoserie. Celkově lze konstatovat, že se jedná o designově propracovaný koncept s výrazným vizuálním impaktem.

Tento návrh z roku 2021 se radikálně odlišuje od nově představených autonomních konceptů traktorů či zemědělských robotů společnosti Kubota. Tyto novější návrhy vykazují zcela jiné tvarové řešení, což vyvolává otázku ohledně dalšího vývoje tohoto konkrétního X-tractor konceptu. Pro designové kvality návrhu, ale nemohl být v této analýze vynechán.



Obr. 2-9 Koláž detailů Kubota X Tractor [17]

John Deere Autonomous Electric Tractor Concept



Obr. 2-10 John Deere Autonomous Electric Tractor Concept [66]

Koncept autonomního elektrického traktoru od společnosti John Deere představuje inovativní přístup k designu zemědělských strojů. Návrh je díky uspořádání komponent, vizuálně i technicky chybějící zadní části velice nezvyklý, ale zároveň poutavý. Díky upraveným nástrojům, které plní funkci zadních kol, se divák setkává s dominantní přední částí traktoru, zdůrazněnou mohutnými pásy.

Tvarování karoserie a barevné provedení odpovídají vizuálnímu jazyku značky John Deere. Charakteristická zelená barva a robustní designové prvky jsou zde jasně rozpoznatelné. Zajímavým prvkem je ukrytí předních LED světel za síťku hlavního ventilačního otvoru traktoru. V přední části se nachází závaží, které zajišťuje správné vyvážení traktoru a potřebný tlak na nástroj. Nicméně, toto závaží vizuálně nepůsobí jako součást celkového designu a může se zdát, že do konceptu ne zcela zapadá. Dále je na horní části traktoru umístěn dlouhý pásek LED osvětlení, který pravděpodobně slouží jako signalizační či efektní prvek. [18]



Obr. 2-11 Autonomous Electric Tractor – Future of Farming [67; 67; 18]

Stroj je navržen jako jednonápravový traktor s plně elektrickým pohonem, který využívá 500 kilowattů výkonu. Z toho 250 kilowattů pohání hnací ústrojí a zbývajících 250 kilowattů slouží k pohonu zemědělského nářadí. Celkově tento prototyp disponuje výkonem přibližně 670 koní. Elektrický pohon umožňuje precizní kontrolu nad výkonem a točivým momentem, což je klíčové pro efektivní provádění zemědělských operací. Traktor je vybaven pokročilými senzory a kamerami, které umožňují autonomní navigaci a práci v terénu. Tyto systémy zahrnují GPS, LiDAR, radar a kamery s vysokým rozlišením, které společně vytvářejí komplexní obraz okolního prostředí. Díky tomu je traktor schopen autonomně plánovat trasy, vyhýbat se překážkám a pracovat s vysokou přesností. Integrace nářadí do podvozku namísto tradičního tříbodového závěsu naznačuje snahu o optimalizaci výkonu a manévrovatelnosti. Toto řešení umožňuje lepší přenos výkonu na nářadí a snižuje vibrace a hluk. Koncept je navržen pro specifické zemědělské práce, které vyžadují vysokou přesnost a efektivitu, jako je setí, hnojení nebo plečkování. [18]

Tento koncept je unikátní a ukazuje, že budoucnost traktorů může být velmi rozmanitá. Designéři se zaměřili na integraci pokročilých technologií a optimalizaci funkčnosti, což vede k nekonvenčnímu, ale zajímavému designu. Implementace elektrického pohonu a autonomních systémů naznačuje snahu o vytvoření udržitelného a efektivního zemědělského stroje. Otázka baterií a jejich udržitelnosti je však rozsáhlá a bude probírána pečlivě v technické analýze.



Obr. 2-12 Valtra H2O2 [19]

Designová studie Valtra H2O2, ztvárněná produktovým designérem Lorenzem Mariottim z Milána v rámci soutěže Valtra Design Challenge 2017, představuje vizionářský návrh autonomního zemědělského traktoru s elektrickým pohonem, jenž by energii získával z vodíkových palivových článků. Tento designový koncept, koncipovaný s výhledem na rok 2040, reflektuje současné směřování zemědělství k automatizaci, optimalizaci času a hledání ekologicky šetrných řešení pohonu zemědělské techniky s důrazem na minimalizaci environmentální stopy. Ačkoliv se jedná o koncepční studii, zkoumá potenciální budoucí trendy v zemědělském sektoru a klade důraz na kooperaci stroje s uživatelem. [19]

Z designového hlediska se Valtra H2O2 odlišuje od konvenčních traktorů svým futuristickým a minimalistickým pojetím s plynulými, aerodynamickými liniemi, které ve verzi s kabinou odkazují na archetypální formu traktoru, čímž zůstává okamžitě rozpoznatelný. Robustní podvozek a mohutná kola naznačují připravenost pro náročné polní práce. U autonomní varianty je absence tradiční kabiny řidiče markantním rysem, který signalizuje primární zaměření na plně autonomní provoz. Nicméně koncept zahrnuje i zmíněnou variantu s kabinou, čímž reflektuje důležitost lidské intervence v přechodu na plně autonomní provoz. Horní část stroje je tvořena aerodynamicky tvarovaným krytem, který integruje pokročilé senzory a technologie nezbytné pro autonomní navigaci a provádění úkonů, včetně LED světel, které se nachází po celém obvodu. Stříbrná a šedá barevná paleta s černými akcenty podtrhuje moderní a technologický charakter designu. Integrovaná světla a umístění prvků pro připojení zemědělského nářadí doplňují celkový funkční a estetický dojem. Jelikož se jedná o převážně výtvarnou studii, je nutno brát technické řešení pouze orientačně.



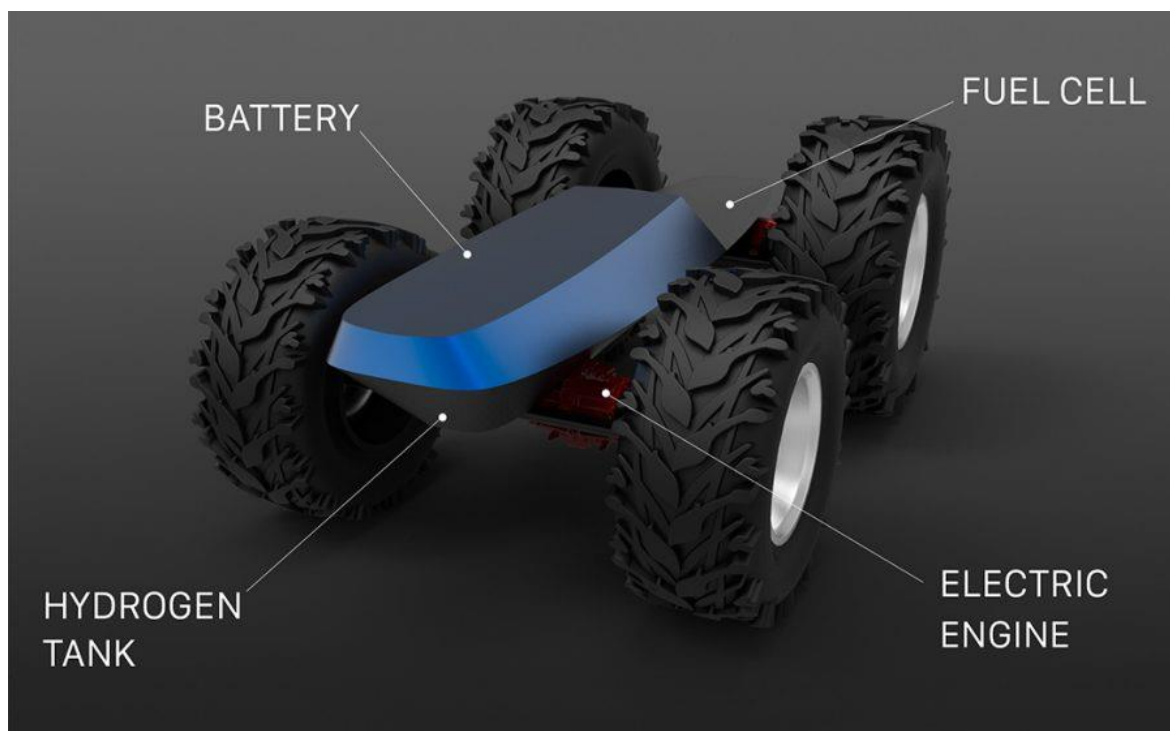
Obr. 2-13 Valtra H2O2 [19]

Jedním z klíčových aspektů konceptu H2O2 je jeho pokročilý autonomní systém řízení, zaměřený na optimalizaci času a schopnost provádět komplexní a opakující se úkoly nepřetržitě. Tento systém bude úzce integrován s plánováním zemědělské výroby na farmě, přičemž bude využívat analýzu velkých dat o pěstovaných plodinách, meteorologických podmínkách a vlastnostech půdy pro optimalizaci využití času a zdrojů. Úkoly nevyžadující interakci s farmářem tak mohou být plánovány například na noční hodiny. Autonomní řízení zároveň zvyšuje aktivní bezpečnost stroje tím, že proaktivně zasahuje v potenciálně nebezpečných situacích (prevence nehod, mikrosnánku, převrácení). Koncept rovněž zahrnuje dálkové ovládání prostřednictvím mobilní aplikace a pokročilé aktivní bezpečnostní systémy. [20]



Obr. 2-14 Valtra H2O2 Cab version [19]

Inovativní pohonný systém je založen na vodíkových palivových článcích s elektrickým pohonem kol. Elektrický motor nabízí vysoký konstantní točivý moment, je ekologicky čistý a vyžaduje méně údržby, což jej činí vhodnou náhradou za diesellové motory. Vodík pro palivové články by mohl být získáván přímo na farmě z metanu produkovaného anaerobními digestoři, čímž by se významně snížila environmentální stopa celého hospodářství. Koncept zahrnuje i možnost přímého nabíjení baterií na farmě pomocí kabelového připojení nebo bezdrátového indukčního nabíjení. Kromě pohonu kol jsou zde i samostatné elektrické motory pro pohon vývodové hřídele (PTO). [20]



Obr. 2-15 Valtra H2O2 Průhledové schéma [20]

Celkově designový koncept Valtra H2O2 představuje progresivní a inspirativní vizi autonomního zemědělského stroje s čistým pohonem, který by mohl přispět k udržitelnějšímu a efektivnějšímu zemědělství budoucnosti. Osobně je mi tvarování sympatické a dobře znázorňuje čistotu pohonu, avšak ve variantě bez kabiny je vzniklý prázdný prostor vyřešen tvarově podivně, což i výrazně degraduje celkový vzhled.



Obr. 2-16 Belarus A3523i [22]

Autonomní traktor Belarus A3523i, vyvinutý společností Minsk Tractor Works (MTZ), představuje prototyp prvního autonomního traktoru této značky, který byl veřejnosti představen v roce 2021 u příležitosti 75. výročí založení výrobního závodu. Základem pro tuto autonomní verzi se stal diesel-elektrický model Belarus 3523, uvedený na trh o rok dříve. [21]

Z technického hlediska je autonomní prototyp poháněn identickým 350 koníkovým motorem Cummins, který se nachází i ve standardním modelu Belarus 3523. Zásadní odlišností je nahrazení lidského řidiče inteligentním řídicím systémem. Ten využívá komplexní soubor kamer, senzorů a integrovaného počítače k autonomnímu zpracování dat z okolního prostředí. Tento systém zajišťuje nezávislou práci traktoru a aktivně předchází potenciálním kolizím. K pozoruhodným funkcím patří i schopnost autonomního přejezdu k čerpací stanici v případě detekce nízké hladiny paliva. Společnost MTZ demonstrovala provozuschopnost traktoru při orbě s osmiradličným otočným pluhem na prezentačním videu. V rámci pracovních operací na poli dosahuje autonomní traktor rychlosti až 15 kilometrů za hodinu, přičemž při silničním transportu je schopen vyvinout rychlost až 50 kilometrů za hodinu. Společnost MTZ, s historií sahající do roku 1946, si udržuje významné postavení na globálním trhu zemědělské techniky a aktivně reaguje na aktuální vývojové trendy, přičemž vývoj autonomních systémů je považován za klíčový směr inovací. Prototyp A3523i prošel sérií reálných provozních testů, dokumentovaných i záběry s maskovacím provedením. Současná podoba stroje se vyznačuje výrazným červeno-modrým barevným schématem.

Testování na bramborovém poli prokázalo schopnost autonomního traktoru efektivně orat půdu s osmiradličným pluhem, přičemž jeho pohyb byl plynulý a jistý. Kromě orby bylo demonstrováno i sečení trávy, což naznačuje široké spektrum potenciálního využití. Pohon prototypu A3523i je řešen jako hybridní, kombinující dieselový motor s elektrickým pohonem o celkovém výkonu 350 koní. Podle dostupných údajů tento hybridní systém vykazuje úsporu paliva v rozmezí 7 procent při pracovních činnostech a až 12 procent při silniční dopravě v porovnání s konvenčními traktory. [22]



Obr. 2-17 Belarus A3523i Orání půdy s osmiradličným pluhem [68]

Z hlediska designu se koncept Belarus A3523i drží spíše konvenčního rozložení komponent, které je do značné míry ovlivněno architekturou jeho pohonu. Stroj je vybaven kolovým podvozkem s tradičním uspořádáním větších zadních a menších předních kol, což evokuje známý vzhled zemědělských traktorů, avšak s absencí kabiny řidiče jako klíčovým distinktivním prvkem. Celkové tvarové řešení je převážně geometrické s hladkými návaznostmi mezi jednotlivými konstrukčními částmi. Přední maska integruje horizontálně umístěná LED světla pro osvětlení pracovního prostoru, která však nejsou vybavena čočkami kamer. Nad nimi se nachází rozměrný ventilační otvor, za kterým jsou patrné senzory typu lidar a další detekční technologie.

Exponovaný přední tříbodový závěs, výfukový systém a blatníky přispívají k celkovému robustnímu dojmu, odpovídajícímu těžkému zemědělskému stroji s hybridním pohonem. Barevné provedení traktoru je nápadné a funkčně diferencované, s červenou barvou pro funkční komponenty a gradientním přechodem z modré na červenou s dekorativním vzorem na karoserii. Na bocích a v prostoru bývalé kabiny jsou umístěna ramena nesoucí další senzory, maják a anténní systémy, které z estetického hlediska mohou působit poněkud rušivě. Nicméně, s ohledem na prototypovou fázi a probíhající testování v reálných podmínkách, je funkčnost těchto prvků prioritní. Celkově lze pozitivně hodnotit tvar karoserie a design přední masky, s potenciálními oblastmi pro zlepšení v designu zadních blatníků a integraci senzorů.



Obr. 2-18 Belarus A3523i boční pohled [21]

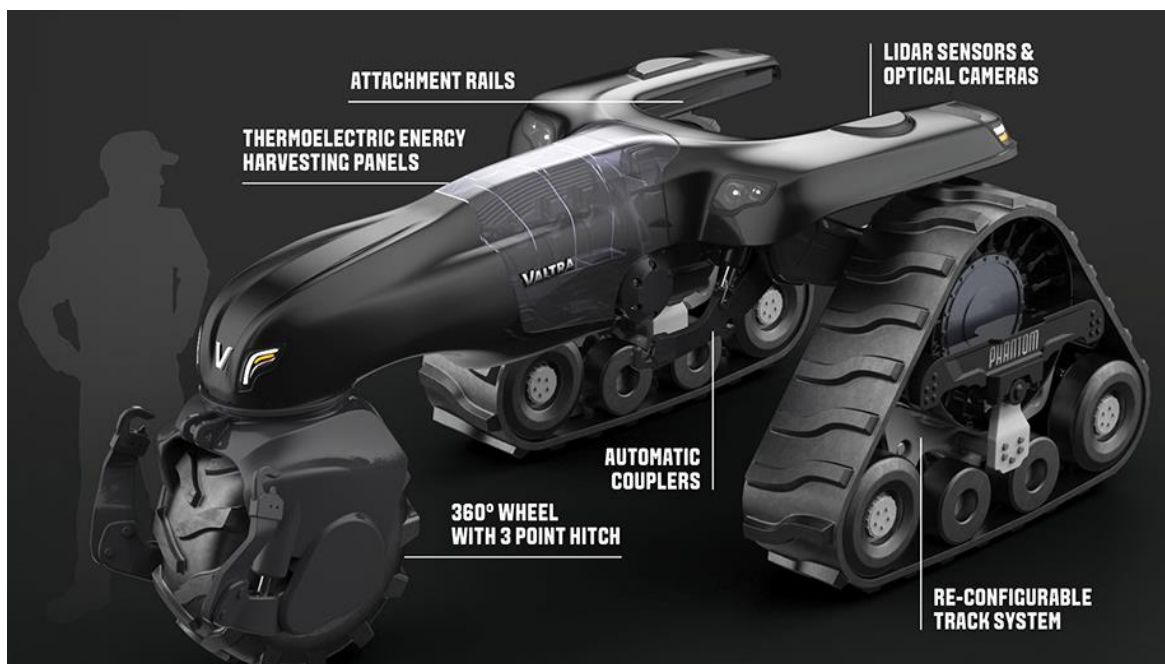
Autonomní traktor Belarus A3523i představuje pragmatický přístup k implementaci autonomních technologií do existující konstrukční rámce zemědělských traktorů. Na rozdíl od některých radikálně futuristických konceptů, Belarus A3523i zachovává tradiční rysy zemědělského stroje a integruje autonomní systémy s důrazem na funkčnost a ověřování v reálném provozu.



Obr. 2-19 Valtra Phantom [23]

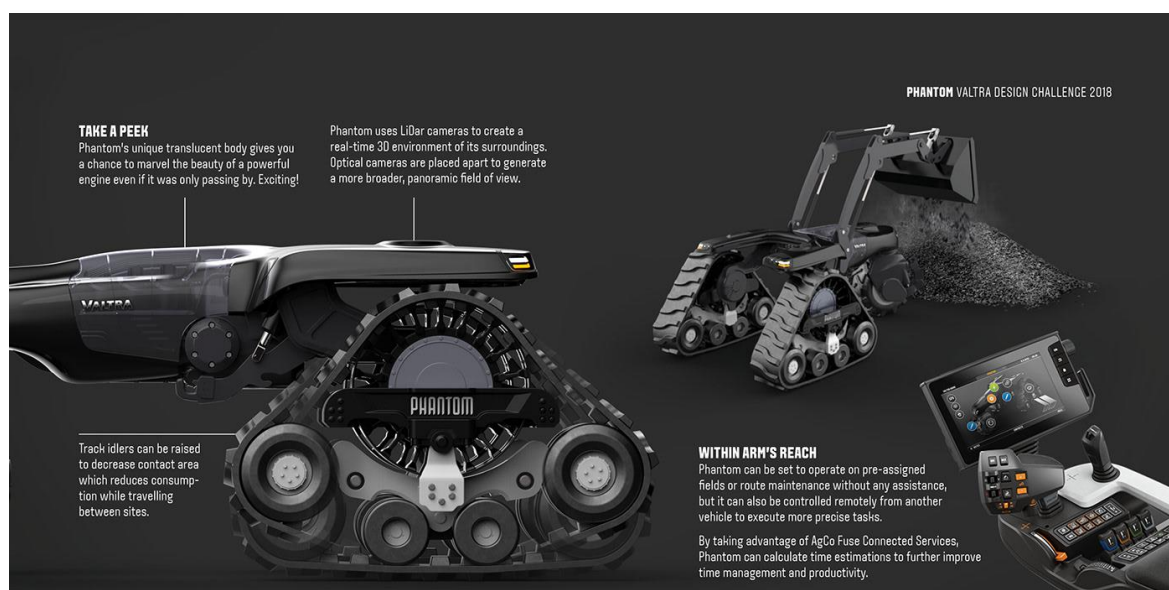
Koncept autonomního traktoru Phantom vzešel z designérské soutěže Valtra Design Challenge 2018. Valtra je finský výrobce zemědělských traktorů, který je od roku 2004 součástí nadnárodní korporace AGCO Corporation. Valtra je známá svým inovativním přístupem k designu a technologickým řešením v zemědělské technice.

Autorem konceptu Phantom je finský designér Joona Järvinen. Návrh se vyznačuje několika klíčovými funkcemi, které podtrhují jeho autonomní charakter a potenciál pro efektivní zemědělské operace. Implementace autonomního propojení umožňuje bezobslužnou práci s připojenými zemědělskými nástroji, čímž se zvyšuje celková efektivita práce na poli. Rekonfigurovatelný pásový systém představuje adaptivní řešení podvozku, které optimalizuje trakci a minimalizuje zhutnění půdy díky variabilnímu nastavení styčné plochy pásů. Pohon je řešen prostřednictvím elektrických motorů integrovaných v kolech, což zajišťuje precizní řízení točivého momentu a přispívá k agilitě a manévrovatelnosti stroje. Inovativní termoelektrické generátory integrují systém získávání energie z odpadního tepla, teoreticky zvyšující energetickou soběstačnost a prodlužující autonomní provoz. Pro autonomní navigaci a detekci okolí slouží komplexní systém LiDAR senzorů a optických kamer, které vytvářejí detailní 3D model prostředí. Flexibilitu při připojování zemědělských nástrojů zajišťuje 360° otočné kolo s třibodovým závěsem a automatickými spojkami v zadní části stroje. [23]



Obr. 2-20 Valtra Phantom [23; 69]

Z hlediska designu koncept Phantom představuje vizuálně markantní odklon od konvenčních řešení v oblasti zemědělské techniky. Jedním z nejvýraznějších prvků je nahrazení tradiční přední nápravy unikátním řešením s jedním centrálně umístěným kolem, které disponuje plným rozsahem otáčení 360 stupňů. Navzdory této atypické konfiguraci přední části je integrován tříbodový závěs, nicméně absence explicitně zobrazeného pohonu přední vývodové hřídele či hydraulických přípojek naznačuje odlišný přístup k pohonu a ovládání předních nástrojů.



Obr. 2-21 Valtra Phantom [69]

Implementace jednoho předního kola determinuje celkovou siluetu stroje. Přední část traktoru je pozoruhodně úzká a postupně se rozšiřuje směrem k zadní partii, kde rozšíření funkčně integruje blatníky a zároveň slouží jako platforma pro umístění klíčových sensorických systémů, zahrnujících LiDAR senzory a osvětlovací jednotky. Prostor mezi dvěma zadními pásovými systémy je koncipován pro připojování pracovních nástrojů, což z pohledu shora vytváří charakteristický tvar písmene Y. Toto designové řešení lze hodnotit jako esteticky atraktivní a technologicky inovativní.



Obr. 2-22 Valtra Phantom [23]

Na druhou stranu, robustní konstrukce zadní části s pásovými systémy ve vizuálním kontrastu se subtilní přední částí a otočným kolem potenciálně implikuje otázky ohledně vyvážení stroje a jeho stability v náročných provozních podmínkách. Celistvost designu podtrhuje matně černá karoserie, přerušená průhledným segmentem v centrální části, umožňující náhled na vnitřní uspořádání komponent. Přední maska je definována dominantními LED světlomety a výrazným logem značky Valtra, přičemž plynule navazuje na zbytek karoserie. Celkové barevné provedení v čistě černé barvě reflektuje název konceptu "Phantom". Závěrem lze konstatovat, že se jedná o vysoce zajímavý a nekonvenční koncept, jehož reálné výhody a potenciální limitace by vyžadovaly ověření prostřednictvím prototypové fáze a provozních testů.



Obr. 2-23 Christoph Proessler Bolid [25]

Koncept Bolid, navržený produktovým a automobilovým designérem působícím ve Spojeném království, představuje vizi zemědělského traktoru nové generace určeného pro rozsáhlé farmy, typické pro regiony jako Amerika či Austrálie. Klíčovou myšlenkou konceptu je bezobslužný provoz na poli, řízený prostřednictvím GPS a CPU navigace. Manuální ovládání se předpokládá primárně pro přejezdy po silnici.

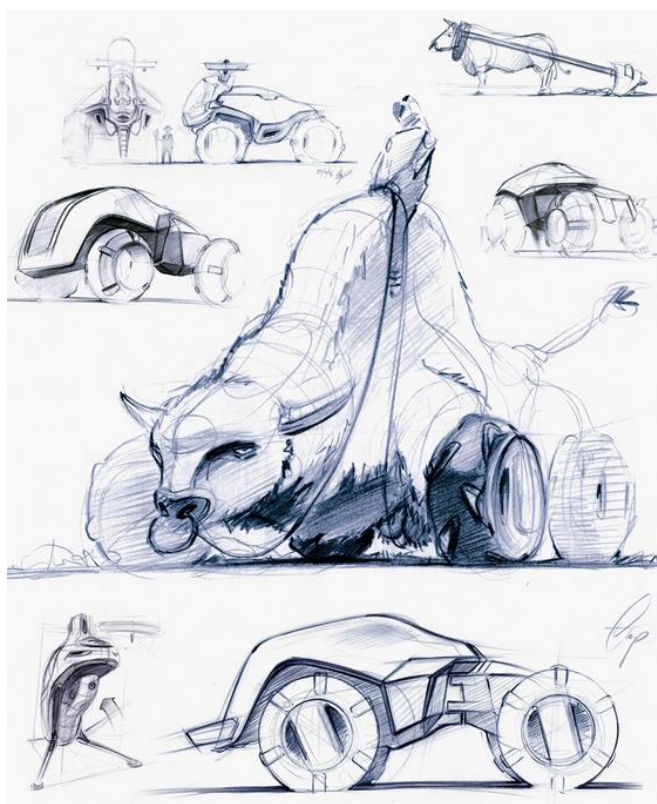
Unikátním prvkem designu je odnímatelný modul kabiny řidiče, který má schopnost autonomního letu. Tato "létající kabina" umožňuje farmáři opustit vozidlo kdykoliv a nezávisle na topografických podmínkách. Předpokládané využití zahrnuje možnost dálkového ovládání více traktorů současně nebo efektivní správu dalších zemědělských činností. Během bezobslužného provozu se GPS/CPU modul sklápí, zatímco pro bezpečné přistání slouží dokovací mechanismus. Koncept rozlišuje mezi "polním režimem" pro autonomní práci a "silničním režimem" pro manuální transport

Z hlediska designu se koncept vyznačuje kontrastem mezi organickými a geometrickými tvary, což má symbolizovat spojení high-tech technologií s náročnou zemědělskou prací. Celková silueta stroje má evokovat "mocný postoj býka". Robustní přední část s organickým a oblým tvarováním integruje klíčové technologické komponenty. Přibližně ve dvou třetinách délky traktoru se nachází kloubový mechanismus umožňující zatáčení zadní nápravy. Krytování v této oblasti je vizuálně odlišeno barevně i tvarově, přecházející do geometrického designu karoserie zadní části. Navzdory objemné přední sekci působí celkový design čistě a promyšleně. [24; 25]



Obr. 2-24 Christoph Proessler Bolid [25]

Podobně jako u jiných designových konceptů, i zde vyvstává otázka ohledně reálného vyvážení stroje a zajištění adekvátního přítlaku na pracovní nástroje. Koncept Bolid je primárně designovou vizí, avšak poskytnuté informace o bezobslužném provozu, létající kabině a GPS/CPU navigaci naznačují promyšlený přístup k autonomnímu zemědělství.



Obr. 2-25 C. Proessler Design exploration [25]

MOD² (Valtra Design Challenge 2017)



Obr. 2-26 MOD² concept [27]

Koncept MOD², vítězný návrh prvního ročníku Valtra Design Challenge v roce 2017, vytvořený argentinským týmem ve složení Juan Garcia Mansilla, Marcos Madia a Ezequiel Castro, představuje radikálně odlišnou vizi zemědělského traktoru budoucnosti. Soutěž, vyhlášená na veletrhu SIMA v Paříži, vyzvala designéry k představení konceptu traktoru Valtra pro rok 2040. MOD² zaujal porotu svou flexibilitou a potenciálem pro široké spektrum zemědělských aplikací v různých měřítcích provozu. [26]



Obr. 2-27 MOD² Docking and maintenance [26]

Základní koncepcí MOD² je autonomní, samovyvažovací jednonápravové vozidlo, které je navrženo pro samostatnou práci nebo pro kooperaci s dalšími jednotkami stejného typu. Autoři konceptu se inspirovali principem mravenčí kolonie, kde jednotlivé jednotky vzájemně spolupracují při řešení náročnějších úkolů. Součástí návrhu je i dokovací stanice pro sekvenční nabíjení jednotlivých jednotek, což naznačuje promyšlený přístup k logistice autonomního provozu.

Z hlediska designu se MOD² vyznačuje promyšleným tvarem, který reflektuje jeho funkčnost. Hlavní senzory a světelná signalizace jsou umístěny v horní části stroje, což by mělo zajišťovat 360° rozhled pro autonomní navigaci a detekci okolí. Nicméně, z vizualizací je patrné, že boční výhled senzorů a kamer by mohl být omezen přítomností velkých kol. Univerzální konektor umístěný na přední i zadní části slouží pro připojování různých zemědělských nástrojů, pro spojování s dalšími jednotkami při kooperaci, a také pro připojení k nabíjecímu doku.

Přední maska konceptu organicky navazuje na tento centrální spojovací bod a definuje dvoutónové barevné provedení hlavních částí karoserie. V mezeře mezi těmito barevně odlišenými sekcemi jsou subtilně integrovány futuristické světlomety. Praktickým designovým prvkem je odklopný horní kryt, umožňující snadný přístup k vnitřním komponentům pro údržbu a opravy. Celkově design MOD² působí kompaktně a účelně, s jasným zaměřením na autonomní provoz a modularitu.[27; 26]



Obr. 2-28 MOD² Detail [26]

2.4 Technická analýza

Tato kapitola, stejně jako Designerská analýza, představuje klíčový pilíř celé práce. Jejím hlavním úkolem je zevrubně prozkoumat a popsat z technického hlediska jednotlivé komponenty a systémy, které jsou nezbytné pro realizaci vize autonomního traktoru s vodíkovým pohonem. Vzhledem k tomu, že výběr vhodného pohonu pro zemědělské stroje budoucnosti je součástí této diplomové práce, bude v kapitole poskytnut stručný přehled relevantních alternativních pohonných řešení, včetně tradičního dieselového pohonu, elektrického (bateriového) pohonu a hybridních systémů. Následně bude detailněji rozpracována analýza vodíkového pohonu prostřednictvím palivových článků a elektromotorů, přičemž budou analyzovány principy jejich fungování, technické charakteristiky a možnosti integrace do autonomního zemědělského stroje. Veškeré technické aspekty budou diskutovány s ohledem na specifické požadavky a nároky kladené na traktory ve výkonnostní kategorii nad 150 kW operující na evropském trhu. Důraz bude kladen na popis jednotlivých komponent v co největší míře detailu, s cílem poskytnout ucelený technický základ pro následnou práci.

2.4.1 Komponenty autonomního systému

Tato podkapitola postupně prochází jednotlivé komponenty, zaměřuje se na jejich popis a funkčnost.

Senzorové systémy

Autonomní provoz zemědělského traktoru v náročných a proměnlivých podmínkách vyžaduje sofistikovaný soubor senzorových technologií, které poskytují komplexní informace o okolním prostředí, poloze stroje a stavu pracovních nástrojů. Tyto systémy jsou klíčové pro bezpečnou navigaci, detekci překážek, přesné provádění zemědělských operací a autonomní doplňování paliva či výměně nástrojů.

V kontextu autonomních systémů se využívá široká škála kamer, které se liší svými technickými parametry a specializací pro různé provozní podmínky.

RGB kamery: Tyto standardní barevné kamery poskytují vizuální informace o okolí, které jsou zpracovávány algoritmy počítačového vidění pro detekci objektů, rozpoznávání plodin, sledování linií řádků a navigaci. Pro autonomní traktory se vyžadují kamery s vysokým rozlišením a širokým dynamickým rozsahem (HDR) pro zvládnutí proměnlivých světelných podmínek během dne. Důležitá je také snímková frekvence pro plynulé sledování pohybujících se objektů.

Termokamery: Tyto kamery detekují tepelné záření a jsou neocenitelné pro noční provoz a detekci živých objektů (např. zvíře nebo osob) v terénu. Mohou být také využity pro monitorování stavu rostlin a detekci teplotních anomálií. Specifikace zahrnují teplotní rozsah, rozlišení termálního senzoru a citlivost. [28]



Obr. 2-29 Thermal Imaging in Agriculture [28]

Hloubkové kamery (Stereo kamery, Time-of-Flight kamery): Tyto systémy poskytují informace o hloubce scény, což je klíčové pro 3D mapování okolí, detekci překážek a navigaci v komplexním terénu. Stereo kamery využívají dvě nebo více kamer se známou vzájemnou polohou k odhadu vzdálenosti na základě disparity obrazových bodů. Time-of-Flight (ToF) kamery měří dobu letu světelného pulzu k objektu a zpět pro určení vzdálenosti.

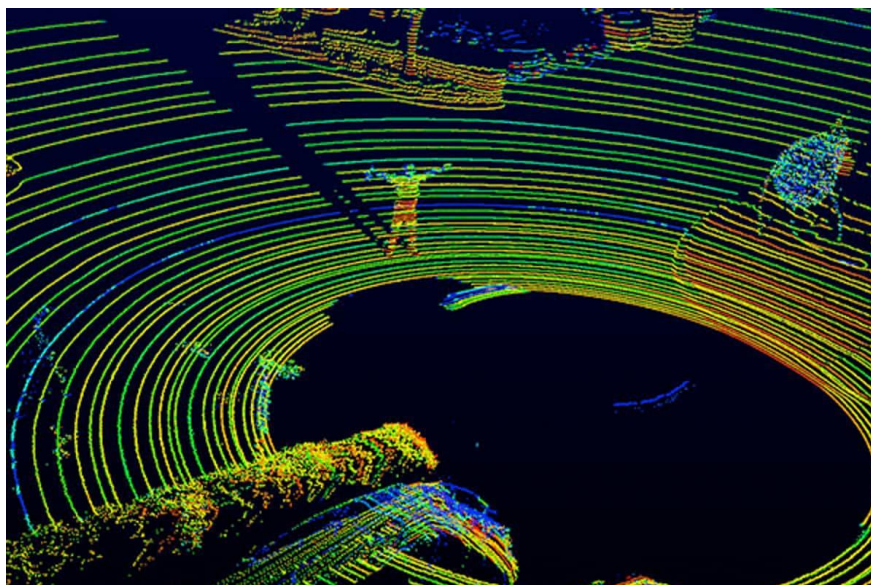
Odolnost vnějšímu prostředí: Kamery pro zemědělské aplikace musí splňovat vysoké standardy odolnosti proti prachu, vodě, vibracím a extrémním teplotám (IP krytí, odolnost proti vibracím dle ISO norem). Ke zvýšení odolnosti může vést integrace do karoserie.

LiDAR (Light Detection and Ranging): Lidary jsou aktivní dálkové senzory, které využívají laserové pulzy k měření vzdálenosti k objektům. Rotující lidary generují hustá 3D mračna bodů (point clouds) okolního prostředí, která poskytují přesné informace o geometrii terénu, poloze překážek a struktuře vegetace.

Princip fungování: LiDAR vysílá krátké laserové pulzy a měří dobu, za kterou se odražený signál vrátí. Na základě této doby a rychlosti světla se vypočítá vzdálenost.

Dosah a přesnost: Dosah lidarů pro autonomní vozidla se typicky pohybuje od několika metrů do stovek metrů, s přesností na centimetry. Pro zemědělské aplikace je důležitý dostatečný dosah pro včasnou detekci překážek a mapování větších ploch.

Využití: Kromě detekce překážek a navigace se lidary využívají pro vytváření detailních 3D map terénu, analýzu topografie polí a monitorování růstu plodin. K tomuto účelu jsou používány také drony, které doplní k detailním informacím o plodinách data ze vzduchu k vytvoření ucelené představy o stavu polnosti. [29]



Obr. 2-30 An optical image of the resolution by the Velodyne LiDAR VLS-128 [29]

Radary (Radio Detection and Ranging): Radary jsou další aktivní dálkové senzory, které využívají elektromagnetické vlny v rádiovém frekvenčním pásmu k detekci objektů a měření jejich vzdálenosti a rychlosti.

Princip fungování: Radar vysílá rádiové vlny a analyzuje odražený signál. Z časového zpoždění a frekvenčního posunu odražených vln lze určit vzdálenost a relativní rychlost objektů.

Výhody a nevýhody v zemědělském prostředí: Radary jsou robustní vůči povětrnostním podmínkám, jako je déšť, mlha a prach, které mohou omezovat funkčnost optických senzorů (kamer a lidarů). Mají také delší dosah než ultrazvukové senzory. Nicméně, jejich rozlišení a přesnost v detailním mapování okolí jsou obvykle nižší než u lidarů a kamer. Odrazy od vegetace a mokré půdy mohou také způsobovat šum v datech.

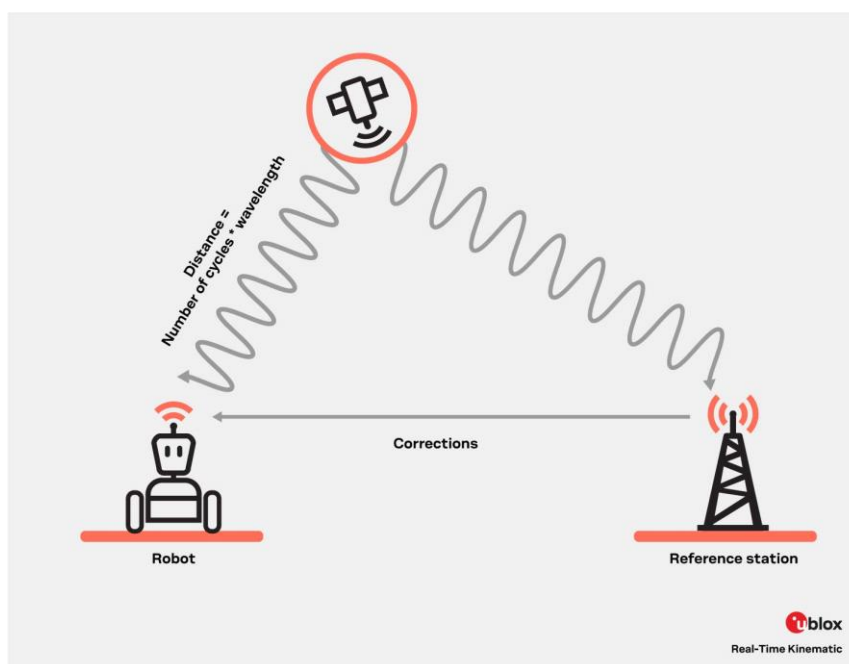
Ultrazvukové senzory: Tyto pasivní senzory vysílají zvukové vlny o vysoké frekvenci a měří dobu, za kterou se odražený signál vrátí. Využívají se především pro detekci blízkých překážek a asistenci při manipulaci, například při autonomním připojování pracovních nástrojů nebo doplňování vodíku. Mají omezený dosah a přesnost ve srovnání s lidary a radary, ale jsou cenově dostupné a robustní pro detekci pevných objektů v blízkém okolí.

Inerciální měřicí jednotky (IMU) a globální navigační satelitní systémy (GNSS) s RTK korekcemi: Pro přesnou lokalizaci a navigaci autonomního traktoru je nezbytná kombinace IMU a GNSS.

IMU: IMU obsahují akcelerometry a gyroskopy, které měří lineární zrychlení a úhlovou rychlost stroje. Poskytují informace o orientaci a pohybu traktoru v prostoru. Nicméně, jejich přesnost se časem snižuje kvůli kumulaci chyb (drift).

GNSS (Global Navigation Satellite Systems): GNSS, jako je GPS (Spojené státy), GLONASS (Rusko), Galileo (Evropská unie) a BeiDou (Čína), poskytují informace o poloze na základě signálů z družic. Standardní přesnost GNSS je však často nedostatečná pro precizní zemědělské operace.

RTK (Real-Time Kinematic) korekce: RTK je technika, která využívá signály z referenční stanice (která má přesně známou polohu) k výraznému zvýšení přesnosti GNSS polohování na úroveň centimetrů. RTK korekce mohou být získávány v reálném čase prostřednictvím rádiového spojení nebo mobilní sítě. Tato vysoká přesnost je nezbytná pro autonomní navigaci po předem definovaných drahách, precizní setí, hnojení a další zemědělské úkony.



Obr. 2-31 Real-Time Kinematic (RTK) and GNSS corrections [70]

Pro autonomní traktor ve výkonnostní kategorii nad 150 kW pro evropský trh bude pravděpodobně nezbytná fúze dat z více senzorů (sensor fusion) pro zajištění komplexního a spolehlivého vnímání okolního prostředí za různých provozních podmínek. Jak ukazují studie, integrace senzorů LiDAR s fúzí dat z video senzorů umožňuje rozpoznávání překážek v reálném čase s přesností přesahující 99 % v zónách zvýšeného rizika kolize [30; 29; 28]

Řídicí systém

Centrálním prvkem autonomního traktoru je sofistikovaný řídicí systém, který integruje data ze senzorů, plánuje optimální trasy a řídí veškeré akce stroje. Tento systém se skládá z několika klíčových komponent, které budou v této analýze probrány také ze strany využitelnosti umělé inteligence (AI).

Centrální řídicí jednotka: Tato jednotka (často označovaná jako Vehicle Control Unit VCU nebo Autonomous Control Unit ACU) představuje "mozek" autonomního traktoru. Musí disponovat vysokým výpočetním výkonem pro zpracování velkého množství dat v reálném čase, spouštění komplexních algoritmů a řízení různých subsystémů.

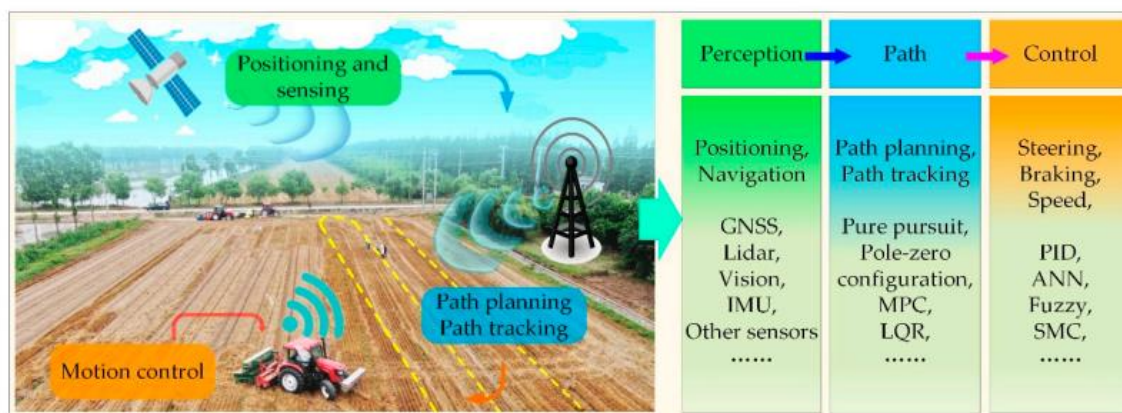
Pro náročné úlohy, jako je fúze dat ze senzorů, interpretace obrazu, plánování trasy v dynamickém prostředí a implementace pokročilých řídicích algoritmů, jsou vyžadovány výkonné multi-core procesory a grafické procesory (GPU) nebo specializované akcelerátory (např. FPGA, ASIC) pro paralelní zpracování dat.

Vzhledem k náročným provozním podmínkám v zemědělství musí být centrální řídicí jednotka navržena s vysokou odolností proti vibracím, prachu, vlhkosti a extrémním teplotám. Často se používají robustní průmyslové počítače s pasivním chlazením a krytím s vysokým IP standardem.

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu autonomního traktoru je žádoucí implementovat redundantní systémy. V případě selhání primární řídicí jednotky může záložní systém převzít kontrolu a zajistit bezpečné zastavení nebo pokračování v omezeném provozu.

Řídicí algoritmy: Srdcem autonomního řídicího systému jsou komplexní softwarové algoritmy, které umožňují traktoru vnímat okolí, rozhodovat se a jednat. Mezi klíčové algoritmy patří: **Autonomní navigace:** Algoritmy pro plánování trasy (path planning) generují optimální dráhy pro pohyb traktoru po poli s ohledem na zadané úkoly, překážky a terénní podmínky. **Algoritmy pro sledování trasy** (path following) zajišťují, že se traktor s vysokou přesností drží naplánované dráhy pomocí dat ze senzorů polohy a orientace. **Algoritmy pro detekci a vyhýbání se překážkám** (obstacle detection and avoidance) v reálném čase analyzují data ze senzorů (LiDAR, radar, kamery, ultrazvuk) a plánují bezpečné manévry pro objetí nebo zastavení před zjištěnou překážkou (statickou i dynamickou). **Řízení pracovních operací:** Algoritmy specifické pro danou zemědělskou operaci (např. setí, orba, sklizeň) řídí aktivaci a nastavení pracovních nástrojů na základě polohy, rychlosti a dalších relevantních parametrů.

Lokalizace a mapování (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping): V některých pokročilejších systémech se využívají SLAM algoritmy, které umožňují traktorovi současně vytvářet mapu neznámého prostředí a určovat svou polohu v této mapě pouze na základě dat ze senzorů. [31; 32; 33]



Obr. 2-32 Sketch diagram of key autonomous navigation technologies of UATs. [31]

Komunikační systémy: Pro efektivní provoz autonomního traktoru je nezbytná spolehlivá komunikace s farmářem, dispečinkem a potenciálně i s dalšími stroji. Využívají se různé komunikační technologie:

Bezdrátové sítě (Wi-Fi, mobilní sítě): Umožňují dálkové monitorování stavu traktoru, zadávání úkolů, stahování dat a softwarové aktualizace. Mobilní sítě (4G/LTE, potenciálně 5G) zajišťují komunikaci na větší vzdálenosti.

ISOBUS (ISO 11783) je mezinárodní **standard pro komunikaci** mezi traktory, zemědělskými nástroji a palubními počítači různých výrobců. Umožňuje výměnu dat a ovládání nástrojů z kabiny traktoru (v autonomním případě z řídicího systému). Pro autonomní provoz je důležitá schopnost systému komunikovat s autonomními nástroji a řídit jejich funkce.

Rádiová komunikace: Může sloužit pro přímou komunikaci mezi stroji na poli nebo s lokální základnovou stanicí.

Aktuátory pro řízení pohybu: Řídicí systém musí mít možnost fyzicky ovládat pohyb traktoru a jeho komponent. K tomu slouží různé typy aktuátorů:

Řízení kol: Elektrohydraulické nebo elektromechanické systémy řízení natáčejí kola na základě povelů z řídicí jednotky. Přesné řízení je klíčové pro sledování trasy a provádění manévrů.

Pohon: Řízení elektromotorů (v případě vodíkového pohonu) nebo hydraulických motorů (pro tradiční pohony) reguluje rychlost a točivý moment pohonných kol.

Hydraulické systémy: Elektrohydraulicky ovládané ventily řídí tok hydraulické kapaliny k hydraulickým válcům a motorům, které ovládají zvedání a spouštění pracovních nástrojů, natáčení ramen a další funkce.

Integrace a koordinace všech těchto komponent je zásadní pro dosažení plně autonomního a efektivního provozu zemědělského traktoru. [33; 4; 34; 35]

Využitelnost umělé inteligence (AI) v řídicích a jiných systémech

Centrální řídicí jednotka autonomního traktoru bude v budoucnosti stále více spoléhat na pokročilé algoritmy umělé inteligence pro komplexní rozhodování, optimalizaci provozu a adaptaci na dynamické podmínky. AI bude integrována do různých aspektů řídicího systému viz níže.



Obr. 2-33 AI-powered robotic systems [36]

Vnímání a interpretace prostředí: AI algoritmy, zejména v oblasti počítačového vidění a fúze sensorových dat, budou hrát zásadní roli při interpretaci komplexních informací z kamer, LiDARů, radarů a dalších senzorů.

Precizní řízení a sledování dráhy: AI bude integrována i do samotného řízení pohybu a ovládání aktuátorů. Algoritmy řízení s využitím zpětné vazby z vysoce přesných senzorů polohy (GNSS RTK) a vnitřních senzorů budou optimalizovány pomocí metod strojového učení pro dosažení subcentimetrové přesnosti při sledování naplánovaných drah.

Analýza terénu a predikce prokluzu: AI algoritmy mohou analyzovat data z lidarů a kamer pro detailní mapování terénu a predikovat potenciální riziko prokluzu kol na základě typu půdy a vlhkosti. To umožní optimalizovat nastavení pohonu a řízení pro maximalizaci trakce a minimalizaci poškození půdy.

Plánování a rozhodování: AI bude zásadní pro generování optimálních pracovních plánů a rozhodování v reálném čase.

Optimalizace trasy a pokrytí: Algoritmy inspirované metodami optimalizace (např. genetické algoritmy, optimalizace rojem částic) s využitím AI mohou plánovat nejefektivnější trasy pro pokrytí pole s ohledem na minimalizaci přejezdů, spotřebu energie a času.

Pokročilá detekce a segmentace objektů: AI umožní traktorů autonomně reagovat na nečekané události, jako je náhlé objevení se překážky nebo změna terénu, a provést bezpečné a efektivní korekční manévry.

Umožní nejen detekovat překážky, ale také je klasifikovat (např. lidé, zvířata, jiné stroje, plevele, plodiny) a predikovat jejich chování. Segmentace obrazu s využitím hlubokého učení umožní přesně oddělit různé objekty a oblasti v zorném poli pro detailní analýzu scény.

Rozpoznávání a monitorování plodin: AI systémy budou schopny rozpoznávat různé druhy plodin, monitorovat jejich růstové fáze, detekovat choroby a škůdce v raném stádiu a odhadovat výnos. To umožní cílené zásahy a optimalizaci agronomických postupů.

Adaptivní řízení pracovních nástrojů: AI systémy budou schopny v reálném čase upravovat parametry pracovních nástrojů (např. hloubku orby, dávkování hnojiva, nastavení sklizňové mlátičky) na základě okamžitých podmínek na poli a dat ze senzorů, čímž se zlepší kvalita práce a sníží spotřeba vstupů.

Prediktivní údržba: AI algoritmy mohou analyzovat data ze senzorů o stavu různých komponent traktorů (např. vibrace, teplota, tlak hydraulického oleje) a predikovat potenciální poruchy dříve, než k nim dojde. To umožní proaktivní údržbu a minimalizaci prostojů.

Inteligentní řízení pohonu a hydrauliky: AI systémy budou schopny v reálném čase optimalizovat otáčky motorů (ve finálním řešení elektromotorů), distribuci točivého momentu mezi nápravy či jednotlivá kola a nastavení hydraulických ventilů na základě aktuálního zatížení, terénních podmínek a požadavků na pracovní operaci. To povede k vyšší energetické účinnosti a snížení opotřebení komponent. Například, AI může predikovat potřebu vyššího hydraulického tlaku pro překonání náhlého odporu půdy a proaktivně upravit nastavení systému.

Integrace AI do autonomního traktorů přináší obrovský potenciál pro zvýšení efektivity, produktivity a udržitelnosti zemědělských operací. Schopnost stroje vnímat, analyzovat, rozhodovat se a jednat autonomně na základě komplexních dat povede k preciznějšímu zemědělství, snížení nákladů a minimalizaci dopadu na životní prostředí. [36; 4; 33; 11]

System pro autonomní doplňování vodíku a výměnu nástrojů

Pro dosažení plně autonomního provozu zemědělského traktoru je klíčové analyzovat možnosti automatizace úkonů spojených s doplňováním paliva (vodíku) a výměnou pracovních nástrojů. Současný vývoj v oblasti robotiky a automatizace nabízí několik přístupů, které lze adaptovat pro specifické potřeby zemědělství.

Autonomní doplňování paliva: Přímé aplikace v zemědělství jsou aktuálně omezené, existuje výzkum v oblasti autonomního tankování pro automobily a bezpilotní letadla. Tyto systémy využívají robotické manipulátory, senzory pro detekci a zarovnání, a komunikační protokoly pro řízení procesu plnění. Pro autonomní doplňování vodíku u traktoru by bylo nutné adaptovat tyto technologie pro specifické požadavky manipulace s vodíkem v zemědělském prostředí. Důležitá je bezpečnost, spolehlivost a efektivita.

Autonomní výměna nástrojů: V oblasti průmyslové automatizace je automatická výměna nástrojů běžná. Zemědělské stroje však vyžadují robustnější řešení. Vývoj směřuje ke standardizovaným rozhraním a robotickým systémům pro manipulaci s těžkými nástroji. Problémem je detekce a zarovnání nástrojů, kde se využívají kamery a lidary.

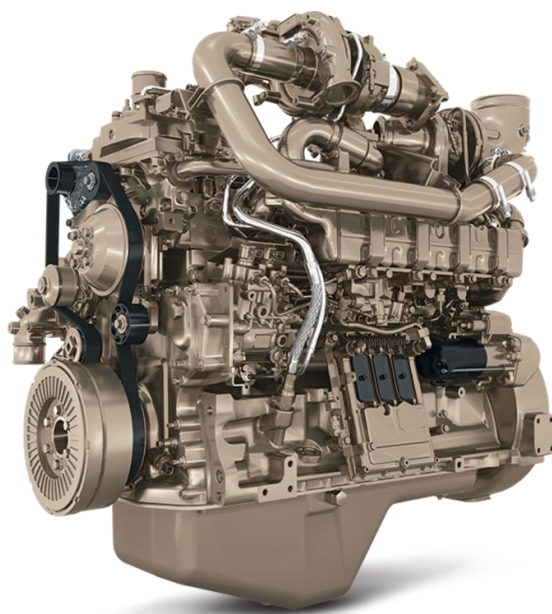
I když plně autonomní systémy pro doplňování vodíku a výměnu nástrojů v zemědělství jsou zatím ve fázi vývoje, analýza současných trendů v robotice a automatizaci ukazuje potenciál pro jejich implementaci. Klíčové je adaptovat existující technologie pro specifické požadavky zemědělského prostředí a zajistit bezpečnost a spolehlivost provozu. Vývoj v této oblasti potvrzuje řada patentů, které ukazují různá řešení autonomního a poloautonomního připojování nástrojů. [37]

Pohonné systémy zemědělských traktorů.

Vzhledem k tomu, že jednou z klíčových otázek diplomové práce je volba optimálního pohonu pro zemědělský traktor budoucnosti, a to zejména s ohledem na ekologické aspekty a kompatibilitu s autonomním provozem, je nezbytné provést stručnou analýzu pohonných systémů. Tato analýza poskytne kontext pro následné detailní rozpracování vodíkového pohonu, který je hlavním zaměřením této práce. Následující text se věnuje charakteristice tradičního dieselového pohonu, elektrického (bateriového) pohonu a hybridních pohonných systémů v kontextu zemědělských traktorů ve výkonnostní kategorii nad 150 kW.

Dieselový motor představuje po desetiletí dominantní pohonnou jednotku v zemědělských traktorech, a to i ve výkonnostní kategorii nad 150 kW. Jeho rozšíření je dáno především vysokou energetickou hustotou nafty, robustností, spolehlivostí a schopností poskytovat vysoký točivý moment potřebný pro náročné zemědělské práce.

Diesellový motor je pístový spalovací motor, ve kterém dochází k samovznícení paliva vstříknutého do stlačeného a zahřátého vzduchu ve válci. Čtyřdobý cyklus zahrnuje sání, kompresi, expanzi (pracovní zdvih) a výfuk. Výkon motoru je úměrný množství spáleného paliva za jednotku času a je charakterizován točivým momentem a výkonem v závislosti na otáčkách klikového hřídele. Diesellové motory pro traktory ve výkonnostní kategorii nad 150 kW se vyznačují vysokým maximálním točivým momentem dostupným již v relativně nízkých otáčkách, což je zásadní pro tahovou sílu potřebnou při orbě, tahání těžkých nářadí a práci v náročném terénu.



Obr. 2-34 John Deere 6068CI5506.8L Industrial Diesel Engine [38]

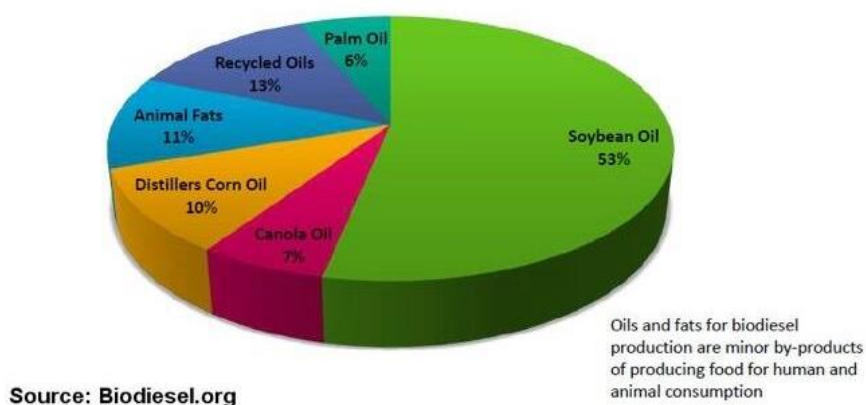
Spalování nafty produkuje řadu škodlivých emisí, včetně oxidů dusíku, pevných částic, oxidu uhelnatého a uhlovodíků. Legislativa Evropské unie stanovuje stále přísnější emisní normy pro zemědělské traktory, které vyžadují použití pokročilých technologií pro snižování emisí. Mezi tyto technologie patří systémy selektivní katalytické redukce s AdBlue, filtry pevných částic, systémy recirkulace výfukových plynů a oxidační katalyzátory. Budoucí emisní limity pravděpodobně povedou k dalšímu zpřísnování požadavků, což bude klást stále větší nároky na složitost a účinnost systémů pro úpravu výfukových plynů.

Hlavní nevýhodou diesellového pohonu je jeho negativní dopad na životní prostředí v důsledku emisí skleníkových plynů a dalších škodlivých látek znečišťujících ovzduší. I přes pokročilé systémy pro úpravu výfukových plynů zůstává diesellový pohon zdrojem znečištění. [38]

Z hlediska autonomního provozu nepředstavuje samotný dieselový motor zásadní technickou překážku pro řízení pohybu a výkonu. Nicméně, absence přímé elektrické energie může komplikovat integraci některých pokročilých autonomních systémů a elektricky poháněných pracovních nástrojů. Hluk a vibrace dieselového motoru mohou také potenciálně ovlivňovat citlivost některých senzorů.

Tato analýza tradičního dieselového pohonu se zaměřením na udržitelnost poskytuje srovnávací základnu pro posouzení výhod a nevýhod alternativních pohonných systémů, které budou popsány v následujících sekcích.

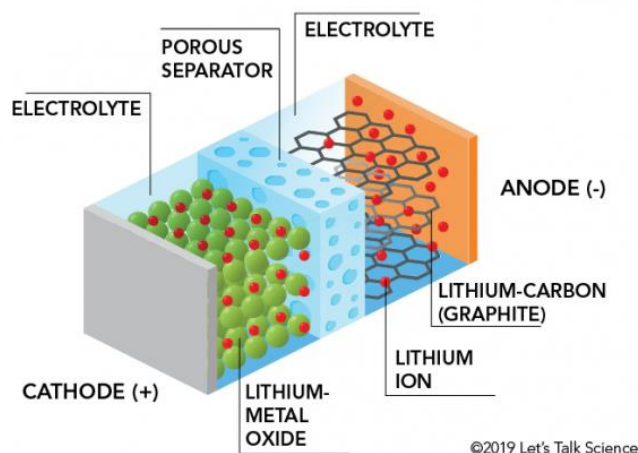
Kromě tradiční nafty existuje možnost využití **biopaliv** jako alternativního zdroje energie pro dieselové motory zemědělských traktorů. Biopaliva jsou vyráběna z obnovitelných zdrojů viz graf níže, jako jsou rostlinné oleje (např. řepkový olej), metylestery mastných kyselin nebo bioethanol (pro speciálně upravené motory nebo jako příměs). Použití biopaliv může snížit závislost na fosilních palivech a potenciálně i emise skleníkových plynů, v závislosti na způsobu jejich výroby a celkovém životním cyklu. Nicméně, je nutné zohlednit i aspekty jako energetická hustota, kompatibilita s motory (často vyžadující úpravy), vliv na životnost motoru, dostupnost a udržitelnost zdrojů biomasy. [39; 40]



Obr. 2-35 What Is Biodiesel? [39]

Elektrický pohon, s akumulací energie v bateriích, představuje jednu z perspektivních alternativ k tradičnímu dieselovému pohonu zemědělských traktorů. Jeho popularita roste v mnoha odvětvích dopravy a mobilních strojů díky potenciálu pro snížení emisí a hluku. Nicméně, jeho aplikace v segmentu výkonných zemědělských traktorů s sebou nese specifické výzvy. Elektrický pohon je založen na přeměně elektrické energie z baterií na mechanickou práci prostřednictvím elektromotoru. Baterie ukládají elektrickou energii chemicky a při vybíjení dochází k řízené chemické reakci, která uvolňuje elektrony.

PARTS OF A LITHIUM-ION BATTERY



Obr. 2-36 Parts of a lithium-ion battery [41]

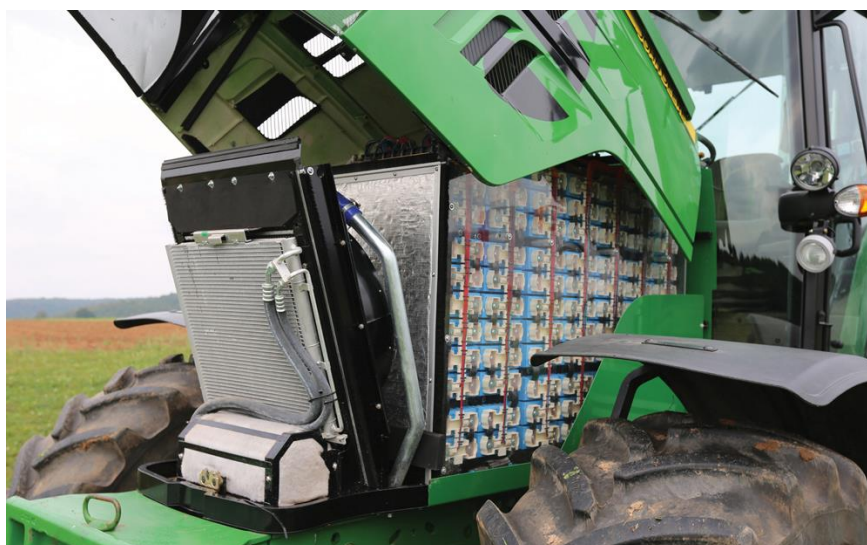
Elektromotor pak využívá elektromagnetické pole k otáčení rotoru a generování točivého momentu. Pro pohon zemědělských traktorů by připadaly v úvahu především lithium-iontové baterie, které se vyznačují relativně vysokou energetickou hustotou a dlouhou životností. Existuje několik různých chemických složení lithium-iontových baterií (např. NMC, NCA, LFP), které se liší svými vlastnostmi, jako je energetická hustota, výkonová hustota, bezpečnost a cena.

Výběr vhodného typu baterie by závisel na specifických požadavcích traktoru a jeho zamýšleném použití. Energetická hustota baterií (měřená v Wh/kg nebo Wh/l) udává množství energie, které lze uložit na jednotku hmotnosti nebo objemu. Současné lithium-iontové baterie mají výrazně nižší energetickou hustotu než nafta, což znamená, že pro uložení srovnatelného množství energie je potřeba mnohem větší a těžší bateriový pack. To představuje značné omezení pro velké zemědělské traktory, které vyžadují vysoký výkon a dlouhou dobu provozu. Doba potřebná k nabití velkého bateriového packu pro traktor může být značná, a to i při použití rychlonabíjecích systémů. To může vést k prostojům v pracovním cyklu, což je nežádoucí. Dojezd elektrického traktoru na jedno nabití baterie je přímo úměrný kapacitě baterie a spotřebě energie. Při náročných zemědělských pracích s vysokým zatížením motoru a hydraulických systémů může být dojezd omezený, tudíž vyžaduje častější nabíjení. [41; 42; 43]

Aplikace čistě bateriového elektrického pohonu pro traktory ve výkonnostní kategorii nad 150 kW naráží na několik zásadních omezení:

- Hmotnost a velikost baterií: Pro dosažení srovnatelného výkonu a doby provozu jako u diesellového traktoru by byla potřeba extrémně velký a těžký bateriový pack. To by negativně ovlivnilo manévrovatelnost, zhutňování půdy a celkovou konstrukci traktoru.
- Doba nabíjení a infrastruktura: Dlouhá doba nabíjení a nedostatečná nabíjecí infrastruktura na farmách a v zemědělských oblastech představují významnou překážku pro praktické využití.
- Výkonová náročnost: Náročné zemědělské operace vyžadují trvalý vysoký výkon, což klade velké nároky na baterie z hlediska proudového zatížení a chlazení.
- Životnost baterií: Cyklické nabíjení a vybití baterií během intenzivního zemědělského provozu může ovlivnit jejich životnost a vést k nutnosti nákladné výměny.

Zajímavým příkladem vývoje v oblasti bateriových elektrických traktorů je prototyp SESAM (Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery) od společnosti John Deere, představený v Evropě v roce 2017. Tento prototyp, postavený na základě traktoru řady 6R, disponoval 130 kWh, 670V lithium-iontovým bateriovým systémem, který nahradil tradiční diesellový motor, můžete vidět na obrázku níže. Baterie napájela dvojici 150 kW elektromotorů, které mohly společně krátkodobě poskytnout až 300 kW výkonu pro transportní nebo pracovní operace s vývodovou hřídelí a hydraulikou. V běžném provozu jeden motor poháněl kola a druhý hydrauliku a PTO. Jedno nabití baterie umožňovalo až čtyři hodiny provozu v typických smíšených aplikacích, přičemž doba nabíjení činila přibližně tři hodiny. Tento prototyp demonstroval potenciál bateriového pohonu i pro výkonnější zemědělské stroje a poukázal na výhody, jako je rekuperace brzděné energie a nižší provozní náklady. [42]



Obr. 2-37 The 130 kWh, 670V Li-ion battery system [42]

Přestože bateriový elektrický pohon má potenciál pro menší zemědělské stroje s kratší dobou provozu a nižšími nároky na výkon, jeho přímé uplatnění ve výkonnostní kategorii nad 150 kW je v současnosti limitováno výše uvedenými faktory. Budoucí vývoj v oblasti energetické hustoty baterií, rychlosti nabíjení a snížení nákladů by však mohl tyto omezení zmírnit. Ukládání elektrické energie je nyní v odvětví vědy a výzkumu velkým tématem, může se stát, že se v budoucnu objeví nový typ baterií, které budou splňovat nároky na udržitelný životní cyklus a výkonnostní parametry.

Hybridní pohonné systémy představují kombinaci dvou nebo více různých zdrojů energie pro pohon zemědělského traktoru. Cílem je využít výhod jednotlivých technologií a minimalizovat jejich nevýhody, čímž se dosáhne vyšší účinnosti, flexibility a potenciálně i nižších emisí. V kontextu zemědělských traktorů se nejčastěji uvažují kombinace diesellového motoru s elektrickým pohonem (diesel-elektrický hybrid) nebo bateriového elektrického pohonu s dalším zdrojem energie.

Diesel-elektrický hybrid: V této konfiguraci primární pohonnou jednotkou zůstává diesellový motor, který pohání generátor elektrické energie. Ta napájí elektromotory, které přímo pohánějí kola a hydraulické systémy. Baterie zde slouží jako zásobník energie pro rekuperaci brzděné energie a pro vyrovnávání špičkových požadavků na výkon. Konfigurace umožňuje plynulou regulaci výkonu, využití rekuperace a potenciálně nižší spotřebu paliva díky optimálnímu zatížení diesellového motoru v jeho nejúčinnějším rozsahu otáček.

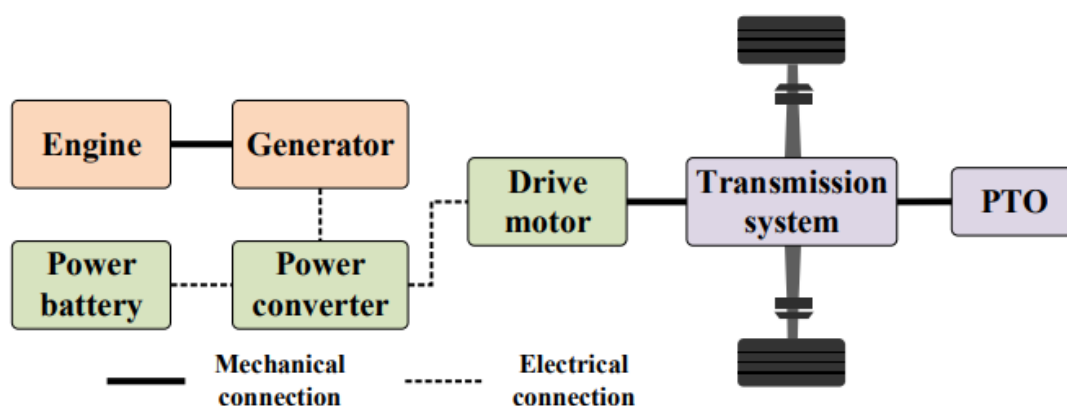
Bateriový-elektrický hybrid s diesellovým generátorem (Range Extender): Tato technologie využívá baterie jako hlavní zdroj energie pro pohon. Pokud kapacita baterií klesne pod určitou úroveň, aktivuje se menší diesellový motor, který slouží pouze jako generátor pro dobíjení baterií a prodloužení dojezdu. Tento přístup může snížit emise v běžném provozu, kdy je využívána energie z baterií, a zároveň eliminuje obavy z omezeného dojezdu díky záložnímu spalovacímu motoru.

Bateriový-elektrický hybrid s palivovými články: V této pokročilé konfiguraci je hlavním zdrojem energie bateriový pack, který je doplňován energií z palivových článků. Palivové články přeměňují chemickou energii paliva přímo na elektrickou energii s minimálními nebo nulovými emisemi, v případě vodíku je jediným vedlejším produktem voda. Baterie zde slouží pro pokrytí špičkových požadavků na výkon a pro rekuperaci energie. Tato konfigurace kombinuje výhody elektrického pohonu s potenciálem pro dlouhý dojezd a rychlé doplnění paliva. [44; 45]

Výhody a nevýhody hybridních systémů:

- Potenciál pro snížení spotřeby paliva a emisí: Hybridní systémy mohou optimalizovat provoz spalovacího motoru nebo využívat čistě elektrický pohon v určitých režimech, což vede k nižší spotřebě paliva a emisím skleníkových plynů a škodlivých látek.
- Vyšší účinnost pohonu: Elektrické motory mají obecně vyšší účinnost přeměny energie než spalovací motory, a rekuperace brzděné energie dále zvyšuje celkovou účinnost systému.
- Lepší dynamika a točivý moment: Elektromotory poskytují vysoký točivý moment od nulových otáček, což může zlepšit akceleraci a tahovou sílu traktoru.
- Možnost tichého provozu: Při využití čistě elektrického pohonu může být hluchost traktoru výrazně snížena, což je výhodné při práci v blízkosti obytných oblastí nebo vzhledem k okolním živočichům.
- Flexibilita a přizpůsobivost: Hybridní systémy mohou být navrženy tak, aby optimálně fungovaly v různých pracovních režimech a podmínkách.
- Vyšší složitost a náklady: Hybridní pohonné systémy jsou obecně složitější než konvenční dieselové pohony, což se může projevit ve vyšších pořizovacích nákladech a potenciálně i nákladech na údržbu.
- Hmotnost a prostorové nároky: Integrace více pohonných komponent (spalovací motor, elektromotory, generátor, baterie, řídicí elektronika) může vést k vyšší hmotnosti a větším prostorovým nárokům v konstrukci traktoru.
- Potřeba dobíjecí infrastruktury: Bateriové hybridní systémy vyžadují přístup k elektrické síti pro dobíjení, což může být v zemědělských oblastech omezené.
- Závislost na fosilních palivech: I když diesel-elektrické hybridy mohou snížit spotřebu paliva, stále jsou závislé na naftě.

Hybridní pohonné systémy představují přechodové řešení, které může nabídnout výhody elektrifikace a zároveň překonat některé současné limity čistě bateriového pohonu pro výkonné zemědělské traktory. Výběr konkrétní hybridní konfigurace bude záviset na specifických požadavcích na výkon, dojezd, emise a ekonomickou efektivitu.



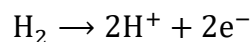
Obr. 2-38 Topological structure diagram of the power system for a series hybrid tractor [44]

Vodíkový pohon prostřednictvím proton exchange membránových (PEM) palivových článků a elektromotorů.

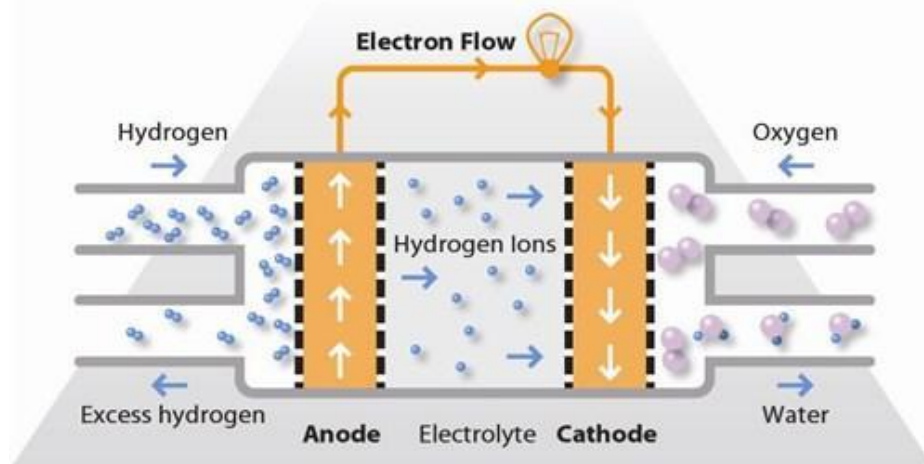
Vize autonomního traktoru pro zemědělství budoucnosti, představená v této práci, je založena na využití vodíkového pohonu. Vodík představuje čistý a potenciálně udržitelný zdroj energie, jehož spalováním (v případě spalovacích motorů) nebo elektrochemickou reakcí s kyslíkem (v palivových článcích) vzniká jako jediný vedlejší produkt voda. V kontextu zemědělství s možností vlastní výroby vodíku pomocí obnovitelných zdrojů energie (agrovoltaika a elektrolýza vody) se vodíkový pohon jeví jako velmi perspektivní řešení pro dosažení uhlíkové neutrality a snížení závislosti na fosilních palivech. Následující odstavce detailně analyzují princip fungování proton exchange membránových palivových článků a jejich charakteristiky pro mobilní aplikace.

Proton exchange membránový (PEM) palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii vodíku a kyslíku přímo na elektrickou energii, teplo a vodu. Funguje na principu řízené elektrolýzy vody v reverzním režimu, avšak s oddělenými reakčními místy a katalyzátory pro urychlení reakcí. Základními stavebními kameny PEM palivového článku jsou anoda, katoda a protonově vodivá membrána (elektrolyt), které jsou obvykle nanášeny na porézní uhlíkové nosiče s katalyzátory.

Anoda: Na anodě dochází k oxidaci vodíku. Molekulární vodík (H_2) je přiváděn k anodovému katalyzátoru (obvykle platina nebo slitiny platiny), kde se disociuje na protony (H^+) a elektrony (e^-). Tato reakce je popsána následovně:



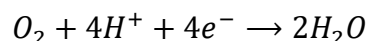
Uvolněné elektrony jsou vedeny externím elektrickým obvodem, čímž vzniká elektrický proud, který může pohánět elektromotory traktoru a další elektrické systémy. Protony procházejí protonově vodivou membránou k druhé elektrodě – katodě.



Obr. 2-39 PEMFC fuel cell scheme [46]

Protonově vodivá membrána (Elektrolyt): Membrána je tenká polymerní vrstva, která je selektivně propustná pro protony (H^+), ale nepropouští elektrony a plyny (vodík a kyslík). Zajišťuje tak fyzické oddělení anody a katody a zároveň umožňuje transport protonů, které jsou nezbytné pro dokončení elektrochemické reakce. Nejčastěji používaným materiálem pro PEM membrány je Nafion®, což je perfluorosulfonová kyselina.

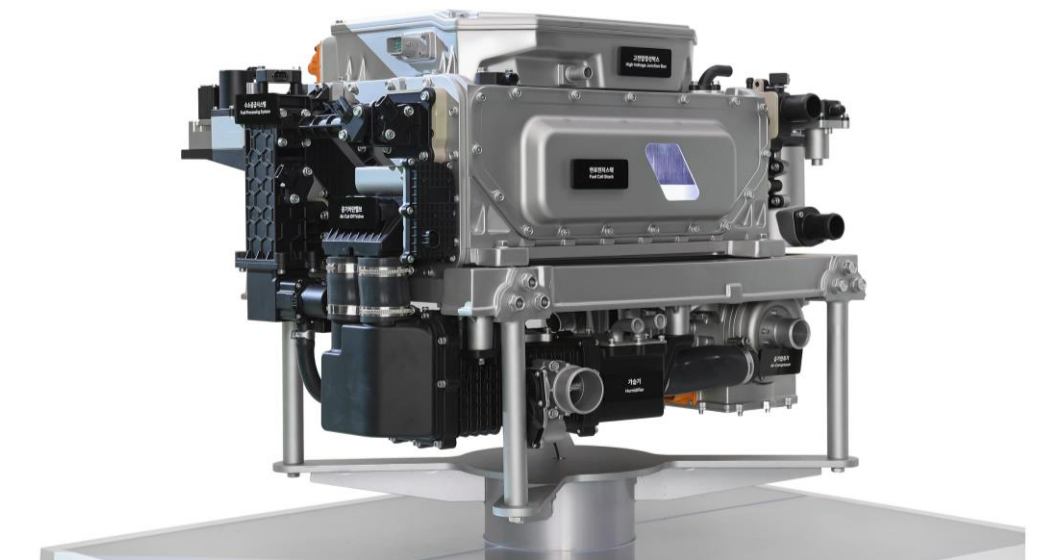
Katoda: Na katodě dochází k redukci kyslíku. Kyslík (O_2) je přiváděn ke katodovému katalyzátoru (obvykle platina nebo slitiny platiny, případně jiné nekovové materiály ve výzkumu), kde reaguje s protony, které prošly membránou, a s elektrony, které přišly z externího obvodu. Tato reakce za vzniku vody je popsána následovně:



Celková chemická reakce probíhající v PEM palivovém článku je tedy kombinací anodové a katodové reakce:



Účinnost PEM palivových článků závisí na mnoha faktorech, včetně proudové hustoty, teploty, tlaku a kvality použitých materiálů a komponent. Teoretická maximální účinnost přeměny Gibbsovy volné energie na elektrickou energii je poměrně vysoká. V reálných provozních podmínkách se účinnost PEM palivových článků pro mobilní aplikace obvykle pohybuje v rozmezí 40-60 %. Ztráty energie jsou způsobeny především polarizačními jevy na elektrodách (aktivace, ohmické a koncentrační polarizace) a únikem plynu přes membránu. Vývoj směřuje k zvyšování účinnosti prostřednictvím optimalizace katalyzátorů, membrán a konstrukce celého článku. [40; 46; 47]



Obr. 2-40 Hyundai – A next-generation fuel cell systém [40]

PEM palivové články pro mobilní aplikace, na rozdíl od stacionárních zdrojů energie, musí splňovat specifické požadavky s ohledem na dynamické provozní podmínky, omezený prostor a hmotnost, a také odolnost vůči vibracím a okolnímu prostředí.

- **Výkonová hustota:** Výkonová hustota udává elektrický výkon, který je palivový článek schopen generovat na jednotku objemu nebo hmotnosti (typicky ve W/l nebo W/kg). Pro mobilní aplikace je klíčová co nejvyšší výkonová hustota, aby bylo možné dosáhnout požadovaného výkonu traktoru s co nejmenšími a nejlehčími palivovými články. Moderní PEM palivové články pro mobilní použití dosahují výkonových hustot v řádu několika kW/l.
- **Hmotnostní hustota:** Hmotnostní hustota (typicky v kWh/kg, i když se častěji udává výkonová hustota) je dalším důležitým parametrem pro mobilní aplikace. Nižší hmotnost palivového systému přispívá k celkové efektivitě a manévrovatelnosti vozidla. Vývoj směřuje k odlehčování jednotlivých komponent palivového článku a celého systému.
- **Provozní teplota:** PEM palivové články obvykle pracují při relativně nízkých teplotách, typicky v rozmezí 60-100 °C. Tato nízká provozní teplota umožňuje rychlejší náběh systému, ale zároveň vyžaduje efektivní systém pro odvod tepla, které je vedlejším produktem elektrochemické reakce. Stabilní provozní teplota je klíčová pro optimální účinnost a životnost membrány.
- **Životnost:** Životnost PEM palivových článků pro mobilní aplikace je zásadní pro jejich ekonomickou a praktickou využitelnost. Udává se obvykle v provozních hodinách nebo v počtu cyklů start/stop. V zemědělském provozu se očekává dlouhá a spolehlivá životnost i v náročných podmínkách. Faktory ovlivňující životnost zahrnují kvalitu použitých materiálů, provozní podmínky (teplota, vlhkost, čistota paliva a vzduchu) a dynamické zatížení.
- **Požadavky na kvalitu vodíku:** PEM palivové články jsou citlivé na nečistoty v přiváděném vodíku, jako je oxid uhelnatý (CO), sulfan (H₂S) a amoniak (NH₃). Tyto nečistoty mohou deaktivovat katalyzátory a poškodit membránu, což vede ke snížení výkonu a životnosti palivového článku. Proto je pro spolehlivý provoz nezbytný vysoce čistý vodík. V kontextu s výrobou vodíku přímo na farmě je důležité zajistit, aby proces elektrolýzy a následné skladování a distribuce vodíku zaručovaly požadovanou úroveň čistoty. [47; 48]

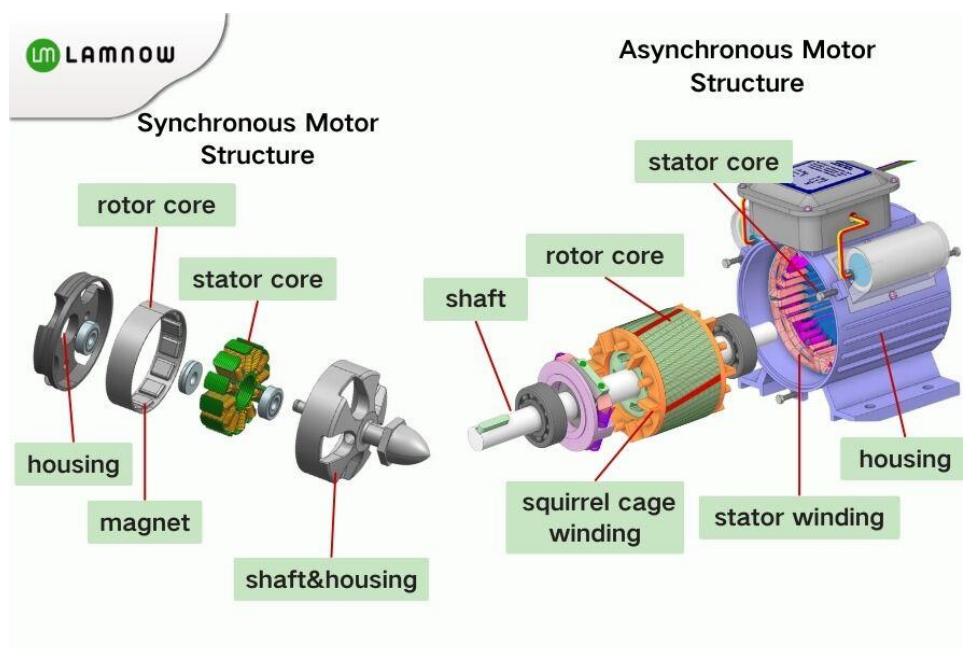
Elektromotory

Elektromotory jsou klíčovou součástí pohonného systému autonomního traktoru s hybridním, čistě bateriovým či vodíkovým pohonem, jelikož budou přeměňovat elektrickou energii z palivových článků (a případně baterie) na mechanickou práci potřebnou k pohonu kol a dalších systémů. Pro pohon zemědělských traktorů se nejčastěji uvažují dva hlavní typy elektromotorů:

Asynchronní (indukční) motory: Tyto motory jsou robustní, relativně levné a mají dobrou účinnost v širokém rozsahu otáček a zatížení. Princip jejich fungování je založen na interakci mezi rotujícím magnetickým polem statoru a indukovanými proudy v rotoru. Jejich nevýhodou může být o něco nižší účinnost ve srovnání se synchronními motory a nutnost řízení skluzu pro regulaci otáček.

Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM): Tyto motory dosahují vyšší účinnosti a výkonové hustoty než asynchronní motory. Rotor obsahuje permanentní magnety, které interagují s rotujícím magnetickým polem statoru. PMSM nabízejí přesnější řízení točivého momentu a otáček, což je výhodné pro precizní zemědělské operace a autonomní řízení. Jejich nevýhodou může být vyšší cena vzhledem k použití permanentních magnetů a potenciální citlivost magnetů na vysoké teploty.

Pro specifické aplikace v zemědělských traktorech se mohou uplatnit i další typy elektromotorů, jako jsou synchronní reluktanční motory (SynRM) nebo motory s vnějším rotorem, ale asynchronní a PMSM motory jsou v současnosti nejběžnější volbou pro trakční pohony elektrických vozidel a strojů.



Obr. 2-41 Lamnow – synchronous motors and asynchronous motors [49]

Elektromotory pro zemědělské traktory ve výkonnostní kategorii nad 150 kW budou muset poskytovat vysoký točivý moment, zejména v nízkých otáčkách, pro zajištění potřebné tahové síly. Důležitá je také schopnost trvalého provozu při vysokém zatížení a dobrá účinnost v širokém rozsahu otáček a točivého momentu, aby se maximalizoval dojezd a minimalizovaly ztráty energie. Elektromotory jsou schopny poskytnout jmenovitý točivý moment prakticky od nulových otáček, což je velká výhoda oproti spalovacím motorům. Maximální točivý moment může být krátkodobě i výrazně vyšší. Rozsah provozních otáček elektromotorů pro trakční pohony je široký a lze je plynule regulovat. Často se však k elektromotorům připojují redukční převodovky, které snižují vysoké otáčky. Moderní elektromotory dosahují vysoké účinnosti, často přes 90 %, v optimálním rozsahu zatížení. Účinnost se obvykle mírně snižuje při velmi nízkém nebo velmi vysokém zatížení a otáčkách.

Pro efektivní využití elektromotorů v pohonném systému traktoru je nezbytný pokročilý řídicí systém, obvykle zahrnující měnič frekvence (invertor). Měnič frekvence transformuje stejnosměrné napětí z baterií na střídavé napětí s proměnnou frekvencí a amplitudou, čímž umožňuje plynulou regulaci otáček a točivého momentu elektromotoru. Moderní měniče frekvence také implementují pokročilé řídicí algoritmy pro optimalizaci účinnosti, rekuperaci energie při brzdění a zajištění plynulého a dynamického chodu pohonu. V závislosti na konstrukci traktoru mohou být použity jeden nebo více elektromotorů. Jeden výkonný motor by mohl pohánět převodovku, podobně jako u tradičních traktorů. Alternativně by mohl být použit jeden elektromotor pro každou nápravu (pro pohon všech kol) nebo dokonce pro každé kolo viz obrázek, což by umožnilo pokročilé systémy řízení trakce. Umístění elektromotorů by mělo minimalizovat délku hnacích hřídelů a zohledňovat chlazení. [49]



Obr. 2-42 Brushless Gear Deceleration Motor Wheel

Palivové nádrže

Tato kapitola se zaměřuje na analýzu palivových nádrží pro zemědělské traktory, přičemž v kontextu vize autonomního traktoru na vodíkový pohon je kladen důraz na specifika skladování vodíku. Pro srovnání a úplnost je nejprve stručně popsána konvenční technologie skladování paliva u tradičních traktorů.

Klasické nádrže na naftu či bionaftu: Tradiční zemědělské traktory s dieslovým pohonem využívají ke skladování paliva (nafty) robustní nádrže, které jsou obvykle vyrobeny z kovu nebo z vysokohustotního polyetylénu (HDPE). Tyto nádrže jsou navrženy tak, aby odolávaly náročným provozním podmínkám, vibracím a nárazům. Jejich konstrukce zahrnuje systémy pro odvětrání, plnění a sání paliva, a často i vnitřní přepážky pro omezení pohybu paliva během jízdy, což přispívá ke stabilitě stroje. Objem nádrží se liší v závislosti na výkonnostní kategorii traktoru a požadované době provozu bez nutnosti doplňování paliva. Bezpečnostní aspekty zahrnují ochranu proti úniku paliva a opatření pro případ požáru.

Vodíková nádrž: Skladování vodíku pro pohon autonomního traktoru představuje specifickou technickou výzvu vzhledem k nízké objemové energetické hustotě vodíku za atmosférického tlaku. Z tohoto důvodu je nutné vodík skladovat ve stlačeném nebo zkapalněném stavu, což vyžaduje specializované nádrže, které jsou uvedeny dále.



Obr. 2-43 Vehicle Storage Tank Truck H2 Gas [50]

Plynové nádrže (tlakové): Nejběžnějším způsobem skladování vodíku pro mobilní aplikace je stlačování plynného vodíku na vysoké tlaky, typicky 350 barů (5000 psi) nebo 700 barů (10 000 psi). Vyšší tlak umožňuje uložit více vodíku v daném objemu.

Typy tlakových nádrží:

- **Celokovové:** Tyto nádrže jsou vyrobeny z oceli nebo hliníku. Jsou robustní a bezpečné, ale mají nejnižší poměr hmotnosti uloženého vodíku k celkové hmotnosti nádrže. Vyznačují se velmi náročnou výrobou.
- **Kovová vložka s kompozitním obalem:** Kovová vložka je plně obalena kompozitními materiály (např. uhlíková vlákna), což snižuje hmotnost při zachování pevnosti.
- **Polymerová vložka s kompozitním obalem):** Vložka je vyrobená z polymeru (např. HDPE) a je plně obalena vysokopevnostními kompozitními materiály (obvykle uhlíková vlákna). Tyto nádrže mají nejvyšší poměr hmotnosti uloženého vodíku k celkové hmotnosti nádrže, zároveň se dají jednodušeji a levněji vyrobit. Po skončení životnosti jsou však téměř nerecyklovatelné na rozdíl od celokovových nádrží.

Kryogenní nádrže (kapalný vodík): Skladování vodíku v kapalném stavu při velmi nízké teplotě (-253 °C) nabízí vyšší objemovou energetickou hustotu než stlačený plyný vodík při běžných tlacích. Nicméně, kryogenní skladování vyžaduje speciálně izolované nádrže pro minimalizaci odpařování (boil-off) a energeticky náročný proces zkapalňování vodíku. Pro zemědělské aplikace může být manipulace s kryogenními teplotami a riziko odpařování limitující. [50; 50; 51; 47]



Obr. 2-44 Liquid Hydrogen Storage [51]

Podvozek a pracovní nástroje

Podvozek zemědělského traktoru tvoří základní nosnou strukturu, která nese všechny ostatní komponenty, včetně pohonných systémů, kabiny (v tradičním provedení), pracovních nástrojů a nákladu. Konstrukce podvozku má zásadní vliv na pevnost, stabilitu, rozložení hmotnosti, jízdní vlastnosti a životnost celého stroje.

V závislosti na výkonnostní třídě a zamýšleném použití se u zemědělských traktorů využívají různé typy rámových konstrukcí.

Rámová konstrukce: Tento typ konstrukce je nejrozšířenější u vyšších a nejvyšších výkonových tříd traktorů, kde rám plní primární nosnou funkci. Jednotlivé strojní skupiny, jako je motor, převodovka a nápravy, jsou k rámu připevněny prostřednictvím silentbloků, které efektivně tlumí hluk a vibrace vznikající během provozu. Rámová konstrukce umožňuje dosažení optimálního rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu, což má pozitivní vliv na trakční schopnosti traktoru. Další výhodou je vysoká nosnost a vhodnost pro implementaci systémů odpružení náprav nebo natáčení obou náprav, což zlepšuje jízdní komfort a manévrovatelnost.



Obr. 2-45 Rámová konstrukce podvozku Fastrac [52]

Polorámová konstrukce: Traktory vyšších a středních výkonových tříd často využívají polorámový podvozek. V tomto případě je přední část podvozku tvořena rámem, na kterém je uložen motor a převodovka. Zadní část podvozku je pak tvořena rozvodovkou a zadní nápravou, které jsou k přední rámové části připojeny. Polorámová konstrukce se ukazuje jako výhodné řešení pro traktory vybavené předním hydraulickým tříbodovým závěsem nebo čelním nakladačem, kde dochází k většímu namáhání přední části podvozku. Poskytuje dobrou kombinaci pevnosti a flexibility pro různé aplikace.



Obr. 2-46 Polorámová konstrukce podvozku Fendt [52]

Bezrámová konstrukce: Tento typ konstrukce, kde jsou jednotlivé hlavní komponenty (motor, převodovka, skříň koncových převodů, nápravy) sešroubovány do jednoho nosného celku, je typický spíše pro traktory nižších a středních výkonových tříd. Nevýhodou bezrámové konstrukce je často vyšší hmotnost jednotlivých dílů, které musí být schopny přenášet provozní zatížení, a potenciálně nevyhovující rozložení hmotnosti. Pro výkonnostní kategorii nad 150 kW se tento typ konstrukce zpravidla nevyužívá.

Pro konstrukci rámu a nosných prvků traktorů se používají vysoce pevné oceli, které musí splňovat náročné požadavky na zatížení v tahu, tlaku, ohybu a krutu. Volba konkrétního typu oceli závisí na namáhání dané části rámu a na požadované životnosti. Důležitými vlastnostmi jsou mez kluzu, pevnost v tahu, tažnost a odolnost proti únavě materiálu. Moderní konstrukční postupy, jako je optimalizace tvaru profilů a použití svařovaných spojů s vysokou pevností, umožňují navrhovat lehké a zároveň velmi odolné rámy, které vydrží dlouhodobé namáhání v náročném zemědělském prostředí. V kontextu autonomního traktoru s odhalenou vodíkovou nádrží bude rámová konstrukce pravděpodobně nejvhodnější pro zajištění nosnosti a stability. Volbu ovlivní výběr typu nápravy či odpružení, které bude analyzováno v další části. [52]

Nápravy a systémy řízení představují kritické komponenty podvozku, které přímo ovlivňují trakci, stabilitu, manévrovatelnost a přesnost pohybu autonomního traktoru.

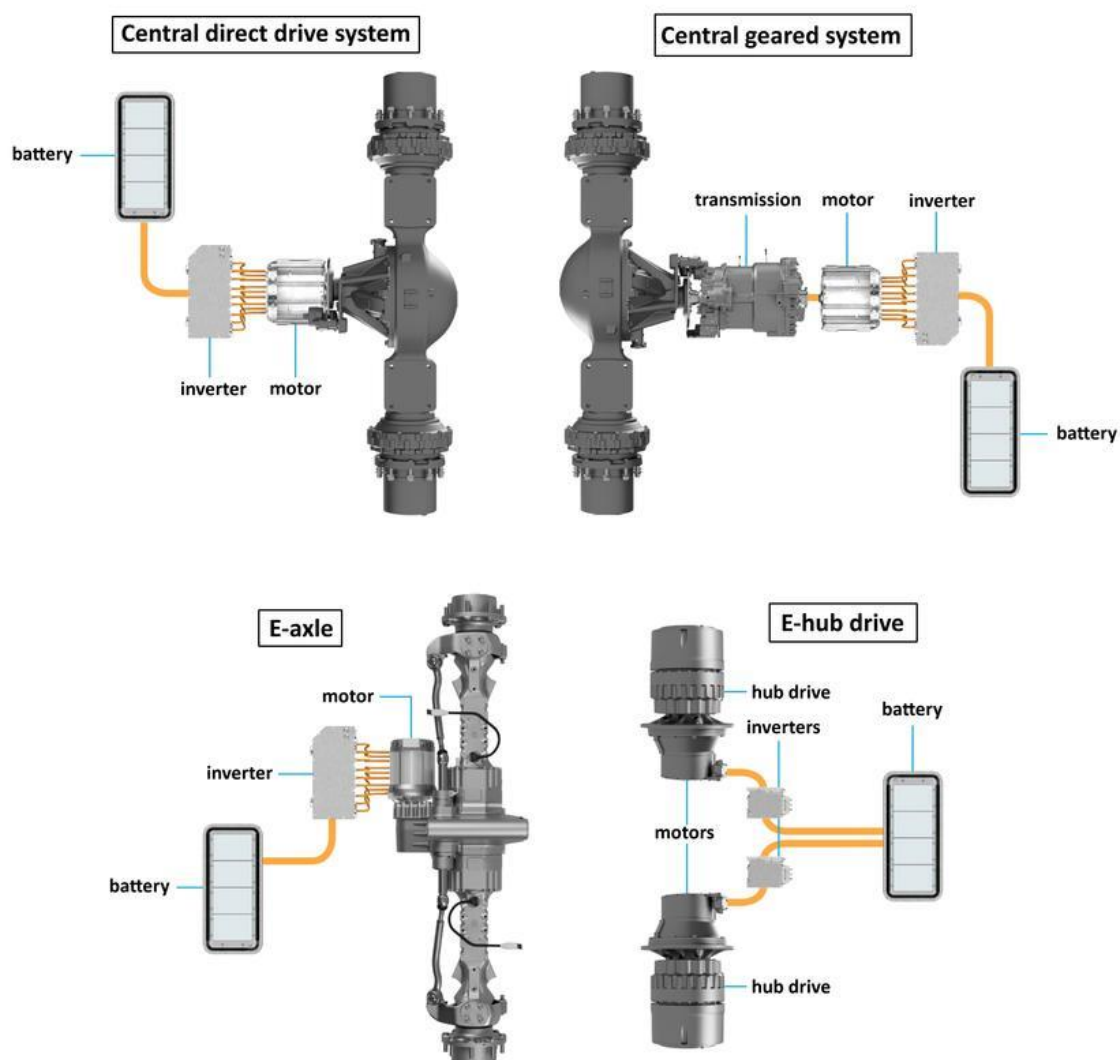
Pevné nápravy: U pevné nápravy jsou obě kola na jedné ose pevně spojena s nosníkem nápravy. Vertikální pohyb jednoho kola přímo ovlivňuje druhé kolo na stejné nápravě. Výhodou je jednoduchá konstrukce, vysoká pevnost a nosnost, nižší výrobní náklady. Dobře se hodí pro přenos velkých sil a zatížení. Avšak nabízí horší kopírování nerovného terénu, což může vést ke ztrátě trakce jednoho z kol a k přenosu rázů na rám a další komponenty. To implikuje nižší jízdní komfort, což v případě traktoru bez kabiny řidiče jako problém odpadá. Pro autonomní provoz může horší kontakt s terénem znamenat menší přesnost pohybu a potenciální problémy s trakcí v náročných podmínkách.

Výkyvné nápravy: Každé kolo je uloženo na samostatném výkyvném rameni, které se může v omezeném rozsahu vertikálně pohybovat kolem otočného bodu na rámu. To umožňuje kolům nezávisleji reagovat na nerovnosti terénu. Což implikuje zlepšené kopírování terénu, tudíž udržování lepšího kontaktu všech kol s povrchem, což vede k lepší trakci a stabilitě, zejména v nerovném terénu. Výkyvné nápravy ale mají složitější konstrukci a vyšší výrobní náklady. Také mají potenciálně nižší nosnost ve srovnání s pevnými nápravami (v závislosti na provedení). Samostatný pohyb kol může také usnadnit implementaci pokročilých systémů řízení. [53]

Řízení náprav

Dvoukolové řízení (předních kol): Je standardní systém, kde se k zatáčení traktoru využívá natočení předních kol kolem svislých čepů pomocí řídicího mechanismu (typicky hydraulického). Výhodou tohoto systému je jednoduchá a osvědčená konstrukce a technologie. Nevýhodou je větší poloměr otáčení, tudíž horší manévrovatelnost v omezeném prostoru a otáčení na konci řádku. Pro autonomní systémy vyžaduje přesné senzory úhlu natočení kol a sofistikované algoritmy pro sledování dráhy.

Čtyřkolové řízení umožňuje natočení i zadních kol, obvykle v opačném směru než přední kola při malých rychlostech pro zmenšení poloměru otáčení, nebo ve stejném směru při vyšších rychlostech pro zlepšení stability při změně směru. To výrazně zlepšuje manévrovatelnost, způsobuje menší poloměr otáčení a lepší sledování stopy při jízdě s připojenými nástroji. Čtyřkolové řízení dále umožňuje „krabí chod“, kdy se obě nápravy natáčejí stejným směrem, což umožňuje traktoru pohybovat se šikmo bez změny orientace.



Obr. 2-47 The axles of wheeled agricultural machinery [53]

Nezávislé řízení předních kol, kde každé přední kolo má svůj vlastní, nezávisle ovládaný řídicí mechanismus (elektrohydraulický nebo elektromechanický aktuátor). Úhel natočení každého kola je řízen samostatně na základě pokynů z centrálního autonomního řídicího systému, což umožňuje velmi malé poloměry otáčení a složité manévry, které nejsou s konvenčními systémy možné. Autonomní systém může jemně korigovat dráhu každým kolem zvlášť, kompenzovat prokluz a nerovnosti terénu s vysokou přesností. Lze implementovat optimalizované režimy pro různé operace (např. precizní setí v zatáčkách, minimalizace poškození půdy při otáčení). Nezávislé řízení může být integrováno se systémy aktivního odpružení a stabilizace pro zlepšení bezpečnosti a výkonu v extrémních podmínkách. Nevýhodou tohoto řešení jsou nároky na velmi složitý řídicí systém, na senzory a algoritmy, a představuje vyšší náklady na implementaci. Vyžaduje vysokou spolehlivost a přesnost řídicích prvků.

Odpružení: Potřeba odpružení náprav u výkonného autonomního traktoru je značná z několika důvodů. Odpružení zajišťuje lepší a konzistentnější kontakt kol s nerovným povrchem, což maximalizuje přenos hnací síly a snižuje riziko prokluzu. Pro autonomní systémy je stabilní trakce klíčová pro přesné provádění úkolů. Tlumení rázů a vibrací zlepšuje stabilitu traktoru, zejména při vyšších rychlostech nebo při práci s těžkými nesenými nástroji. To je důležité pro bezpečnost a pro přesnost autonomního řízení. Především však odpružení snižuje namáhání rámu, náprav, převodovky, hydraulických systémů a citlivé elektroniky řídicího systému, čímž prodlužuje jejich životnost a snižuje riziko poruch.

Výběr konkrétního typu odpružení (mechanické, hydraulické, pneumatické) bude záviset na kompromisu mezi náklady, složitostí, nosností a požadovanými vlastnostmi. Pro autonomní traktory se často zvažují pokročilejší systémy hydraulického nebo pneumatického odpružení, které umožňují aktivní nastavení charakteristiky tlumení a světlé výšky v závislosti na aktuálních podmínkách a požadavcích. [52; 53]



Obr. 2-48 Hydropneumatické odpružení přední nápravy [52]

Kola a pneumatiky

Výběr vhodných kol a pneumatik je pro zemědělský traktor klíčový a musí zohledňovat výkonnostní kategorii, zamýšlené pracovní operace, typ půdy a požadavky na minimalizaci zhutňování půdy.

Standardní kola: Jedná se o nejběžnější typ kol používaný u zemědělských traktorů. Jsou navržena pro univerzální použití na různých typech půd a při různých zemědělských pracích. Obvykle se skládají z disku kola a pneumatiky.

Dvojitá kola (duplex): Představují dvě kola namontovaná vedle sebe na jedné nápravě. Používají se pro zvětšení styčné plochy s půdou, snížení zhutňování půdy a zlepšení trakce, zejména při práci s těžkými nástroji nebo v měkkém terénu. Mohou být pevně spojena nebo odpojitelná pro flexibilnější použití.

Široká kola: Mají větší šířku běhounu než standardní kola a jsou navržena pro minimalizaci zhutňování půdy díky větší distribuci hmotnosti na větší plochu. Používají se často při speciálních operacích, jako je setí nebo sklizeň citlivých plodin.

Pásové systémy (pásy): Alternativou ke kolům jsou pásové systémy, které nabízejí největší styčnou plochu s půdou a nejnižší míru zhutňování. Poskytují vynikající trakci v náročném terénu, ale mohou být dražší a méně vhodné pro rychlou přepravu po silnici. [54; 55; 52]



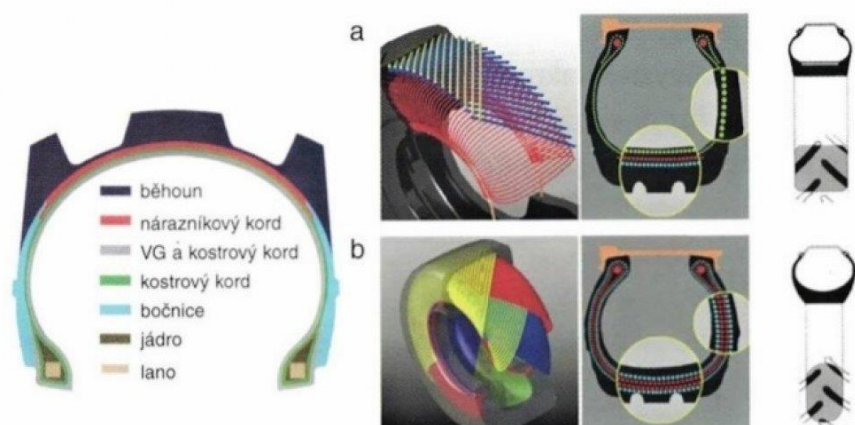
Obr. 2-49 Pásový systém značky Kubota [17]

Typy pneumatik:

Radiální pneumatiky: Jsou modernější a konstrukčně složitější než diagonální pneumatiky. Jejich kostra je tvořena radiálně uloženými kordovými vlákny, což zajišťuje lepší rozložení zatížení, menší valivý odpor, lepší trakci a menší zhutňování půdy. Mají také delší životnost a poskytují vyšší jízdní komfort. Pro výkonné traktory nad 150 kW jsou radiální pneumatiky standardem.

Diagonální pneumatiky: Mají kostru tvořenou kordovými vlákny uloženými diagonálně přes sebe. Jsou robustnější a odolnější proti bočnímu poškození, ale mají vyšší valivý odpor, více zhutňují půdu a poskytují nižší jízdní komfort ve srovnání s radiálními pneumatikami. U moderních výkonných traktorů se již téměř nepoužívají.

Pneumatiky s nízkým tlakem (VF/IF): Jedná se o speciální radiální pneumatiky, které umožňují provoz s velmi nízkým vnitřním tlakem. Díky tomu se zvětšuje styčná plocha a výrazně se snižuje zhutňování půdy při zachování dobré trakce a nosnosti. Označení VF (Very high Flexion) a IF (Improved Flexion) udávají míru ohybu bočnice, a tedy i schopnost pracovat s nízkým tlakem.



Obr. 2-50 Řez pláštěm pneumatiky a uspořádání kostry: a – radiální, b – diagonální [52]

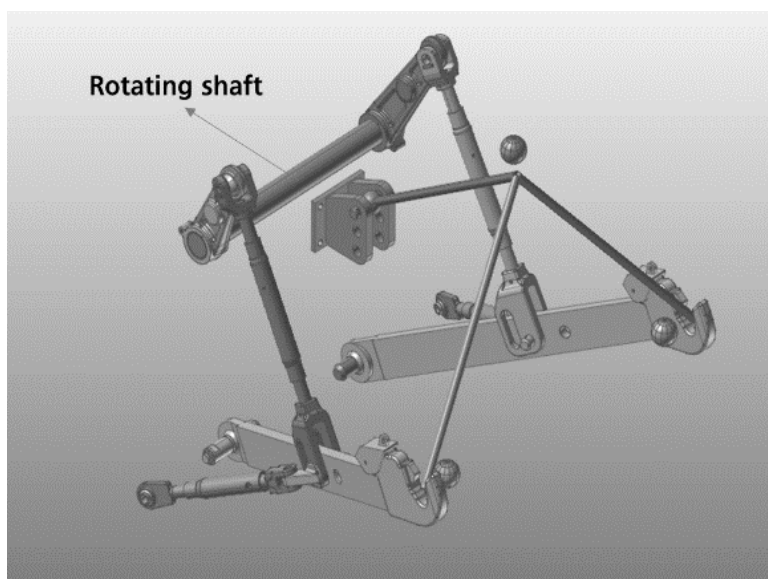
Trakce je schopnost pneumatik přenášet hnací sílu na půdu bez prokluzu. Ovlivňuje ji dezén pneumatiky (výška a tvar záběrových žeber), velikost styčné plochy a zatížení nápravy. Zhutňování půdy je stlačování půdních částic v důsledku tlaku vyvíjeného koly nebo pásy. Nadměrné zhutňování negativně ovlivňuje strukturu půdy, propustnost vody a vzduchu a růst rostlin. Volba správných kol a pneumatik s ohledem na velikost, typ (široké, dvojité, pásové), konstrukci (radiální, VF/IF) a provozní tlak je klíčová pro minimalizaci zhutňování. Rozměry kol a pneumatik (průměr ráfku, šířka pneumatiky, profilové číslo) musí odpovídat výkonnostní kategorii traktoru a předpokládanému zatížení. Nosnost pneumatik je udávána indexem nosnosti a musí být dostatečná pro maximální zatížení nápravy. [54; 55; 52]

Systemy pro připojení pracovních nástrojů

Zemědělské traktory jsou navrženy tak, aby mohly spolupracovat s širokou škálou pracovních nástrojů, které se připojují k traktoru pomocí standardizovaných systémů. Pro autonomní provoz je nezbytné, aby tyto připojovací systémy umožňovaly spolehlivé a bezpečné spojení a přenos mechanické, hydraulické nebo elektrické energie k pohonu nástrojů.

Tříbodový závěs je nejběžnějším systémem pro připojení nesených a polonesených zemědělských nástrojů k traktoru. Skládá se ze tří ramen (dvou spodních a jednoho horního), která vytvářejí trojúhelník. Hydraulické válce umožňují zvedání a spouštění nástroje a nastavení jeho pracovní hloubky nebo výšky. Existují různé kategorie tříbodového závěsu (0, I, II, III, IV) definované rozměry čepů a vzdálenostmi mezi rameny, které odpovídají různým velikostem a výkonnostním třídám traktorů a nástrojů. Traktor ve výkonnostní kategorii nad 150 kW bude typicky vybaven tříbodovým závěsem kategorie III nebo IV.

Pro autonomní provoz je žádoucí automatizace připojování nástrojů k tříbodovému závěsu. To může zahrnovat vodící systémy, senzory pro detekci polohy ramen nástroje a hydraulicky ovládané zámky čepů, které umožní traktoru samostatně najet k nástroji a zajistit připojení. [56]



Obr. 2-51 Rotating-shaft of three-point hitch [56]

Vývodová hřídel (PTO) je mechanický hřídel, který přenáší rotační pohyb z motoru traktoru na pohon rotačních zemědělských nástrojů (např. sekačky, lisy, postřikovače). Existují různé standardy otáček PTO (např. 540 ot/min, 1000 ot/min) a typů drážkování hřídele. Pro autonomní provoz je nutné zajistit bezpečné a automatické připojení hřídele PTO. To může vyžadovat robotické mechanismy pro zarovnání a zasunutí hřídele a automatické zajištění spojení.

Hydraulické systémy traktoru, které budou detailně probrány v následující části, poskytují hydraulickou energii pro pohon různých funkcí zemědělských nástrojů (např. sklápění přívěsů, ovládání pracovních válců u pluhů, pohon hydraulických motorů u secích strojů). Moderní traktory jsou vybaveny různým počtem externích hydraulických okruhů s rychlospojkami. Pro autonomní provoz je nutné vyvinout systémy pro automatické připojování a odpojování hydraulických hadic k nástrojům. To může zahrnovat robotické manipulátory a systémy pro identifikaci správného zapojení.

Některé moderní zemědělské nástroje vyžadují elektrické napájení pro ovládání elektronických systémů, senzorů nebo pohon elektrických motorů. **Standard ISOBUS** (ISO 11783) zajišťuje standardizovanou komunikaci a napájení mezi traktorem a připojenými nástroji. Pro autonomní provoz je důležité, aby řídicí systém traktoru dokázal automaticky navázat komunikaci s připojeným nástrojem prostřednictvím ISOBUS nebo jiného rozhraní. Do budoucna je předpoklad stále většího počtu senzorů na nástroji traktorů.

Pro usnadnění a urychlení připojování a odpojování pracovních nástrojů, což je zvláště důležité pro autonomní provoz, se stále častěji využívají systémy **quick hitch** (rychloupínací závěsy). Tyto mechanismy umožňují obsluze (nebo v autonomním případě robotickému systému) připojit nástroj k třibodovému závěsu bez nutnosti manuální manipulace s jednotlivými rameny a čepy.

Pro plně autonomní provoz zemědělského traktoru bude nezbytné vyvinout spolehlivé a bezpečné systémy pro automatické připojování a odpojování mechanických, hydraulických a elektrických rozhraní pracovních nástrojů. To bude klíčové pro flexibilitu a efektivitu autonomního provádění různých zemědělských úkolů. [56; 57; 58]



Obr. 2-52 Titan Category 2, 3 Point Black Quick Hitch [57]

Elektrohydraulické systémy

Elektrohydraulické systémy představují klíčovou technologii pro moderní zemědělské traktory, neboť kombinují výhody hydraulické síly a flexibility s přesností a možnostmi řízení elektronických systémů. V kontextu autonomního traktoru hrají zásadní roli při ovládání pracovních nástrojů, řízení pohybu a zajištění efektivního přenosu energie. Následující část se zaměří na principy fungování hydraulického okruhu či specifika elektrohydraulického řízení.

Hydraulický okruh: Srdcem hydraulického systému zemědělského traktoru jsou hydraulická čerpadla, která zajišťují tok kapaliny pod tlakem. Využívají se různé typy, jako jsou zubová, pístová a lamelová čerpadla, s různými výkony a systémy regulace pro přizpůsobení potřebám pracovních operací a minimalizaci energetických ztrát.

Hydraulické motory a válce slouží jako výkonné převodníky hydraulické energie na mechanickou. Motory se využívají pro rotační pohyb, zatímco válce zajišťují lineární pohyb pro ovládání pracovních nástrojů (zvedání, spouštění, natáčení). Směr a množství proudící kapaliny, a tím i rychlost a sílu hydraulických motorů a válců, jsou řízeny pomocí rozvaděčů a regulačních ventilů. Tyto komponenty umožňují precizní ovládání různých funkcí stroje a připojených nástrojů. Hydraulické akumulátory nacházejí uplatnění jako zásobníky energie pro tlumení rázů v hydraulickém systému, což přispívá k plynulejšímu provozu a ochraně komponent. V pokročilejších systémech mohou také sloužit k rekuperaci energie, například při brzdění pohybu hydraulických válců.



Obr. 2-53 The Essential Components of Your Tractor's Hydraulic System [58]

Elektrohydraulické řízení: Pro dosažení vysoké přesnosti a citlivosti ovládání hydraulických systémů, nezbytných pro autonomní provoz a moderní zemědělské techniky, se využívá elektrohydraulické řízení. Proporcionální a servoventily umožňují plynulé a přesné řízení průtoku a tlaku hydraulické kapaliny v závislosti na elektrickém signálu. To je klíčové pro jemné ovládání pracovních nástrojů a přesné řízení pohybu traktoru. Elektronické řídicí jednotky (ECU) pro hydraulické systémy sbírají data ze senzorů (tlak, průtok, poloha) a na základě komplexních algoritmů řídí činnost ventilů. Integrace ECU s centrálním autonomním řídicím systémem traktoru je zásadní pro automatické ovládání všech hydraulických funkcí v souladu vykonávanou pracovní činností. [58]

Závěr technické analýzy

Tato technická analýza se zaměřila na klíčové technologické aspekty návrhu autonomního zemědělského traktoru s důrazem na posouzení různých pohonných systémů a autonomních funkcí. Zvláštní pozornost byla věnována vodíkovému pohonu s využitím PEM palivových článků a elektromotorů, který byl identifikován jako perspektivní řešení pro dosažení udržitelného a efektivního provozu v motivační analýze.

Analýza zahrnovala přehled stávajících technologií, jako je tradiční diesellový pohon, elektrický (bateriový) pohon a hybridní systémy, s ohledem na jejich výhody, nevýhody a vhodnost pro výkonnostní kategorii. Detailněji byly prozkoumány principy fungování a charakteristiky PEM palivových článků a elektromotorů, jakožto hlavních komponent navrhovaného pohonu. Dále byla analyzována problematika skladování vodíku, konstrukce podvozku a integrace pracovních nástrojů s ohledem na požadavky autonomního provozu. V neposlední řadě byly popsány elektrohydraulické systémy, které budou zajišťovat ovládání traktoru a připojených nástrojů.

Tato technická analýza poskytla komplexní přehled o širokém spektru technologií, které jsou relevantní pro vývoj autonomního traktoru na alternativní pohon. Byly identifikovány klíčové výzvy a potenciální řešení v každé oblasti, což poslouží jako pevný základ pro další fáze návrhu a vývoje tohoto inovativního zemědělského stroje.

2.5 Identifikace příležitostí

Zemědělství se nachází na prahu významné transformace, kde narůstající tlak na efektivitu, produktivitu a udržitelnost otevírá široké pole pro inovativní technologie. Autonomní traktory představují v tomto kontextu revoluční řešení s potenciálem optimalizovat zemědělské postupy a snížit závislost na stále nedostatečnější pracovní síle. Zatímco současné vyspělé navigační systémy víceméně přenesly roli farmáře z aktivního řízení na kontrolu, plná autonomie slibuje eliminaci potřeby lidské přítomnosti v traktoru při mnoha klíčových operacích.

V evropském zemědělském prostředí zůstává otázkou autonomie přepravy po veřejných komunikacích výzvou, avšak s postupujícím vývojem v silniční autonomii lze předpokládat i řešení pro zemědělskou techniku. Nicméně, nejvýznamnější příležitosti pro autonomní traktory se rýsují na rozsáhlých zemědělských plochách o desítkách až stovkách hektarů. Zde plně vynikne efektivita nepřetržité práce, včetně možnosti operací 24/7 bez nutnosti střídání obsluhy. To otevírá nové možnosti v plánování a provádění zemědělských úkonů s maximální časovou a nákladovou efektivitou.

Kromě samotné automatizace řízení se nabízí unikátní příležitost pro integraci pokročilých technologií přímo do autonomních traktorů. Využití sofistikovaných databází a senzorů pro detailní monitorování jednotlivých rostlin umožní cílené zásahy, jako jsou selektivní aplikace hnojiv a pesticidů, nebo precizní laserová eliminace plevelů a nemocných rostlin. Tento přístup precizního zemědělství nejenže zvyšuje výnosy a snižuje náklady na vstupy, ale také minimalizuje negativní dopady na životní prostředí.

Největší potenciál spatřuji ve spojení autonomního provozu s vodíkovým pohonem a agrovoltaikou. Instalace solárních panelů na zemědělských pozemcích může poskytnout dvojí výhodu, stínění pro plodiny citlivé na přímé slunce a zároveň zdroj čisté energie pro lokální výrobu vodíku skrze elektrolýzu vody přímo na farmě. Tento uzavřený cyklus výroby a spotřeby energie eliminuje závislost na fosilních palivech a přispívá k uhlíkově neutrálnímu zemědělství. Autonomní traktor na vodíkový pohon by mohl být nejen vysoce efektivní a nezávislý na lidské obsluze, ale také environmentálně šetrný a energeticky soběstačný. Tato kombinace představuje klíčovou příležitost pro transformaci zemědělských postupů směrem k větší udržitelnosti a ekonomické životaschopnosti.

Z hlediska průmyslového designu představuje koncept autonomního traktoru na vodíkový pohon jedinečnou příležitost pro inovaci a redefinici vzhledu zemědělské techniky. Absence tradiční kabiny řidiče otevírá prostor pro nové, funkčně orientované tvary, které mohou optimalizovat tvarování karoserie, chlazení komponent nebo integraci vodíkové nádrže jako dominantního designového prvku, jak je to plánováno řešením této diplomové práce. Designéři mohou prozkoumat modulární konstrukce umožňující snadnou adaptaci pro různé úkoly a implementovat nové materiály a povrchové úpravy zvyšující odolnost a efektivitu. Estetika stroje se může zaměřit na zdůraznění jeho technologické vyspělosti a ekologického charakteru, čímž vznikne nová vizuální identita moderního zemědělství. Situaci výrazně ukazuje Designéřská analýza konceptů, kde můžeme pozorovat řadu velmi odlišných přístupů k řešení autonomních zemědělských traktorů budoucnosti.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Tato kapitola slouží k jasnému vymezení problémů a následně k popsání cílů z nich vyplývajících. Zároveň se okrajově věnuje klasifikaci produktu, popisu a potřebám zákazníka či uživatele. Dále se zde nachází tabulka cílů, omezení, funkcí a prostředků.

3.1 Vymezení problému

Jelikož se tato práce zabývá návrhem konceptu autonomního traktoru z designového hlediska, je na prvním místě problematika celkového vzhledu. Ať už se jedná o tvarové provázání, dynamiku tvarování či ergonomické aspekty, je nutné přemýšlet, jak může situace na trhu s traktory vypadat za desítky let a přizpůsobit tomu celkový design. Návrh by měl vizuálně odpovídat zvolenému pohonu a psychologicky mírnit šok okolí, který může

K smysluplnému návrhu potřeba znát vnitřní uspořádání a celkově technickou otázku věci. Jak již bylo zmíněno, jednou z největších výzev, a tedy problémem, je zvolení alternativního pohonu paliva pro takto těžký stoj, který má zůstat na poli klidně několik dní. U použití baterií nastává problém s váhou, která je u traktorů klíčová, a také s kapacitou a délkou dobíjení. U studií a testů, které již proběhly, jako například jedna ve švédsku, bylo použití baterií pro traktor střední velikosti pozitivně prokázáno. [43]

Většina konceptů velkých autonomních traktorů počítá s pohonem na baterie, ale nedisponují žádnými dlouhodobými testy, spíše se zdá, že počítají s vyšší kapacitou baterií v budoucnu. Nastává otázka, kterou většina studií bohužel neřeší, a to je samotná výroba baterií, která je mnohdy tak ekologicky náročná, že použití vyjde při výrobě z ekologického hlediska na stejno, jako emise vzniklé při používání tradičního spalovacího motoru po celou dobu jeho životnosti. Tento problém vzniká také u nynějšího transportního průmyslu, kde je opět tento aspekt potlačován, nehledě na další problémy s recyklací a získávání vzácných prvků zpět do výrobního procesu. Je sice pravda, že vývoj baterií jde raketově dopředu, je možné předpokládat značně lepší vlastnosti, ale stále se v budoucích letech budou baterie životností jen těžko vyrovnávat spalovacím motorům a materiály k výrobě budou jejich udržitelnost zásadně snižovat.

Jako alternativa k čistě elektrickému pohonu se nabízí již léta probíraná tematika vodíku, jako pohonu budoucnosti. Ekologický dopad vodíkového pohonu v nynější době převážně závisí na jeho výrobě, kdy dnes je z větší poloviny získáván ze zemního plynu, konkrétně methanu, u čehož ale vzniká množství odpadu, který lze poté jen těžko využít. Problém vodíkového pohonu je převážně jeho výroba a distribuce k farmě. Tento typ pohonu však z technického hlediska nezní tak přívětivě, jako hlediska ekologického, u spalovacího motoru na vodík čelí konstruktéři stále velkým výzvám z pohledu životnosti, zatímco u palivových článků neboli principu reverzní elektrolýzy, dosahujeme účinnosti sice vyšší než u běžných spalovacích motorů, ale ne výrazně.

Dalšími, ale ne méně důležitými, problémy jsou otázky, zda implementovat kabinu řidiče, která na první pohled ztrácí u autonomního traktoru smysl, ale na druhou stranu může sloužit jako možnost kontroly farmáře při zavádění stroje, případně kontrole jeho práce. V Evropské oblasti se také často setkáváme s případem, kdy se traktor musí na pole z farmy dostat přes klasické silnice, kde by byl řidič také výhodou. Zvláště tato problematika kabiny řidiče zásadně ovlivňuje celkový vzhled traktoru. Další problém, který výrazně ovlivní vzhledové působení návrhu je, zda vybavit traktor pásy či koly nebo kde umístit senzory a kamery pro nejlepší výsledky orientace v prostoru a detekci překážek. Tyto rozhodnutí, které musí být založeny na správně provedené rešerši, výrazně ovlivní fungování celého stroje, ale hlavně jeho vzhled, který je hlavním tématem této práce.

3.1.1 Název produktu a jeho klasifikace

Tématem této diplomové práce je design autonomního zemědělského traktoru na alternativní pohon. Tento traktor je určen pro nasazení v precizním zemědělství, kde je kladen důraz na efektivní a automatizované obdělávání půdy. Autonomní traktor spadá do kategorie těžké zemědělské techniky s výkonem nad 150 kW, přičemž splňuje požadavky na vysokou odolnost, všestrannost a autonomní provoz bez nutnosti lidské obsluhy.

Produkt je průmyslový výrobek a lze ho zařadit do kategorie zemědělských strojů s pokročilou technologií a specifickým využitím, přičemž autonomní traktor představuje nosič s variabilním využitím pro různé druhy nástrojů. Z hlediska jeho pohonu se jedná o stroj využívající alternativní zdroje energie, což výrazně přispívá k ekologické šetrnosti a dlouhodobé udržitelnosti.

Autonomní traktory jsou zařazeny mezi velké stroje s hmotností do 10 000 kg a s rozměry do 3 000 × 3 500 × 5 000 mm (šířka × výška × délka). Traktor je určen k opakovanému použití na farmách, kde díky své schopnosti samostatně vykonávat zemědělské operace napomáhá snižovat pracovní zátěž a zároveň zvyšuje produktivitu. Z hlediska životnosti lze očekávat, že jeho provozní životnost bude přesahovat 15 let při správné údržbě.

3.1.2 Specifikace zákazníka

Zákazníka u této diplomové práce chápeme jako člověka, který rozhoduje o tom, jaké stroje na farmu pořídit. Často to bývá přímo majitel farmy, ale může to být také pověřená osoba, která funguje jako manažer farmy. Pro toho bude klíčová ekonomická stránka věci. Je nutné zajistit co nejmenší poruchovost, která by v opačném případě přinesla další náklady spojené s opravou. K tomuto se váže také možnost oprav mechanických součástí přímo na farmě, ty by měly být navrženy tak, aby mohl být stroj opraven přímo zaměstnanci farmy bez velké specializace. Tyto převážně ekonomické aspekty musí přesvědčit zákazníka o investici do tohoto nového a drahého řešení. U zákazníka ze zemědělského sektoru se předpokládá pozitivní vztah k přírodě, který může přispět k výběru tohoto ekologicky šetrnějšího řešení.

3.1.3 Specifikace uživatele

Uživatel může být buď také zákazník nebo zaměstnanec farmy, který má na starost zadávání práce na farmě, dále například obsluha, která bude řešit provozní situace. Ovládaní a zadávání práce stroje musí být co nejjednodušší a intuitivní. Výměna nástrojů, výměna baterií či palivových nádrží nebo mazání stroje musí být jednoduše přístupné a co nejvíce automatizované. Pokud bude stroj příliš složitý a bude ho někdo muset neustále kontrolovat, bude poté úspora času, která je hlavní výhodou autonomního traktoru ztracena a pouze se problém přesune z kabiny do pohodlnějšího prostředí.

3.1.4 Vymezení atributů a cílů produktu

V této podkapitole se nachází tabulka dávající přehled atributů, cílů, omezení a funkcí.

Charakteristika	Cíle	Omezení	Funkce	Prostředky
Dynamický a vizuálně atraktivní design	✓	✓		✓
Tvarování zohledňující pohon	✓	✓		✓
Optimalizace velikosti nádrže		✓		✓
Zohlednění ekologického dopadu	✓	✓		
Ergonomie ovládacích prvků		✓		✓
Integrace senzorů a kamer	✓			✓
Možnost autonomního řízení bez kabiny	✓		✓	
Design s ohledem na kolový podvozek	✓	✓		
Jednoduchá opravitelnost produktu	✓	✓	✓	
Dlouhá životnost stroje	✓	✓		
Bezpečný provoz (detekce překážek, řízení trasy)	✓		✓	
Kompatibilita s existujícími zemědělskými nástroji	✓	✓	✓	✓
Redukce celkové hmotnosti traktoru		✓		✓
Přední i zadní připojení nástroje	✓	✓	✓	
Možnost provozu v noci	✓	✓	✓	
LED osvětlení okolo traktoru	✓			✓

Tab. 3-1 Vymezení atributů a cílů produktu

3.2 Cíl práce

Tato kapitola poskytuje jasný směr pro vývoj návrhu autonomního zemědělského traktoru, který bude esteticky, funkčně a technologicky odpovídat výzvam současného, ale hlavně budoucího zemědělství.

3.2.1 Globální cíl práce

Cílem této diplomové práce je navrhnout inovativní design autonomního traktoru na alternativní pohon, který splňuje vysoké nároky na estetiku, funkčnost a udržitelnost, a zároveň reflektuje výzvy spojené s přechodem na autonomní technologie v zemědělství. Tento návrh by měl vizuálně odpovídat zvolenému typu alternativního pohonu, psychologicky zmírňovat šok z přechodu na plně autonomní zemědělskou techniku a zajistit optimální funkci traktoru v reálných podmínkách s důrazem na udržitelnost.

3.2.2 Dílčí cíle diplomové práce

Tvarování traktoru v souladu s vodíkovým pohonem

- Navrhnout esteticky provázaný tvar traktoru, který odpovídá specifickým požadavkům vodíkového pohonu.
- Vizualizovat ekologické výhody vodíkového pohonu a snížit případné obavy uživatelů spojené s přechodem na tuto technologii.
- Optimalizovat velikost a umístění vodíkové nádrže s ohledem na design a spotřebu.

Zpracování autonomního řízení

- Navrhnout integrovaný systém senzorů a kamer pro přesnou orientaci v terénu a detekci překážek, s důrazem na optimální umístění a funkčnost, při zachování uceleného vizuálu.
- Optimalizovat systém pro noční provoz, včetně návrhu LED osvětlení po celém obvodu traktoru, aby byl zajištěn bezpečný pohyb a viditelnost i v tmavých podmínkách.

Optimalizace vzhledu kolového podvozku

- Přizpůsobit design traktoru zvolenému kolovému podvozku a jeho specifikacím.

Kompatibilita a flexibilita

- Zajistit kompatibilitu traktoru s existujícími zemědělskými nástroji, aby mohl být využíván pro různé druhy prací na poli.
- Navrhnout konstrukci, která umožní připojení nástrojů zepředu i zezadu, čímž se zvýší flexibilita použití traktoru.

Minimalizace ekologické zátěže

- Analyzovat řešení výroby vodíku přímo na farmě skrz obnovitelné zdroje energie, a tím zajistit lokální energetickou soběstačnost za produkce nulových emisí.
- Zohlednit ekologický dopad celého traktoru, včetně jeho výroby a provozu.
- Navrhnout řešení, které podporuje dlouhou životnost stroje, nízkou poruchovost a snadnou opravitelnost přímo na farmě.

Ergonomické aspekty a optimalizace funkce

- Zajistit, aby údržba traktoru, včetně případné manuální výměny nástrojů a doplňování vodíkové nádrže, byla přístupná a efektivní.
- Umožnit přístup k doplňování či výměně provozních kapalin či k diagnostice řídicí jednotky.

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

Tato kapitola se věnuje ujasnění cílů z minulé kapitoly pomocí diagramu stromu cílů a omezení, dále detailní technické analýze, kde budou popsány zvolené systémy a komponenty, které budou rozděleny na základě jejich umístění vně či uvnitř stroje. Grafické znázornění fungování traktoru dle metody Glassbox, ale především se tato kapitola bude věnovat variantním návrhům, ze kterých bude vybrán návrh předběžný.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

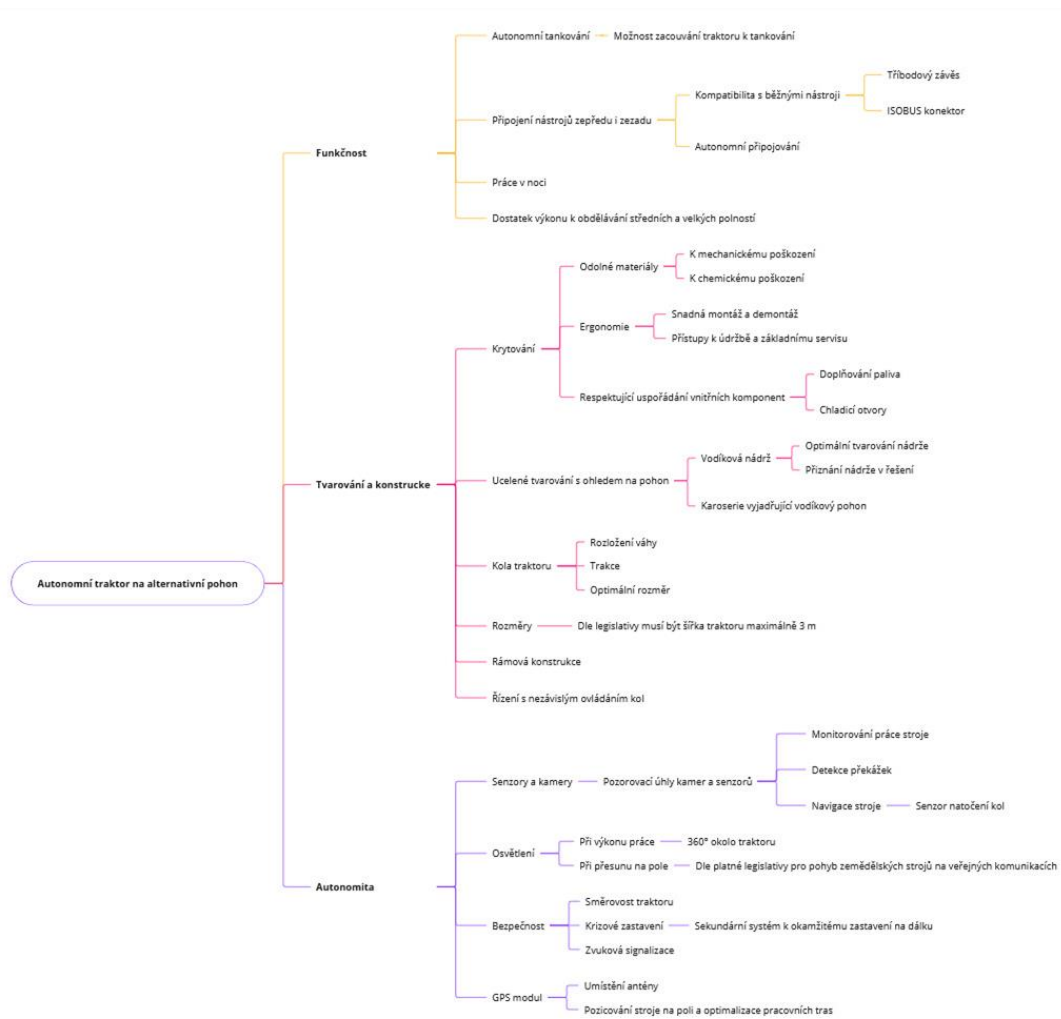
Pro efektivní naplnění hlavních cílů projektu autonomního traktoru na vodíkový pohon bylo nezbytné provést důkladnou analýzu a identifikaci klíčových parametrů, které ovlivňují návrh a realizaci. Za tímto účelem byl vytvořen strom cílů a omezení, který přehledně zobrazuje vzájemné vztahy a provázanost jednotlivých oblastí. Tento nástroj slouží k systematickému pochopení komplexity návrhu a zároveň usnadňuje rozhodování během vývoje. Cíle a omezení byly rozděleny do tří hlavních kategorií: Autonomie, Tvarování a konstrukce a Funkčnost. Každá z těchto kategorií zahrnuje specifické požadavky, které reflektují technické, ergonomické i estetické nároky produktu.

Klíčovou vlastností navrhovaného traktoru je jeho plná autonomnost. To zahrnuje integraci pokročilých senzorů, kamer, GPS modulů a řídicích algoritmů, které umožňují bezpečnou a přesnou navigaci v různorodém terénu. Součástí této kategorie je i zajištění schopnosti detekce a vyhýbání se překážkám, optimalizace pracovních tras a přizpůsobení různým zemědělským úkolům. Z hlediska návrhu je nutné zajistit optimální výhledové úhly.

Tvarování a konstrukce se zaměřuje na designové a konstrukční aspekty traktoru. Hlavním cílem je vytvořit esteticky provázaný tvar traktoru, který odpovídá specifickým požadavkům vodíkového pohonu, a tím splnit požadavky na estetiku a funkčnost. Zohledněny jsou přitom i technické limity, jako je velikost vodíkového článku, uspořádání podvozku či potřeba optimalizace hmotnosti. Dalším důležitým prvkem je ergonomie, a to jak z hlediska servisní přístupnosti, tak připojení zemědělských nástrojů.

Funkčnost traktoru zahrnuje schopnost efektivního vykonávání různých zemědělských činností, jako je například orba, setí nebo sklizeň. Hlavním cílem je zajistit kompatibilitu s širokým spektrem nástrojů a jejich snadnému připojení, včetně možnosti práce v noci díky implementaci LED osvětlovacích prvkům.

Grafické znázornění stromu cílů a omezení poskytuje ucelený pohled na všechny aspekty návrhu, umožňuje identifikovat možné konflikty a přispívá k nalezení optimálních řešení.

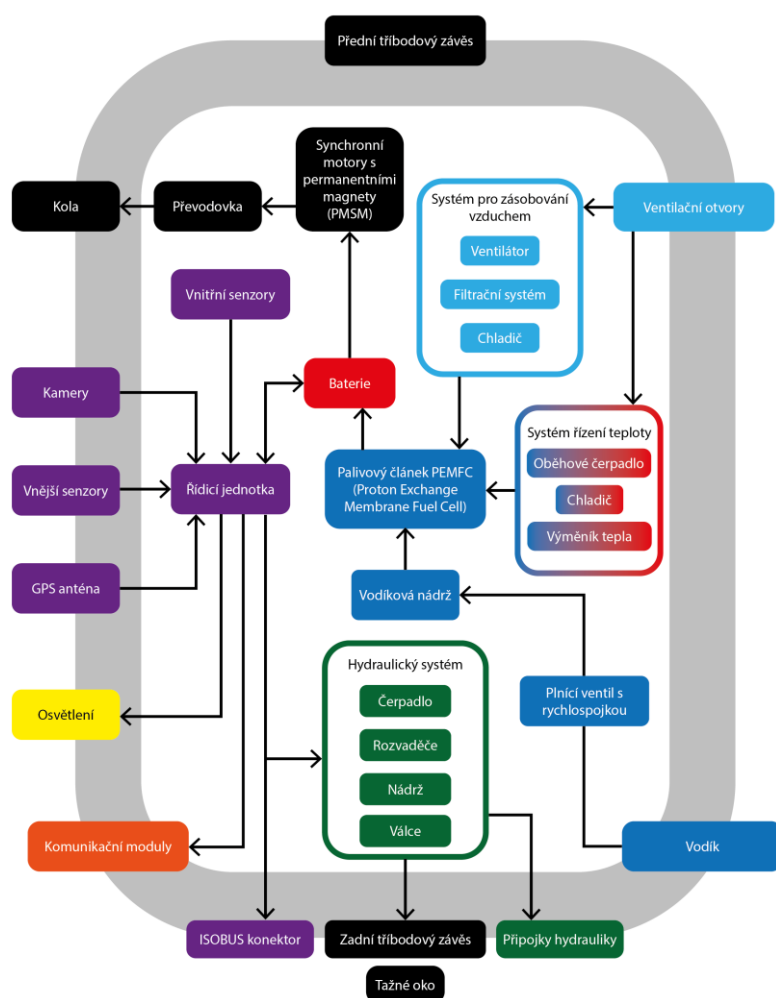


Obr. 4-1 Strom cílů, omezení a funkcí

4.2 Technická funkční analýza

Technická analýza autonomního traktoru je klíčovým krokem v procesu návrhu, který umožňuje detailní porozumění všech vnitřních a vnějších komponent. Cílem této analýzy je nejen identifikovat a popsat jednotlivé součásti, ale také pochopit jejich vzájemnou provázanost a vliv na celkovou funkčnost traktoru. Pro dosažení tohoto přehledu byl využit metodický přístup nazývaný glassbox, který prostřednictvím grafického znázornění umožňuje vizuální modelování vztahů mezi komponentami. Tento přístup poskytuje jasný přehled o tom, jak jednotlivé části spolupracují a jaké úkoly plní, což je nezbytné pro efektivní návrh a optimalizaci autonomního traktoru. Všechny komponenty, od klíčových vnitřních systémů až po vnější komponenty, jsou zahrnuty do tohoto modelu.

4.2.1 GLASSBOX



Obr. 4-2 GLASSBOX – Vnitřní schéma komponent

4.2.2 Specifikace vnitřních komponent

V této kapitole se zaměřujeme na specifikaci vnitřních komponent autonomního traktoru na vodíkový pohon. Každá komponenta je stručně rozebrána nejen z hlediska své funkce, ale také z hlediska předběžných rozměrů, odhadované hmotnosti a vzájemných vztahů, které jsou nezbytné pro efektivní integraci do celkového systému traktoru.

Palivový článek PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Generuje elektrickou energii z chemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem za vzniku vody, jako jediného odpadního materiálu. Je to základní zdroj energie pro pohon elektromotoru a dalších systémů. Pro autonomní traktor s výkonem 200 kW by článek měl produkovat dostatek energie pro stabilní provoz. U PEMFC počítejte s účinností kolem 50–60 %, do budoucna se však očekává zvýšení účinnosti.

Palivový článek s výkonem 200 kW by měl rozměry kolem $80 \times 60 \times 30$ cm, což odpovídá objemu přibližně 150 litrů. Váha článku by se pohybovala kolem 200 kg.

PEM palivové články dosahují plného výkonu rychle, což je klíčové pro mobilní aplikace jako traktor. Tento typ článku je relativně lehký a kompaktní, což umožňuje lepší integraci do menších prostorů traktoru. PEMFC zvládne dobře reagovat na rychlé změny výkonu, což je výhodné při práci s různými nástroji nebo měnícími se podmínkami v terénu. Ačkoliv PEMFC vyžaduje čistý vodík, dnešní technologie už umožňuje efektivní čištění a skladování vodíku i v terénních podmínkách. [47]

Vodíková nádrž

Uchovává stlačený vodík jako palivo pro PEMFC. Tradičně je tvarována jako válec s plně zaoblenými hranami podstav z důvodu odolávání tlaku, který je u tohoto řešení skladování 700 barů. Alternativně lze využít kulovou nádrž, která ale bude složitější na výrobu.

Systém pro zásobování vzduchem

Zajišťuje přísun kyslíku potřebného pro reakci v palivovém článku. Zahrnuje ventilátor nebo kompresor pro nasávání vzduchu, chladič a filtrační systém. Kompresor a chladič mohou mít velikost přibližně $30 \times 30 \times 20$ cm, což by mohlo odpovídat přibližně 20 litrům objemu.

Systém řízení teploty

Udržuje optimální teplotní rozsah palivového článku a dalších komponent. Zahrnuje chladič, výměník tepla a oběhové čerpadlo. Chladič a výměník tepla mohou mít dohromady velikost kolem $50 \times 40 \times 15$ cm, což odpovídá objemu kolem 30 litrů.

Vyrovnávací baterie

Ukládá přebytečnou energii a vyrovnává krátkodobé výkyvy v potřebě výkonu. Baterie s kapacitou kolem 10 kWh je vhodná pro stabilní chod traktoru a zálohování výkonu. Baterie o této kapacitě by mohla mít rozměry přibližně $50 \times 40 \times 20$ cm (40–50 litrů) a vážila by kolem 100 kg.

Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM)

Každý motor bude muset být schopen dodávat dostatečný výkon pro zajištění celkového cílového výkonu traktoru 200 kW. Optimální hodnoty se pohybují mezi 30–40 kW na motor, což závisí na zatížení a typu aplikace. Traktor s PMSM motory může využívat napětí od 300 V do 800 V. Pro efektivní řízení a provoz motorů je zapotřebí použití vysokonapěťového systému. Proud motoru bude záviset na zatížení a rychlosti otáčení. Pro motory s výkonem 30–40 kW může proud dosahovat až 150–200 A. Průměr rotoru je obvykle mezi 150–250 mm a délka motoru záleží na použitých magnetech a druhu chlazení. Odhadem může být mezi 200–400 mm. Každý motor bude vážit přibližně 20–30 kg, což se může měnit v závislosti na použitých materiálech a konstrukci. Rychlost otáčení motorů bude typicky mezi 500 až 3000 otáčkami za minutu, v závislosti na typu operace. Bude využito aktivního chlazení, které je nutné pro efektivní provoz motorů, zejména při vysokých výkonech. Zvoleno bylo olejové chlazení, které umožňuje účinné odvádění tepla.

Synchronní motory s permanentními magnety dosahují vyšších účinností (až 98 %) ve srovnání s asynchronními motory a díky vysokému točivému momentu a rychlé odezvě jsou PMSM motory ideální pro přesné řízení rychlosti a polohy. Dále menší tření v motoru snižuje potřebu údržby a jsou kompaktnější a lehčí, což je výhodné pro instalaci do každého kola traktoru.

Převodový mechanismus

Přízpůsobuje točivý moment elektromotorů potřebám pohonu kol. Obsahuje redukční převodovku a nachází se mezi elektromotorem a diskem v každém kole. Tudiž umožní dostatek točivého momentu pro konkrétní pracovní úkol a zajišťuje efektivní přenos výkonu a krouticího momentu na kola, což je klíčové pro pohyb v náročném terénu a udržení optimální trakce při různých pracovních režimech. Tento systém umožní traktoru vykonávat širokou škálu úkolů, od orby po setí a přepravu, bez ohledu na podmínky terénu.

Hydraulický systém

Pohání a ovládá pohyblivé části traktoru a připojené nástroje. Hydraulický systém traktoru bude poháněn výkonným čerpadlem, které zajišťuje vysoký průtok oleje při různých tlacích. To umožní optimální výkon při práci s hydraulickými válci a připojenými nástroji, jako jsou radlice, zvedací zařízení nebo sypače. Čerpadlo je navrženo pro vysokou účinnost, což minimalizuje ztráty energie.

Traktor bude vybaven několika hydraulickými rozvaděči, které umožní řízení a distribuci tlaku a průtoku oleje mezi různými částmi traktoru. Tyto rozvaděče jsou klíčové pro ovládání funkce jako jsou zvedání ramen, připojení a odpojení nástrojů a nastavování pracovních výšek. Hydraulické rozvaděče budou kompatibilní s různými typy nářadí a nástrojů.

V traktorovém hydraulickém systému budou zahrnuty různé hydraulické válce, které přeměňují tlak oleje na lineární pohyb. Tyto válce budou použity pro manipulaci s rameny, zvedacími zařízeními, nebo jinými pohyblivými částmi traktoru, které jsou nezbytné pro precizní práci na farmě. Hydraulické válce budou vybaveny senzory pro monitorování jejich polohy a síly, což umožní přesné řízení operací. Systém bude zahrnovat dostatečně dimenzovanou olejovou nádrž, která bude sloužit k ukládání a chlazení hydraulického oleje. Chlazení bude zajišťovat speciální chladič oleje, který udržuje optimální teplotu oleje, čímž se snižuje riziko přehřátí a ztrát výkonu.

Systém elektroniky a senzorů

Monitoruje a řídí všechny operace, traktor bude vybaven pokročilou řídicí jednotkou (ECU – Electronic Control Unit), která integruje data ze všech senzorů a systémů stroje. Tato jednotka je mozkiem traktoru, který zpracovává data a řídí výkon motoru, řízení, hydrauliku, sensoriku a komunikaci. ECU bude schopna přijímat a odesílat data z centrálního řídicího systému traktoru.

Senzory tlaku: Senzory tlaku budou umístěny na různých částech traktoru, jako jsou pneumatiky, hydraulické válce a v palivovém systému, aby monitorovaly tlak a varovaly před přetížením nebo nízkým tlakem. Tato data jsou klíčová pro prevenci poruch a optimalizaci výkonu.

Senzory úhlu natočení řídicích kol: Senzory pro monitorování aktuálního úhlu natočení každého kola, které poskytují zpětnou vazbu řídicí jednotce pro korekci případných odchylek a zajistit přesné zatáčení i v náročném terénu.

Senzory teploty: Teplotní senzory budou monitorovat teplotu palivového článku PEMFC, motorů, převodovek, hydraulického oleje a dalších kritických částí systému. Umožní okamžitou detekci anomálií, jako jsou nadměrné zahřívání nebo chlazení, což je důležité pro správnou funkci a dlouhou životnost komponent.

Komunikační moduly: Traktor bude vybaven moduly pro bezdrátovou komunikaci (např. 4G/5G, Wi-Fi, rádio), které umožní vzdálený monitoring, diagnostiku a aktualizace systému v reálném čase. To je klíčové pro údržbu a podporu ze vzdálených míst, což zajišťuje, že traktor bude vždy aktuální a připravený na všechny pracovní úkoly.

4.2.3 Specifikace vnějších prvků

Tato kapitola se věnuje specifikaci vnějších komponent a prvků autonomního traktoru, které jsou nezbytné pro jeho vykonávání práce, plnohodnotné fungování v terénu, odolnosti vůči vnějším vlivům, navigaci či ergonomii. Důraz je kladen na jejich umístění, rozměry a funkce, které přispívají k bezpečnosti, efektivitě a přesnosti provozu traktoru.

Podvozek a kola

Traktor bude vybaven kolovým podvozkem, který je navržen pro efektivní pohyb v náročném terénu. Zároveň umožňuje traktoru oproti pásovému podvozku vjezd na veřejné komunikace, který je pro zemědělce v naší oblasti klíčový. Nezávislé řízení předních kol přináší výrazné zlepšení přesnosti a efektivity pohybu traktoru. Robustní kloubový mechanismus umožňuje spolehlivé mechanické natáčení kola, přičemž jeho konstrukce minimalizuje opotřebení a zaručuje dlouhou životnost i při práci v blátivém či prašném prostředí. Tento systém nejen zlepšuje manévrovatelnost traktoru, ale také chrání půdu před zbytečným poškozením, což je klíčové pro udržitelné zemědělství.

Přední a zadní závěs (třibodový závěs)

Slouží k připojení zemědělských nástrojů a je standardním rozhraním pro kompatibilitu s většinou aktuálních i starších nástrojů (např. pluh, sečí stroje). Pro autonomní připojování nástrojů bude při práci vybaven rychloupínacím (quick hitch) systémem, který bude doplněn o nosič kombinovaného adaptéru k připojení ostatních funkčních systémů.

Přípojky hydrauliky

Poskytují hydraulický tlak a průtok pro ovládání připojených nástrojů. Obvykle zahrnují několik portů pro vysokotlaké hydraulické hadice. K zajištění autonomního připojení bude zapotřebí senzorů ke správnému navedení a spojení hydraulických okruhů.

Elektrické přípojky ISOBUS

Slouží k přenosu elektrické energie a dat mezi traktorem a připojenými nástroji. Zahrnuje zásuvky pro napájení a datovou komunikaci, v nynější době se převážně používá normovaný ISOBUS standart pro kompatibilitu s většinou nástrojů.

Systém osvětlení a viditelnosti

Zajišťuje viditelnost traktoru a pracovní oblasti za snížených světelných podmínek. Přední a zadní LED světla, pracovní reflektory, signalizační osvětlení. U návrhu je nutné počítat jak s využitím osvětlení při přesunu na pole po veřejných komunikacích, tak s dostatečným osvětlením pro práci v noci. Pro autonomní orientaci je pracováno s pokrytím všech směrů.

Kamera a senzory na vnější straně

Zajišťují orientaci traktoru v terénu, detekci překážek a monitorování nástrojů. Kamery, radarové a ultrazvukové senzory, LiDAR, antény GNSS jsou zapotřebí k celkovému fungování autonomního stroje.

Pro přesné řízení polohy a navigace v terénu je traktor vybaven systémem GNSS s implementací RTK. Což umožní přesné mapování pracovních ploch, sledování polohy traktoru a řízení operačních postupů.

Chladicí systém (ventilace a mřížky)

Traktor bude vybaven mřížkami a ventilátory pro odvod tepla z motorů, palivového článku či hydraulických systémů. Design traktoru bude zahrnovat strategické umístění mřížek a chladičů na kapotě, na bocích traktoru či v masce, aby bylo dosaženo optimálního proudění vzduchu a minimalizovaly se rizika přehřátí.

Připojení k tažným zařízením

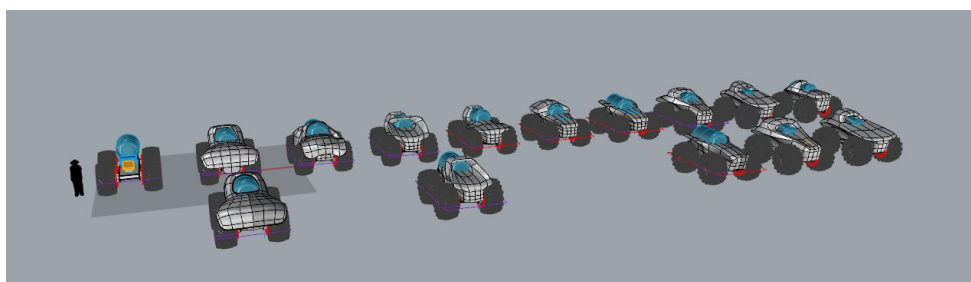
Zadní tažné zařízení traktoru umožňuje bezpečné a efektivní tažení přívěsů a nářadí. Konstrukce traktoru bude zahrnovat pevný závěs typu oko pro snadné připojení a odpojení, který bude součástí rychloupínacího systému tříbodového závěsu. Design se zaměří na robustnost a odolnost těchto komponentů, aby traktor mohl bezpečně provádět těžké pracovní úkoly při přepravě nákladu nebo používání různých zemědělských zařízení.

Palivové plnicí porty

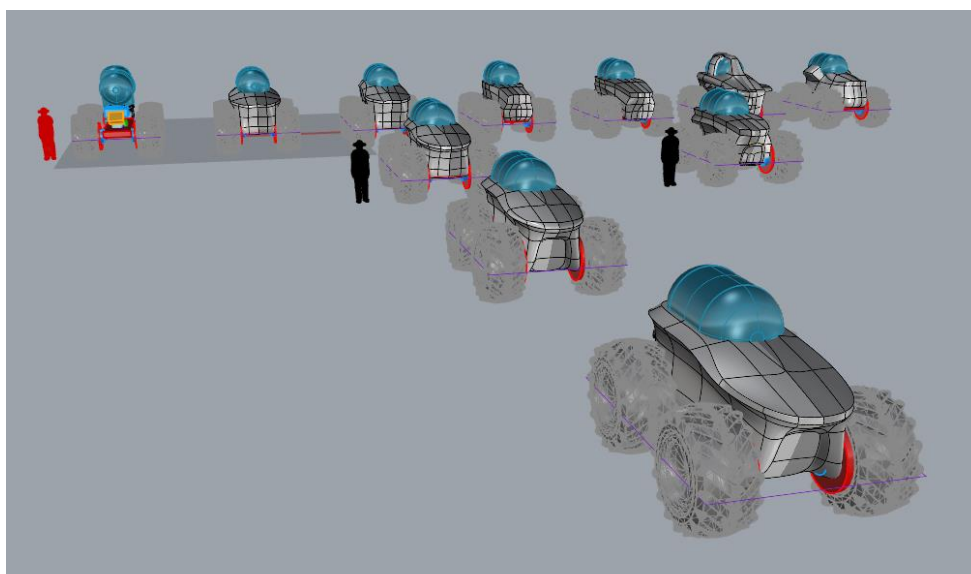
Palivové plnicí porty na traktoru jsou navrženy pro rychlé a bezpečné doplnění vodíku. Tento systém bude zahrnovat bezpečnostní ventil a rychlospojku kompatibilní s plnicími stanicemi. Design traktoru bude zahrnovat snadno přístupné plnicí porty umístěné tak, aby bylo umožněno autonomní tankování nacouváním k plnicí stanici.

4.3 Návrh variantních řešení

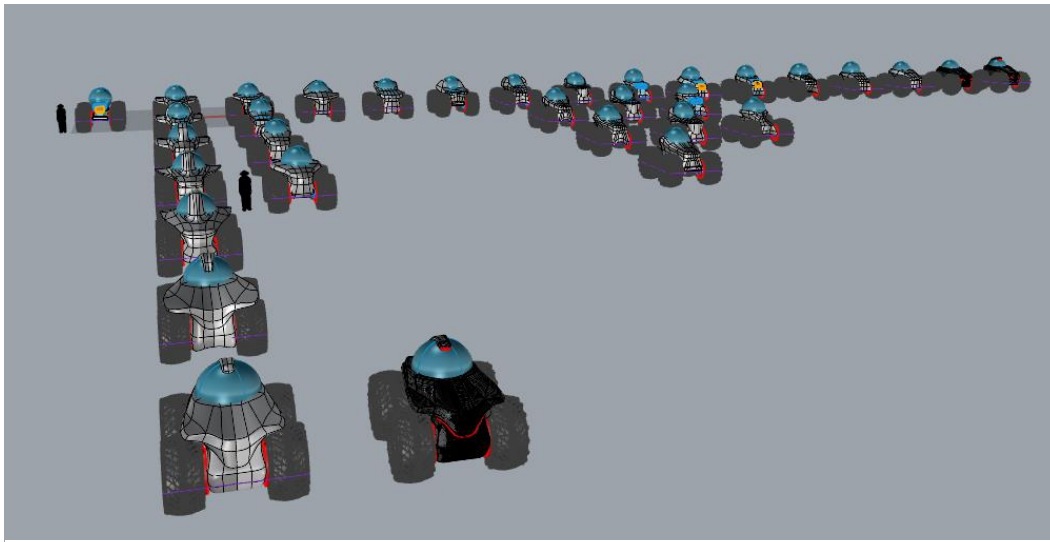
Návrhu variantních řešení předcházelo přibližné uspořádání zvolených komponent s ohledem na celkové rozměry traktoru. Poté následovalo dlouhé hledání základního tvaru traktoru, protože se jedná o zcela nové designové řešení, které se mezi aktuálními koncepty nevyskytuje, a tudíž nebylo kde se inspirovat. Jak lze vyčíst z designerské analýzy, výrobci představili několik konceptů, které však až na pár výjimek, nebyly na vodíkový pohon. A řešení dále nepracují s hlavní myšlenkou této práce, a to odhalením nebo přiznáním vodíkové nádrže. Tudíž bylo nutné řešit zcela nové tvarové řešení. Na jednu stranu to poskytlo značnou volnost, která byla z počátku brána pozitivně, ale na druhou stranu bylo nutné otestovat řadu slepých uliček, jak lze vidět na obrázcích z procesu navrhování, což se značně podepsalo na délce procesu návrhu variant. Bylo pracováno s dvěma tvarovými řešeními nádrže na vodík, a to válcové a kulové nádrže. Byly vybrány dvě varianty s kulovou nádrží a jedna s válcovou. Jelikož bylo hledání základního tvaru časově velmi náročné, nebylo možné vymodelovat u každé varianty plnohodnotné funkční prvky jako ventilační otvory, kamery či antény, ale bylo s jejich umístěním počítáno do budoucna, pokud bude varianta vybrána k další práci.



Obr. 4-4 Návrh variantních řešení I



Obr. 4-3 Návrh variantních řešení II

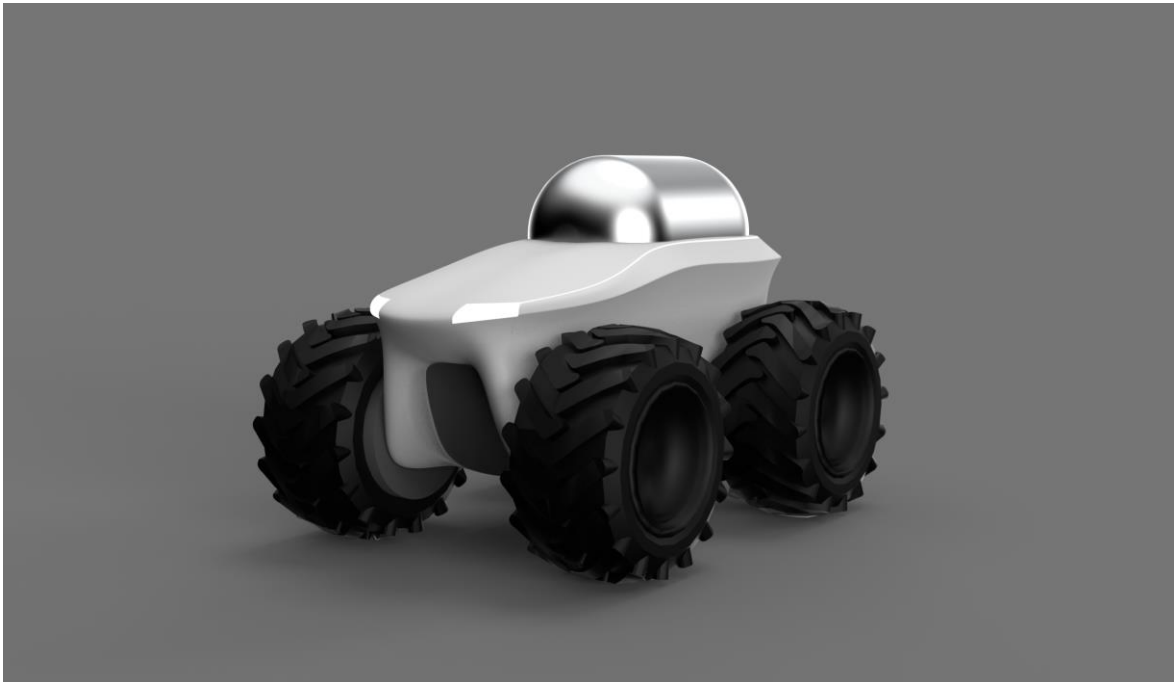


Obr. 4-5 Návrh variantních řešení III

4.3.1 Varianta I

První varianta pracovala s válcovou nádrží s plně zaoblenými podstavami z důvodu, že se jedná o tlakovou nádobu. Nádrž byla zasazena do těla traktoru do poloviny a byla situována ve dvou třetinách celku. U této varianty byla snaha o co nejčistší řešení vzhledem k vodíkovému pohonu, řešeno bylo převážně provázání nádrže se zbytkem traktoru pomocí plynulé spojovací plochy. Ta měla zároveň sloužit k umístění LED osvětlení po celém obvodu, což podtrhuje toto tvarování, a zároveň vznikl prostor pro umístění kamer a senzorů.

Ostrá hrana zmiňované plochy v přední části volně přechází do výrazného zaoblení, které zmírňuje jinak agresivní vzhled. Dále se v přední části nachází vybrání, které dává této variantě výraz a poskytuje prostor pro ventilační otvory či přední tříbodový závěs. V zadní části je tvarování minimální, avšak s doplněním veškerých funkčních součástí by se tato jednoduchost narušila.



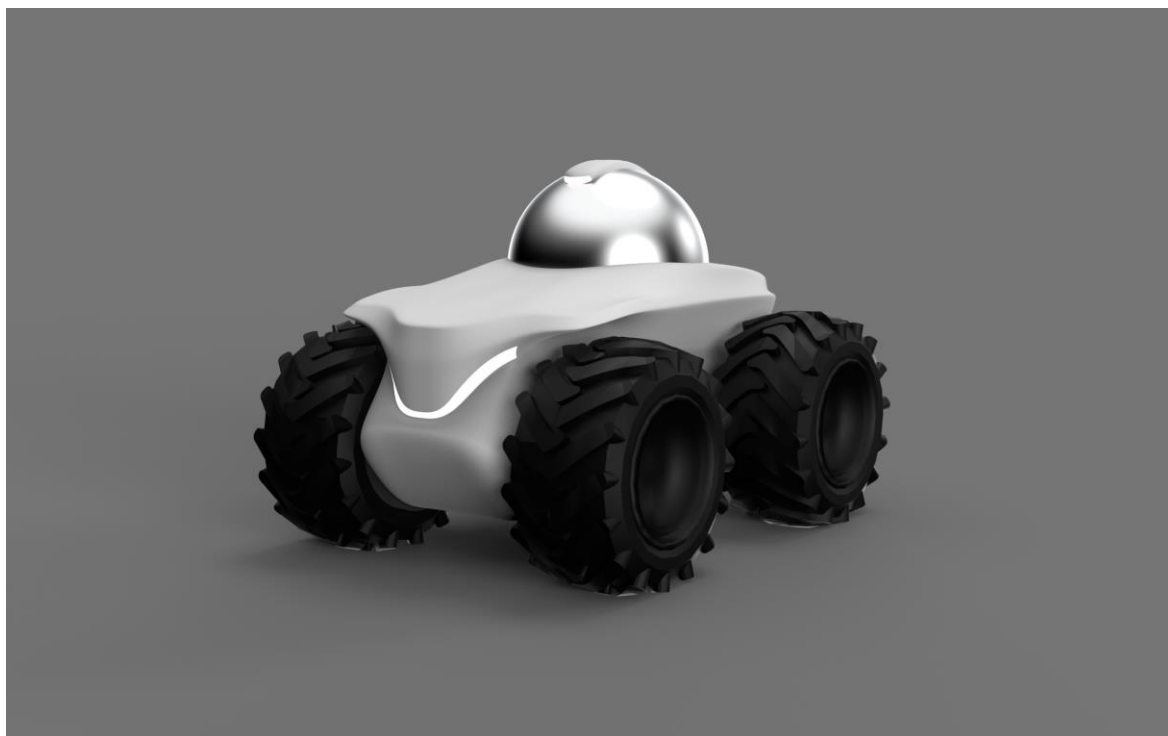
Obr. 4-7 Varianta I, zepředu



Obr. 4-6 Varianta I, zezadu

4.3.2 Varianta II

Tato varianta již disponuje kulovou nádrží na vodík, která traktorů dodává nečekaný a neviděný vzhled. Většina populace je zvyklá na tvarování tlakových nádrží jako je u první varianty. Vznikl zde zajímavý dojem, kde nádoba působí jako kulová kabina řidiče, což dle mého názoru není na škodu, protože to podvědomě zmírňuje zmiňovaný šok z absence kabiny řidiče. Tato varianta prošla dlouhým vývojem, kdy na začátku bylo celkové tvarování zcela jiné. Nápad na tuto variantu vznikl z potřeby dostat funkční komponenty týkající se autonomie co nejvýše, aby byly zajištěny nejlepší zorné úhly. Vzniklo tak tvarování, které obepíná nádrž na vodík, čímž vyjadřuje vizuální upevnění nádrže a zároveň dovoluje kamerám a sensorům optimální rozhled z vyšší pozice. Jelikož je pro uživatele nejdůležitější paradoxně výhled do zadní části, kde může kontrolovat konající nástroj, byl v počátku takzvaný jazyk veden z přední části. Přední část traktorů působila nevkusně a dojem z imitace kabiny nevznikl vůbec. Až otočení celého přístupu k tvarování této varianty přineslo atraktivní přední masku, která dle mého názoru vyjadřuje, že se jedná o těžký zemědělský stroj. Hlavní funkce a výhoda obepnutí nádrže však zůstala zachována. Celkově je tvarování v porovnání s první variantou mnohem výraznější a působí dynamičtěji.



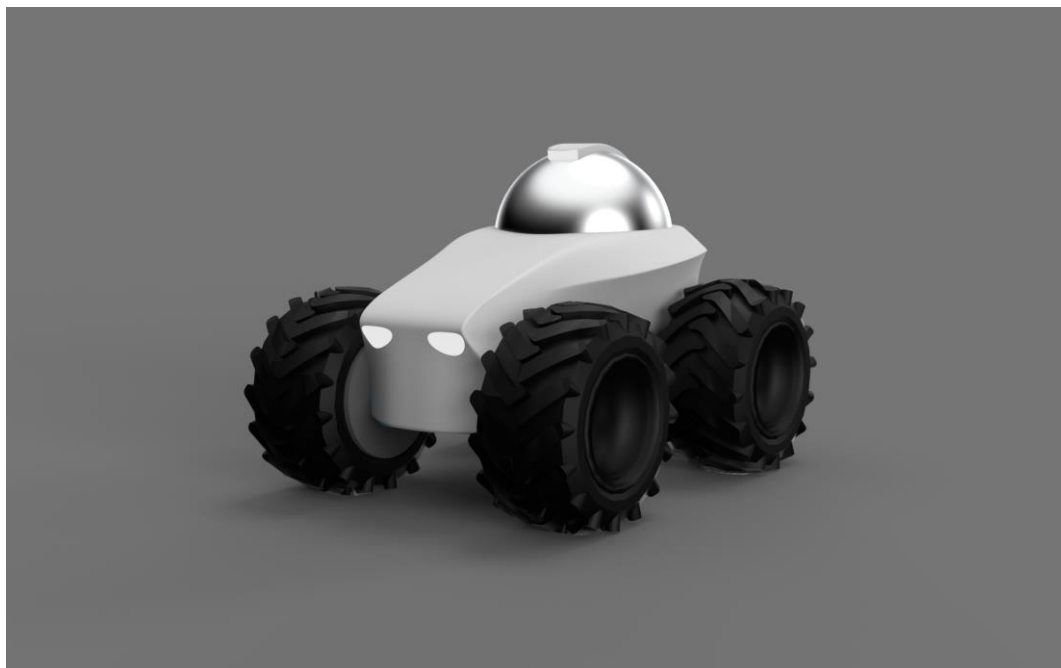
Obr. 4-8 Varianta II, zepředu



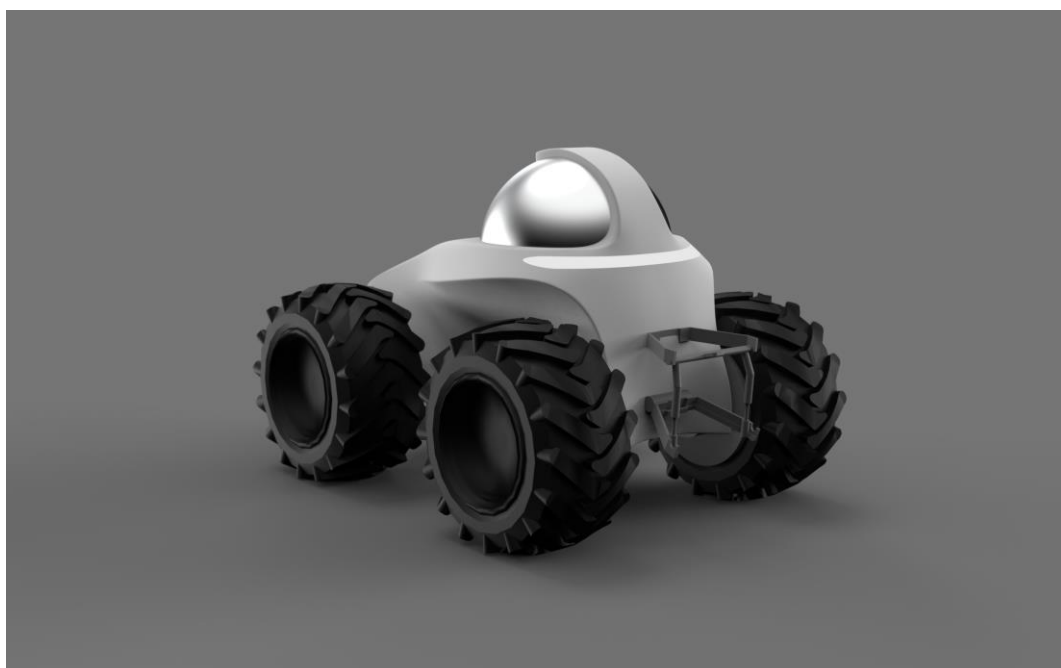
Obr. 4-9 Varianta II, zezadu

4.3.3 Varianta III

Třetí varianta je založena také na kulové nádrži a vznikla původně jako varianta bez obepnutí nádrže z horní strany, avšak následně bylo toto obepnutí do řešení přidáno, protože dávalo smysl jak z funkčního, tak z estetického hlediska. Celkové tvarování se od druhé varianty výrazně liší. Jedná se umírněné tvarové řešení, které vzniklo, podobně jako u první varianty, výraznou plochou, která obepíná nádrž ze stran a zezadu, zaobluje se směrem dopředu až postupně zmizí. Ta také slouží jako mírný blatník, který však u autonomního traktoru není tak důležitý jako u traktorů s kabinou řidiče. Přední tvarování připomíná klasické historické traktory, což podpořilo tvarování světel, které by v případě zvolení této varianty muselo být přepracováno. Hlavní přední linie se podobně jako ta zadní postupně zaobluje až splyne s karoserií celku.



Obr. 4-11 Varianta III, zepředu



Obr. 4-10 Varianta III, zezadu

4.4 Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího

V této kapitole bylo řešeno hodnocení vybraných variant dle kritérií, které se týkají celkového tvarování, funkčních požadavků a možnostech implementace dalších prvků.

Zaměřuji se převážně na celkové tvarování karoserie, protože rozhodnutí, které zásadně ovlivňují tvarování, jako zda implementovat kola či pásy, zda bude potřeba kabina řidiče, či jaký alternativní pohon zvolit, byly určeny po vymezení problému. Určení cílů práce tedy výrazně ovlivnilo směřování celého produktu. Naopak funkční detaily nebyly u variantních návrhů natolik podstatné, jelikož na první pohled nemusí zásadně ovlivnit estetický dojem. Hodnocení bylo provedeno přiřazením číselné hodnoty 0-10 a po sečtení hodnot u všech kritérií byla vyhodnocena výsledná varianta s nejvyšším počtem bodů.

Kritéria	1	2	3
Prostor pro vnitřní komponenty	7	7	4
Stabilita celková a přiznané nádrže	6	8	6
Originalita	8	9	5
Funkčnost	7	3	4
Umístění kamer a senzorů	4	7	6
Tvarování vodíkové nádrže	5	7	7
Návaznost tvaru na nádrž	8	5	7
Tvarování přední masky	7	5	3
Tvarování zadní části	5	8	6
Prostor k implementaci dalších funkčních prvků	8	8	7
Součet	64	68	55

Tab. 4-1 Hodnocení vybraných variant návrhu

Nejlépe hodnocenou variantou byla překvapivě hodnocena varianta II, která sice musí projít značnou kultivací tvaru, ale má nejsilnější výraz, který odpovídá povaze těžkého zemědělského stroje. Zároveň oproti ostatním variantám má výrazné tvarování přední a zadní části a nabízí dostatek prostoru k implementaci zmiňovaných funkčních komponent.

První varianta je esteticky přívětivá z předního pohledu, ale v zadní části je až příliš jednoduchá. Zároveň tato varianta postrádá vyvýšené místo pro implementaci senzorů a kamer, což může být bráno jako značná inovace. Stabilita nádrže však díky jejímu tvaru není až takový problém, avšak celkově traktor působí vzhledem k výškové proporci nestabilně. Třetí varianta celkovým tvarem nejlépe navazuje na vodíkovou nádrž, ale slabší tvarování přední části a nedostatečný prostor pro vnitřní komponenty rozhodl a nepokračování práce na této variantě.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Předběžný návrh rozpracovává vybranou variantu z hlediska konstrukčního i tvarového a značí cestu k finálnímu koncepčnímu řešení. V této kapitole se bude řešit přesnějším uspořádáním vnitřních komponent, volba materiálů, a jelikož byla vybrána varianta II, tak hlavně kultivace tvaru karoserie a představení předběžného návrhu. Budou zde doplněny veškeré funkční prvky, které se finálně dořeší v kapitole detailního návrhu.

5.1 Matematický model

V této podkapitole byl vytvořen matematický model, který zkoumal dobu provozu traktoru na jednu nádrž a testoval hlavní výhodu autonomních traktorů, a to možnost práce v noci. Výsledkem bylo určení velikosti nádrže.

Pro výpočet spotřeby paliva traktoru s výkonem 200 kW a účinností palivového článku 60 % byl použit následující postup. Byla zohledněna energetická hustota vodíku 33,33 kWh/kg a místo konstantního výkonu byl použit průměrný odběr, který zohledňuje běžné úkony traktoru.

- Orání (vysoký odběr): 90–100 % maximálního výkonu.
- Setí, kultivace (střední odběr): 50–70 % maximálního výkonu.
- Přeprava, lehké práce (nízký odběr): 20–40 % maximálního výkonu.

Pro odhad můžeme použít vážený průměr podle typických úkonů: Například, pokud 60 % času traktor vykonává středně náročné práce (60 % výkonu), 30 % času těžké práce (90 % výkonu) a 10 % času lehké práce (30 % výkonu), pak:

$$\text{Průměrný výkon} = (0,6 \times 120kW) + (0,3 \times 180kW) + (0,1 \times 60kW) = 132 kW$$

$$\text{Potřebná energie ve formě vodíku} = \frac{\text{Průměrný výkon}}{\text{Účinnost palivového článku}}$$

$$\text{Potřebná energie ve formě vodíku} = \frac{132 kW}{0,6} = 220 kW$$

$$\text{Spotřeba vodíku za hodinu} = \frac{\text{Potřebná energie ve formě vodíku}}{\text{Energetická hustota vodíku}}$$

$$\text{Spotřeba vodíku za hodinu} = \frac{220 \text{ kW}}{33,33 \text{ kWh/kg}} \approx 6,6 \text{ kg/hod}$$

$$\text{Spotřeba vodíku za 10 hodin} = 6,6 \text{ kg/hod} \times 10 \text{ hod} = 66 \text{ kg}$$

$$\text{Objem nádrže} = \frac{\text{Hmotnost vodíku}}{\text{Hustota vodíku při 700 bar}}$$

$$\text{Objem nádrže} = \frac{66 \text{ kg}}{0,07 \text{ kg/l}} \approx 943 \text{ litrů}$$

Základní matematický model predikoval průměrnou hodinovou spotřebu vodíku autonomního traktoru na 6,6 kg. Pro referenční desetihodinový pracovní cyklus činí odhadovaná spotřeba 66 kg, vyžadující minimální objem nádrže 943 litrů. S ohledem na potenciál autonomního provozu i v noci a pro zajištění delší doby práce bez nutnosti doplňování a vzhledem k plánovanému odhalení vodíkové nádrže, byla kapacita nádrže navýšena na 1500 litrů. Tato úprava by teoreticky měla umožnit přibližně 16 hodin nepřetržitého provozu při průměrné spotřebě. Je však nutné pamatovat na to, že model je zjednodušením a reálná spotřeba se bude lišit v závislosti na provozních podmínkách. Pro validaci a optimalizaci je nezbytné provést testování v reálném zemědělském prostředí.

5.2 Určení tvaru rozměrů a materiálů

Na obrázcích níže můžete vidět předběžný návrh, který vznikl propracováním druhé varianty a byl prezentován na konci zimního semestru. Po konzultaci s komisí a následně vedoucím práce bylo rozhodnuto opustit tuto variantu a vydat se cestou varianty první. To je tedy i důvodem, proč se v kapitole nachází dva předběžné návrhy.

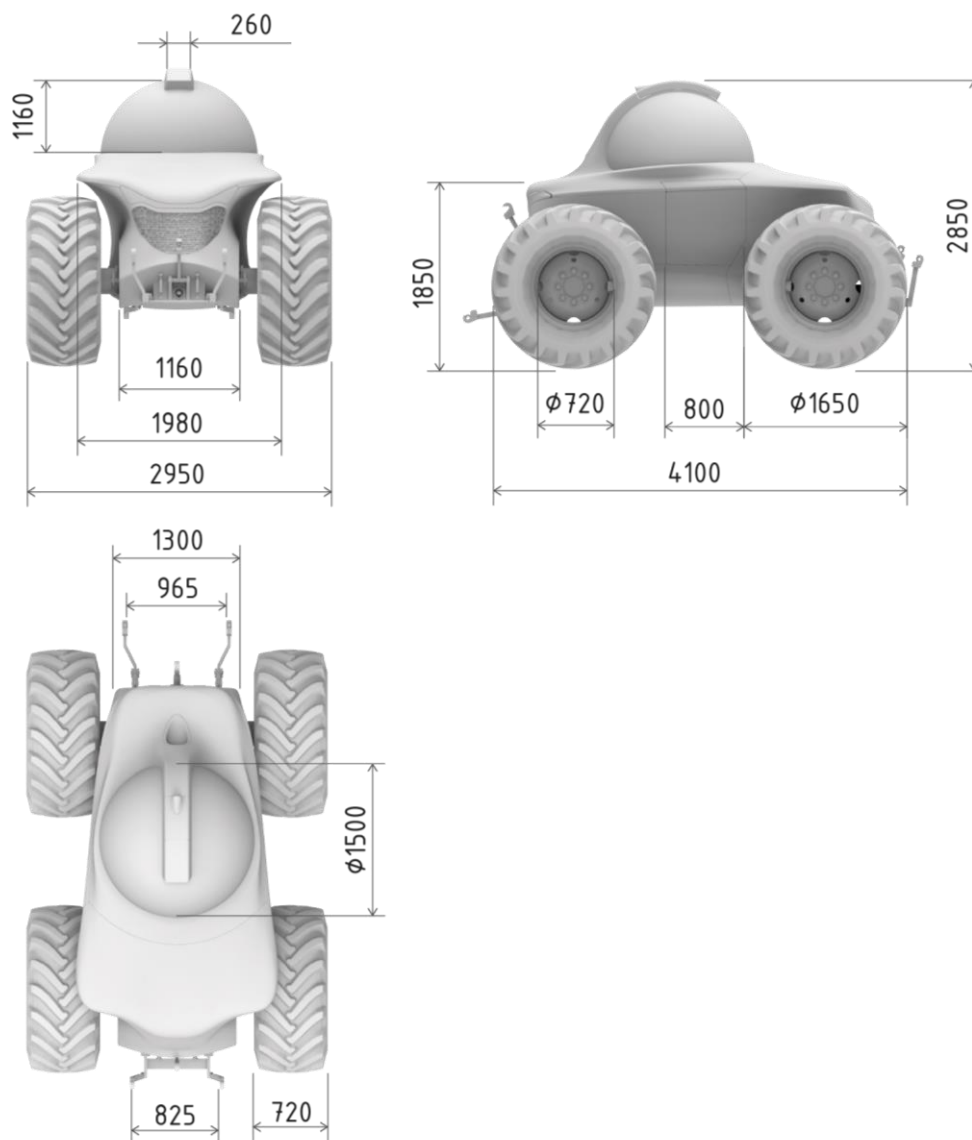
Předběžný návrh z varianty I



Obr. 5-2 Předběžný návrh z varianty II, pohled zepředu



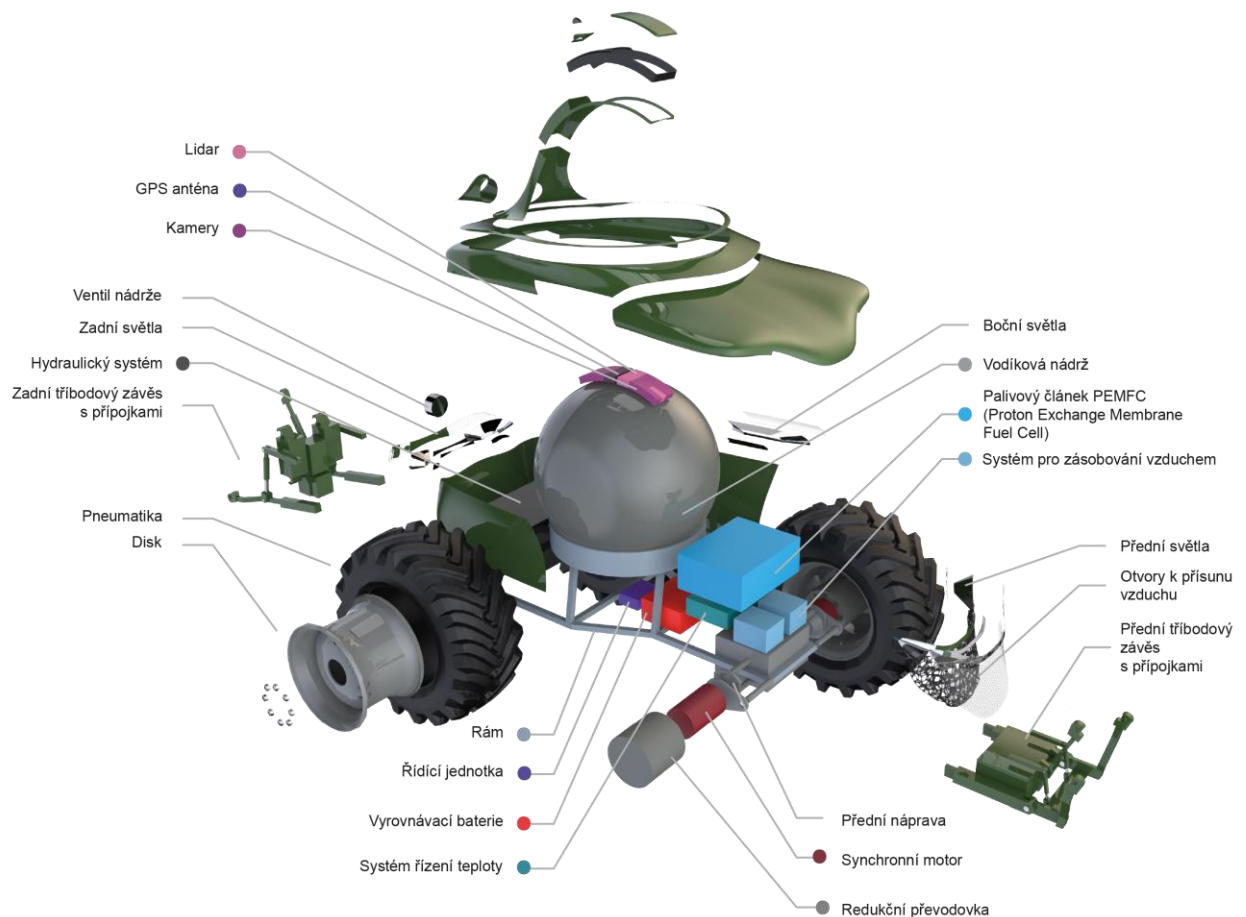
Obr. 5-1 Předběžný návrh z varianty II, pohled zezadu



Obr. 5-4 Rozměrové řešení předběžného návrhu z varianty II



Obr. 5-3 Předběžný návrh z varianty II, detail



Obr. 5-5 Vnitřní schéma předběžného návrhu varianty II

Na tomto návrhu bylo v rámci diplomové práce pracováno několik měsíců, kde se postupným kultivováním tvaru karoserie a implementaci funkčních komponent došlo k předběžnému návrhu viz výše. Ve srovnání s původním návrhem varianty došlo k řadě změn. Robustní přední část byla tvarově odlehčena a byl přidán prostor k implementaci předního třibodového závěsu. Dále byl kompletně změněn přístup k umístění předních světel, které nyní tvoří dva hlavní světlomety a mezi nimi LED pásek. Také bylo experimentováno s genericky navrhnutou přední mřížkou. V zadní části proběhlo několik změn, které se především věnovali tvarové kultivaci a oddělení prostoru technických komponent, čímž vznikl prolis v místě zadního třibodového závěsu. Světla v zadní části jsou navržena obdobně jako v části přední. Nachází se zde dva hlavní světlomety a LED pásek mezi nimi.

Tento návrh má řadu inovativních myšlenek, jako je umístění hlavních prvků pro autonomní provoz nahoru do “jazyku“, který vizuálně i konstrukčně upevňuje nádrž. Tato část byla v porovnání s variantním návrhem částečně geometrizována. Další inovací je samotná kulová nádrž na vodík, která symbolicky připomíná kabinu řidiče a implementace ventilu k doplňování paliva do zadní části obepínajícího prvku.

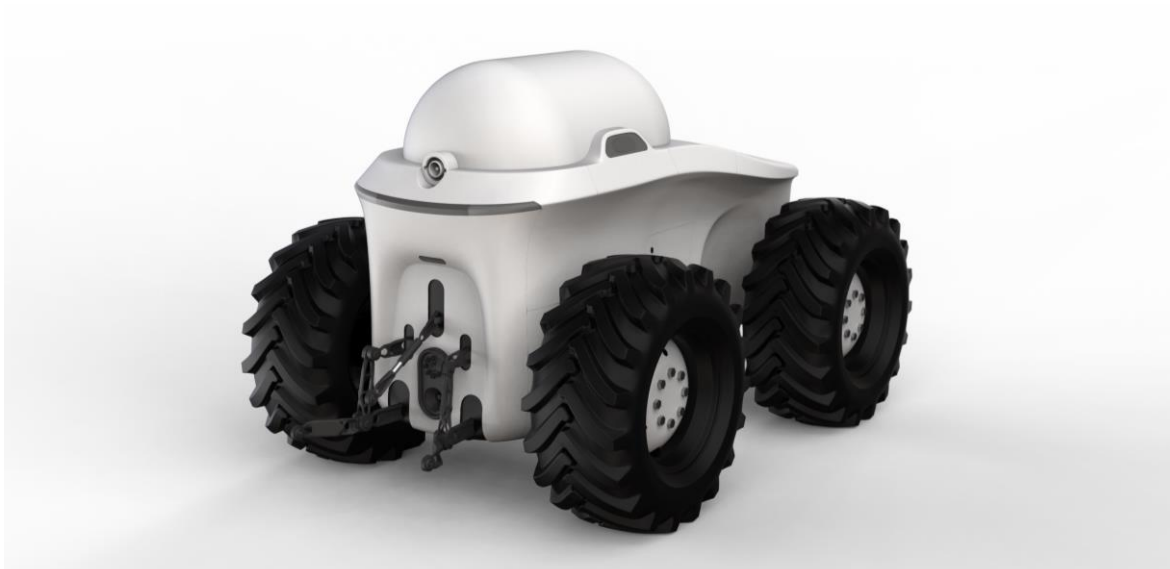
Co bylo však vytknuto a rozhodlo o přechodu k jiné variantě bylo tvarování přední masky, tvarování předního a zadního tříbodového závěsu či barevné provedení. Celkově vedl návrh k rozporuplným názorům, a proto od něho bylo upuštěno. Práce, která vedla k téměř dokončení tohoto návrhu však nepřišla nazmar, pomohla v mnoha aspektech předběžného návrhu, který je postavený na variantě I a bude představen dále. Tato situace ukazuje, že v procesu návrhu se může dopracovaná varianta ukázat jako slepá ulička vývoje, a je nutné si v průběhu odstoupit a vyslechnout názory okolí.

Předběžný návrh z varianty II

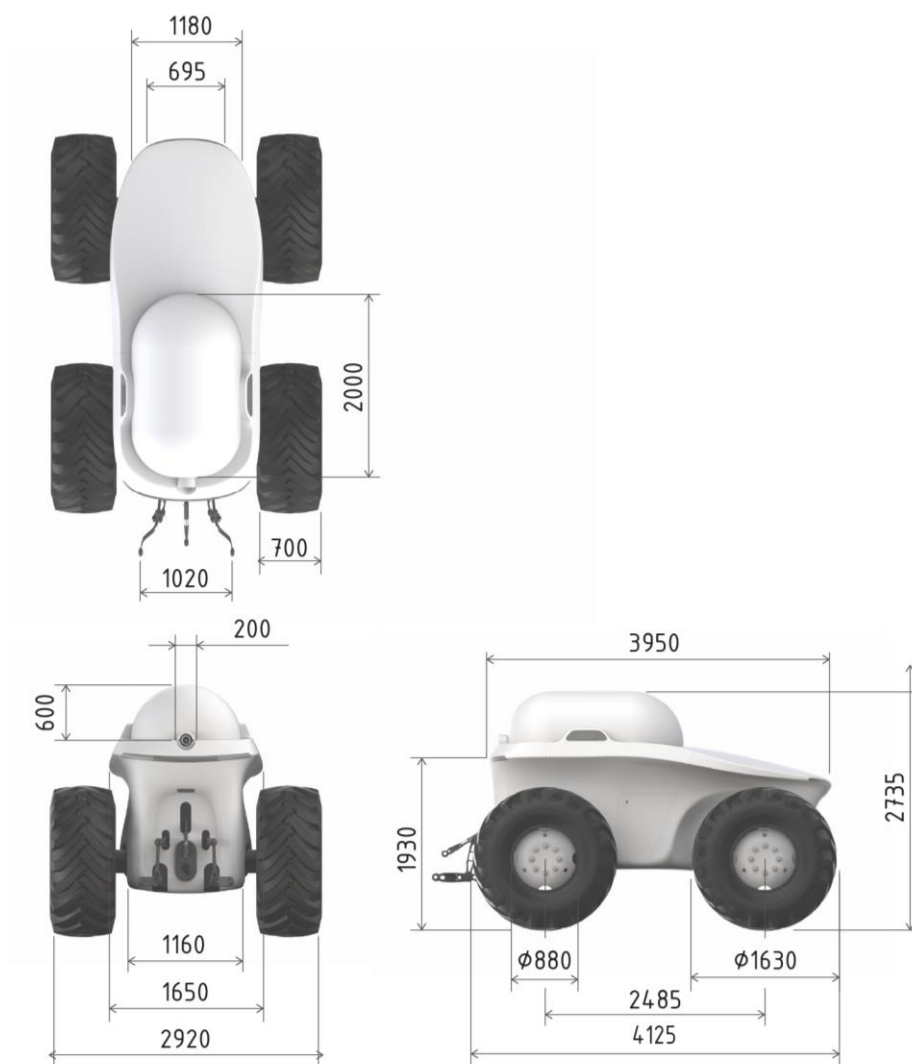
Rozpracování nového návrhu z druhé varianty šlo již o poznání lépe. Z počátku byla snaha o implementaci kulové nádrže, která byla v předchozím návrhu, i přes složitost výroby, poutavým prvkem. Bohužel byla celková proporce a tvarování navrženo s ohledem na typičtěji tvarovanou nádrž, takže nebyla změna tvaru nádrže možná. Zaměřeno bylo převážně na umístění funkčních prvků, tvarování masky či závěsů k připojení nástrojů. Předběžný návrh, který je zde předložen, je téměř ve finální tvarové podobě a bude detailně rozebrán v následující kapitole. V návrhu níže chybí pouze barevné a grafické provedení a řešení předního tříbodového závěsu, přední vývodové hřídele (PTO), přípojek hydrauliky a ISOBUS konektoru. Předběžný návrh je zde uveden v pokročilém stádiu vývoje z důvodu srovnání s předběžným návrhem z druhé varianty. Jednotlivé rozhodnutí a varianty funkčních prvků budou předloženy v kapitole detailního návrhu.



Obr. 5-6 Předběžný návrh z varianty I, pohled zepředu



Obr. 5-8 Předběžný návrh z varianty I, pohled zezadu



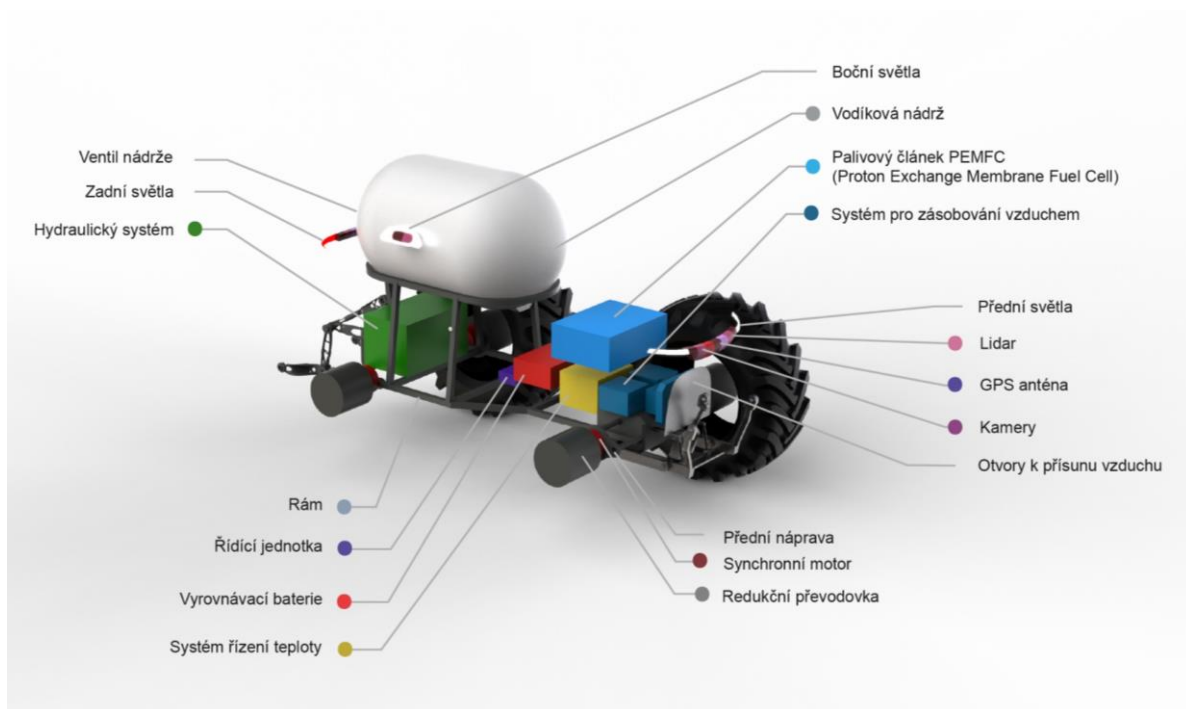
Obr. 5-7 Rozměrové řešení předběžného návrhu z varianty I



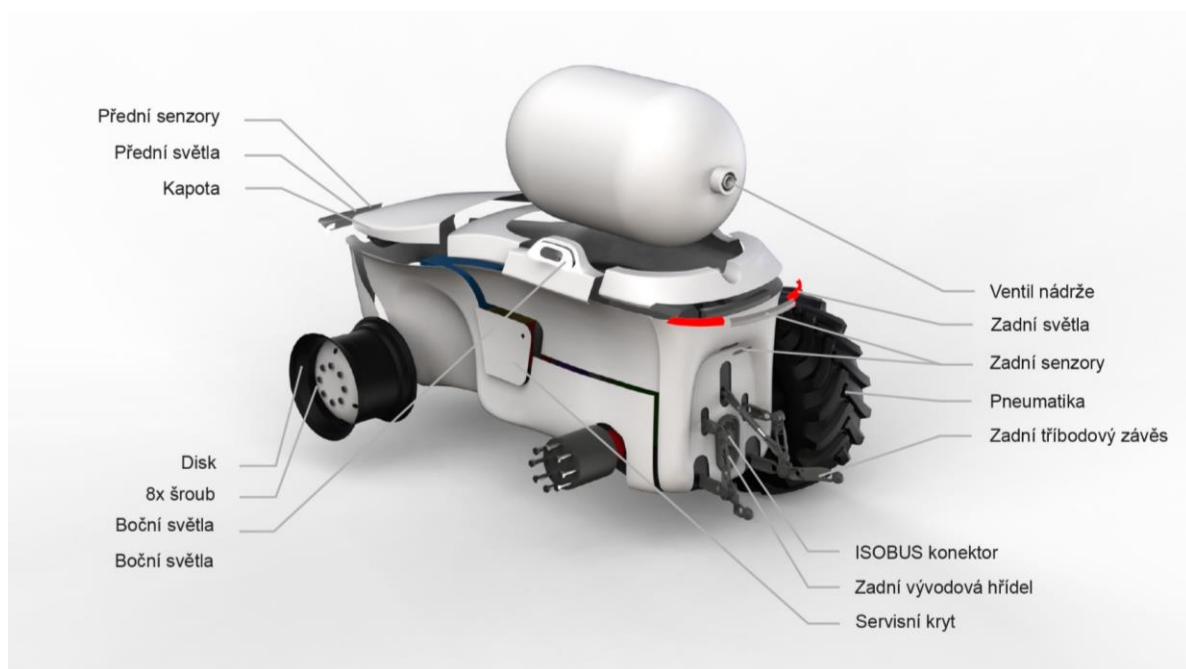
Obr. 5-10 Řešení osvětlení předběžného návrhu z varianty I



Obr. 5-9 Předběžný návrh z varianty I, detail



Obr. 5-12 Vnitřní schéma předběžného návrhu varianty I



Obr. 5-11 Exploded view předběžného návrhu z varianty I

Materiály:

Rám a nosná konstrukce: Základním konstrukčním prvkem autonomního traktoru je rám a nosná konstrukce, pro jejichž výrobu je navržena vysokopevnostní ocel. Tato volba materiálu je odůvodněna požadavky na robustnost, odolnost vůči mechanickému namáhání a zajištění celkové integrity stroje během náročných zemědělských operací. Vysokopevnostní oceli vykazují vynikající poměr mezi pevností a hmotností, což je klíčové pro minimalizaci celkové hmotnosti traktoru při zachování požadované strukturální tuhosti a nosnosti.

Karoserie: Pro vnější panely karoserie jsou zvažovány dvě materiálové varianty, přičemž každá nabízí specifické výhody:

Ocelové plechy: V případě použití ocelových plechů bude výrobní proces zahrnovat lisování pro dosažení požadovaných tvarů. Následné elektrolytické zinkování zajistí účinnou ochranu proti korozi. Pro zvýšení odolnosti vůči atmosférickým vlivům a mechanickému poškození bude aplikován kataforézní nátěr, který poskytuje rovnoměrnou a přilnavou vrstvu. Finální povrchovou úpravu zajistí práškové lakování, které se vyznačuje vysokou odolností a estetickou kvalitou.

Laminát (vlákna s epoxidovou pryskyřicí): Alternativně lze pro karoserii využít kompozitní materiály na bázi vláken s epoxidovou pryskyřicí. Tyto lamináty nabízejí výhodu nižší hmotnosti v porovnání s ocelí, a zároveň poskytují dostatečnou pevnost a tvarovatelnost. Epoxidová pryskyřice slouží jako matrice pro zpevňující vlákna, čímž vzniká materiál s vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti a dobrou odolností vůči chemikáliím a povětrnostním vlivům.

Nádrž na vodík: Konstrukce vysokotlaké nádrže pro skladování vodíku vyžaduje vícevrstvou strukturu pro zajištění bezpečnosti a integrity:

Jádro z vysokohustotního polyethylenu (HDPE): Vnitřní vrstva nádrže bude tvořena HDPE, který se vyznačuje dobrou chemickou odolností vůči vodíku a nízkou propustností. Tato vrstva slouží jako primární bariéra pro skladovaný plyn.

Ovin z karbonových vláken s epoxidovou pryskyřicí: Nosnou vrstvu nádrže bude tvořit ovin z karbonových vláken s epoxidovou pryskyřicí. Karbonová vlákna poskytují extrémně vysokou pevnost při nízké hmotnosti, což je klíčové pro odolnost vůči vysokému tlaku skladovaného vodíku. Epoxidová pryskyřice zajišťuje soudržnost vláken a přenos zatížení.

Polyuretanový povlak: Vnější vrstvu bude tvořit polyuretanový povlak, který chrání kompozitní strukturu před mechanickým poškozením, oděrem a vlivy vnějšího prostředí. Polyuretan se vyznačuje vysokou odolností a pružností.

Kryty světel: Pro kryty světel autonomního traktoru bude použit polykarbonát. Tento termoplastický polymer se vyznačuje vysokou rázovou houževnatostí, transparentností a odolností vůči povětrnostním vlivům a UV záření. Tyto vlastnosti jsou zásadní pro zajištění dlouhodobé funkčnosti a ochrany osvětlovacího systému traktoru.

6 DETAILNÍ NÁVRH

V rámci této kapitoly se zaměříme na detailní zpracování a odůvodnění finálního řešení návrhu autonomního traktoru. Na problematiku bude nahlíženo jak z estetického, tak z technického hlediska. Dále bude krátce zmíněna ergonomie produktu, která se u autonomního stroje týká především údržby a servisu. V neposlední řadě se v této kapitole pojímá o udržitelnosti návrhu, jeho barevném a grafickém provedení a hodnocením klíčových parametrů produktu.

6.1 Tvarové řešení

V této podkapitole probereme finální návrh po tvarové stránce z hlavních pohledů. Dále se zde objeví detailní vizualizace a popis jednotlivých funkčních prvků a budou popsány postupy návrhů a myšlenky směřující k finalizaci celkového návrhu.

6.1.1 Proporce a kompozice



Obr. 6-1 Perspektivní pohled finálního návrhu

Výsledné tvarování vzniklo postupnou kultivací variantního návrhu I. Jak již bylo zmíněno, hlavním prvkem celého řešení je odhalená vodíková nádrž, která je umístěna v prostoru kabiny klasických traktorů. Této nádrži je přizpůsoben tvar karoserie, který disponuje hlavními liniemi, která kopíruje rádius nádrže v zadní části.

Odsazením této linie vzniká plocha, která ve variantním návrhu nesla LED pásek po obvodu a byla zamýšlena k umístění senzorů. Při přechodu do přední části se linie sbíhají a postupně přechází v zaoblení, ve kterém jsou posazeny světla a senzory přední části. Avšak v průběhu návrhu prošla tato linie změnou proporce, úhlu natočení a bylo upuštěno od osvětlení po celém obvodu.

Celkově vzniká tvarování karoserie, které je až na onu linii velice soudržné a čisté. Účelem tvarováním bylo vyzdvihnout vodíkový pohon ať už odhalením nádrže, tak tvarováním s minimem ostrých zlomů. Organická podoba finálního návrhu dle mého názoru odpovídá čistotě vodíkového pohonu a celému řešení lokálního energetického hospodaření na farmě. I vzhledem k převážnému zastoupení diesellových traktorů, a jejich často hrubým a agresivním liniím, bylo záměrně mířeno na opačnou stranu spektra při zachování výrazu těžkého zemědělského stroje.



Obr. 6-2 Proporce vzhledem k muži 95P

Kompozičně je návrh rozdělen na tři vizuální části: kola, nádrž a karoserii, která tyto dva prvky propojuje. Karoserie je následně tvarově přizpůsobena menším funkčním prvkům a vnitřnímu uspořádání komponent. Dále je tvarově a barevně oddělena přední maska, která propůjčuje prostor pro ventilační nádech a přední tříbodový závěs společně s veškerými přípojkami. V zadní části také dochází k tvarovému oddělení prostoru pro technické funkční komponenty k připojování nástrojů, ale už bez barevného odlišení.

Vzhledem k variantnímu návrhu II, kde se osvědčilo vizuální upevnění nádrže do karoserie pomocí prvku nesoucího senzory, bylo tak učiněno i u tohoto návrhu, avšak v omezené míře. Z hlavní horní linie vybíhají prvky objímající nádrž, které zároveň nesou boční senzory a LED světla.

Zadní části dominuje zmíněný prolis s třibodovým závěsem, který zabírá téměř celou spodní polovinu. Nástrojová spodní část je oddělena pásem zadních světel a sensorických systémů. Čímž vizuálně odděluje proces tankování a výměny nástrojů.



Obr. 6-3 Perspektivní pohled finálního návrhu zezadu

6.1.2 Přední pohled

Přední část prošla od původního variantního návrhu velkým počtem změn. Došlo ke kompletnímu přepracování hlavních světlometů společně s prostorem na senzory.



Obr. 6-4 Perspektivní pohled na přední část návrhu

Přední maska

Světlomety byly pojaty dnes již klasickým řešením úzkého LED světla, které můžeme pozorovat u celé řady konceptů budoucnosti. Hlavním důvodem implementace čárových světlometů je pokračování v hlavní linii a návaznost na prostor senzoru. Níže lze vidět jednotlivé varianty řešení tohoto prvku. Řešena byla návaznost jak na zbytek karoserie, tak na spodní prolis v přední části. Prostor uprostřed světel je optimálním místem k zajištění funkce veškerých systémů navigace autonomního traktoru. Jak lze vidět z bočního pohledu celá přední část se světly a senzory je vystrčena směrem vpřed k zajištění optimálních pozorovacích úhlů.



Obr. 6-5 Variantní návrhy přední masky

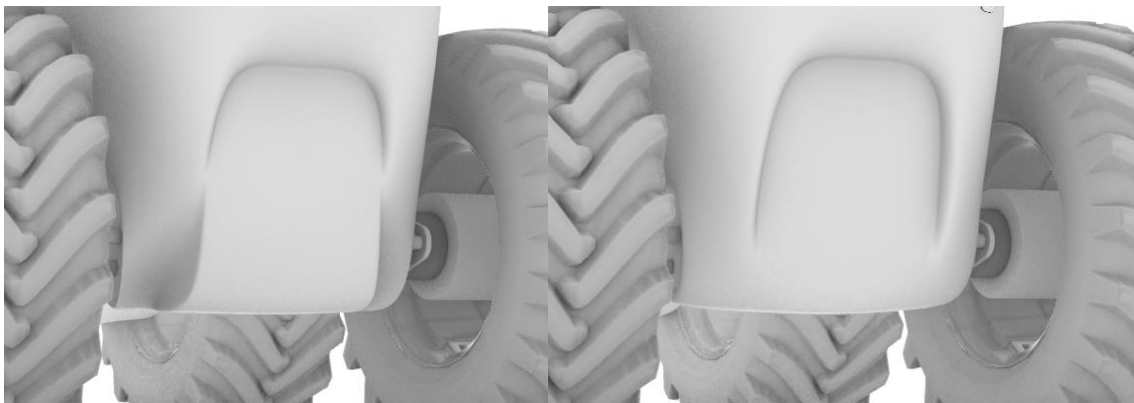
Z šestice vybraných variant byla následně vybrána a dále zpracována verze, která se nachází v pravém dolním rohu. Tvar vznikl zrcadlením tvaru prolisu pro ventilační mřížku a pokračováním v hlavní linii světel, a tudíž i celého návrhu. Díky rozšíření, vzniká větší prostor pro umístění senzorů a kamer při zachování úzkých světlometů.



Obr. 6-6 Perspektivní pohled na přední masku

Přední prolis

Již z variantního návrhu bylo patrné řešení spodku přední části. To prošlo kultivací tvaru převážně v krajních pozicích karoserie, kde byl vytvořen větší prostor k natačení kol. Dále bylo pracováno s dvěma způsoby tvarování prolisu viz níže. První verze je plně zapuštěná do karoserie a spodní hrana je společná pro celou přední část. Druhá varianta pracuje s postupným přechodem z prolisované části do vypnuté. Vznikne tak specifický tvar náběhu, který dává v přední části smysl.



Obr. 6-7 Varianty tvarování předního prolisu

Vzhledem k výhodnosti možnosti barevného odlišení nástrojové a ventilační části bylo rozhodnuto pro použití tvarování varianty na levé straně. Navíc vzniká více prostoru pro implementaci funkčních prvků a jejich nárokům. Dále byl prolis rozdělen na část s mřížkou k sání vzduchu a spodní plech, který nese přední tříbodový závěs, přední vývodovou hřídel, přípojky hydrauliky a ISOBUS konektor k přenosu dat a elektrické energie.

Přední třibodový závěs

Při práci na finálním návrhu byl kladen důraz na design třibodových závěsů, protože to byl jeden z vytýkaných aspektů předběžného návrhu založeného na variantě II. Bylo rozhodnuto využít ke konstrukci a návrhu předního i zadního třibodového závěsu topologickou optimalizaci. Ta měla za úkol optimalizovat poměr hmotnosti k pevnosti při zatížení jednotlivých ramen závěsů. Výsledkem je organicky tvarovaná sestava, která je ideální k výrobě pomocí aditivních technologií. Rozhodnutí implementovat tento postup, bylo zvoleno jak z estetického hlediska, tak z budoucího potenciálu aditivních technologií a jejich rozvoji. Vizualní hodnota této metody je plně projevena v zadním třibodovém závěsu.



Obr. 6-8 Perspektivní pohled na přední třibodový závěs, PTO a přípojky

Přední připojení nástrojů

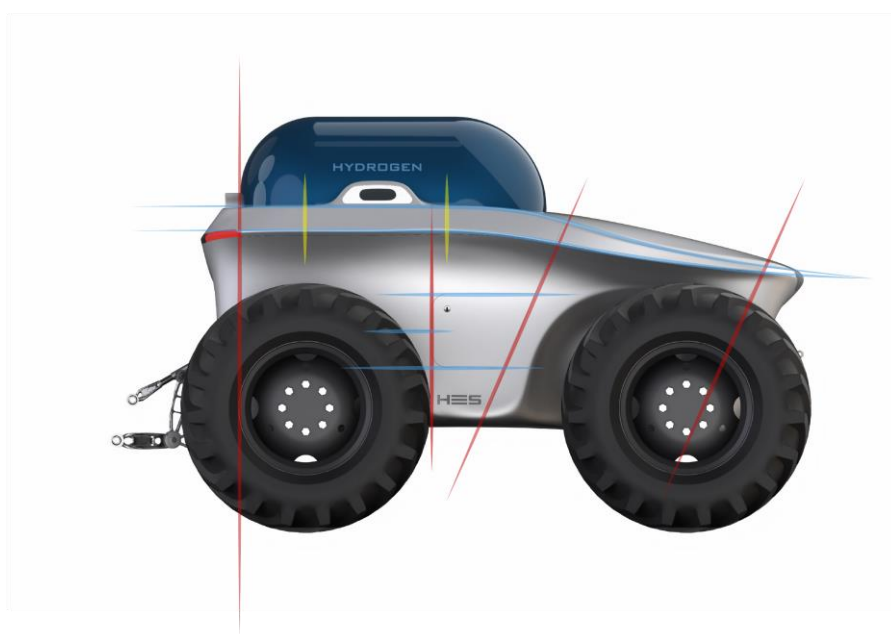
Jelikož se jedná o úplně autonomní stroj je nutné zajistit, aby zvládal také autonomně vyměňovat nástroje. K tomu slouží kombinované přípojky hydrauliky, ISOBUS konektoru a v případě potřeby i přední vývodové hřídele. Princip připojování je založen na Quick hitch systému upraveného přidáním adaptéru, který slouží k propojení veškerých systémů s nástrojem. Kombinovaný adaptér je následně upevněn ve své pozici díky děleného límce, který je ve tvaru inspirovaném průřezem nádrže. Tvar obdélníku s plně zaoblenými kratšími stranami se objevuje ve více částech celého návrhu a slouží jako významný propojovací prvek. V přední části si ho můžeme povšimnout u otvoru přední mřížky pro horní rameno závěsu či v konstrukci závěsu samotného. Problematika tvarování autonomního připojovacího systému byla od původního předběžného návrhu kompletně přepracována k zajištění větší provázanosti celkového návrhu.

6.1.3 Boční pohled



Obr. 6-10 Perspektivní boční pohled

Z bočního pohledu vynikne hlavní linie, která se jako vlna vyrovnává směrem k zadní části. Dále je patrné členění dílů karoserie a odnímatelný kryt přístupu k vykonání údržby. Tvar krytu opět implementuje zaoblení a horizontálně i vertikálně navazuje na hlavní dělicí linie. Rozdělení karoserie na jednotlivé díly bylo bráno jak z konstrukčního, tak estetického hlediska. Na ortografickém pohledu níže jsou ukázány dvojice vertikálních sbíhajících se linií dělení krytů karoserie.



Obr. 6-11 Ortografický boční pohled s vyznačenými liniemi

Boční světla a senzory



Obr. 6-12 Perspektivní pohled na boční světla a senzory

Nádrž obepínají výstupky, které na jednu stranu vizuálně upevňují nádrž ke karoserii a na stranu druhou nesou boční osvětlení a sensorické systémy k výhledu do stran. Důvod implementace vznikl inspirací z varianty II a III, ale již ne s takovým dopadem na zlepšení pozorovacích úhlů. Tvarosloví opět navazuje na celkový vzhled zaoblených tvarů a navazuje i sklonem na hlavní dělicí plochu. Rozvržení a umístění světel a senzorů do bočních výstupků bylo testováno zhotovením několika variant, kde výslednou volbou byl opět tvar připomínající nádrž. Panel osvětlení může také sloužit k indikaci stavu stroje. Karoserie je z výrobních důvodů členěna po obou stranách od vystupujících členů.

Boční odnímatelné kryty údržby



Obr. 6-13 Perspektivní pohled na odnímatelný kryt údržby

Boční odnímatelný kryt slouží k vykonání údržby jak z hlediska doplňování či vyměňování provozních kapalin tak pokročilé diagnostice elektronických systémů. Na počátku bylo zvažováno implementovat plnohodnotnou kliku a systém pantů, ale po zvážení četnosti otevírání bylo rozhodnuto pro jednodušší řešení. K přístupu stačí otočit klíčem a potáhnout směrem k sobě, kryt je jištěn tvarově ve spodní a pravé části a zámkem v levém horním rohu.

6.1.4 Zadní pohled

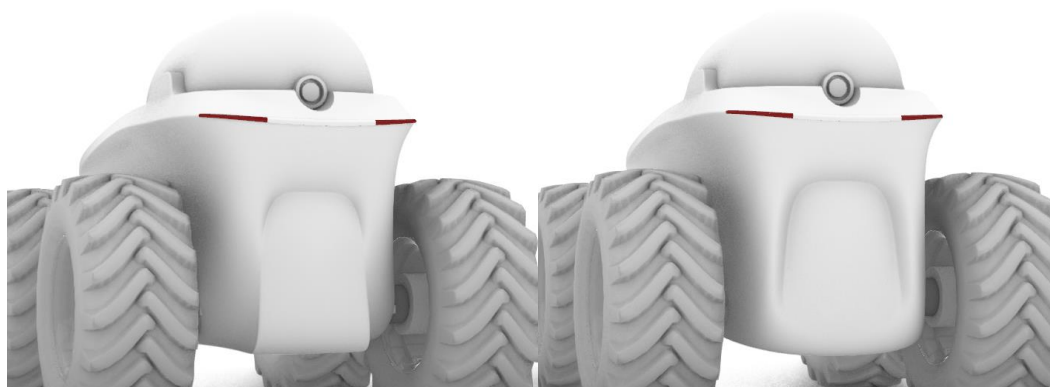


Obr. 6-14 Zadní perspektivní pohled

V zadní části se nachází hlavní funkční prvky celého traktoru plnící funkce jako připojování nástrojů doplňování paliva či kontrola práce a navigace pomocí senzorů a kamer.

Zadní prolis

Pro funkční prvky připojování nástrojů slouží k zadní části tvarové oddělení ve formě prolisu. Pracovalo se opět v průběhu návrhu se dvěma variantami totožnými jako v přední části, ale nakonec bylo rozhodnuto využít jednoho přístupu vepředu kde to dává větší smysl z hlediska rozrážení plodin, implementaci menšího tříbodového závěsu kategorie 2 či sání vzduchu. Navíc tříbodový závěs společně s kombinovanou přípojkou vyžaduje více místa, tudíž i barevně odlišená plocha by byla větší a zadní část by vůči velkým kolům ztratila vyváženost a kontrast. Výhodné je toto řešení v tvarovém odlišení přední a zadní části a podtržení směrnosti stroje. V horní části prolisu se nachází dodatečný senzorický systém pro autonomní připojování nástrojů a jejich kontrolu.



Obr. 6-15 Varianty tvarování zadního prolisu

Zadní tříbodový závěs

V zadní části se nachází zadní tříbodový závěs, který je hlavním funkčním prvkem traktoru. Jedná se o kategorii 3, která je schopná nosnosti a zvedacího tlaku maximálně 10 tun. Je kompatibilní s nejnávyspělejšími aktuálními nástroji, které jsou koncipované pro střední a velké polnosti.



Obr. 6-17 Perspektivní pohled na zadní tříbodový závěs



Obr. 6-16 Detailní pohled topologicky optimalizovaných součástí

K tvarování byl opět využit princip topologické optimalizace, avšak v mnohem větší míře než u závěsu předního. Závěs byl rozdělen na jednotlivé součásti sestavy a zatížen dle maximálního povoleného zatížení. Dále proběhl výpočet optimálního rozložení hmotnosti dle vznikajícího napětí, tím i vznik zajímavého estetického výrazu. Osobně mi konstrukční součásti vzniklé pomocí této metody připomínají stejně jako některé generativní designy přírodní materiály či kosti.

Jelikož se většina hydraulických zařízení tříbodového závěsu nachází uvnitř karoserie, bylo nutností vytvoření otvorů pro jednotlivé ramena, které implementují štětiny k zabránění vniknutí nečistot, při umožnění pohybu ramen. Otvory opět využívají již zmíněného tvaru pilulky a společně tvoří kompozici skrz celý zadní prolis.

Zadní připojení nástrojů



Obr. 6-18 Detailní pohled na zadní tříbodový závěs, PTO, hydraulické a elektrické přípojky

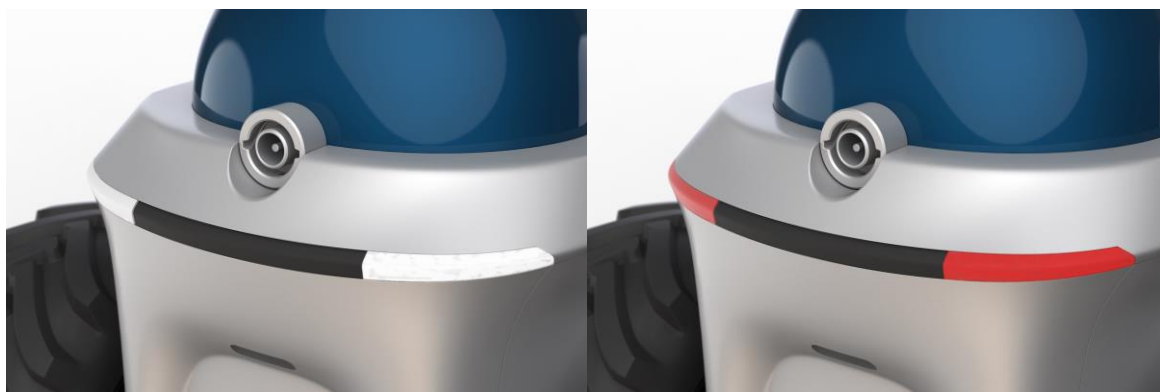
Ke komunikaci s nástrojem je v zadní části opět počítáno s implementací upraveného systému quick hitch, avšak s vyšším počtem hydraulických přípojek pro uspokojení potřeb i nejnáročnějších nástrojů. Opět je využito tvaru obdélníku s rádiusy místo kratších stran. Středy rádiusu jsou využity k vytvoření kompozice, v horní části z hydraulických ventilů a ISOBUS konektorem ve středu, a v dolní části kruhovým naváděcím límcem k připojení zadní vývodové hřídele. K navedení dále slouží zmíněné senzory, po nalezení správné pozice je kombinovaný adaptér upevněn límcem.

Zadní světla a senzory



Obr. 6-19 Perspektivní pohled na zadní světla a senzory

Zadní světla jsou umístěna, podobně jako přední, přímo na určující linii. Narozdíl od předního řešení je v zadní straně celý prvek tvořen pásem o větší tloušťce a tvarem navazuje na zmíněnou hranu. Celkově pás rozděluje zadní část na spodní nástrojovou a horní k doplňování paliva, což je podpořeno postupným směřováním karoserie k rozdělovací hraně.

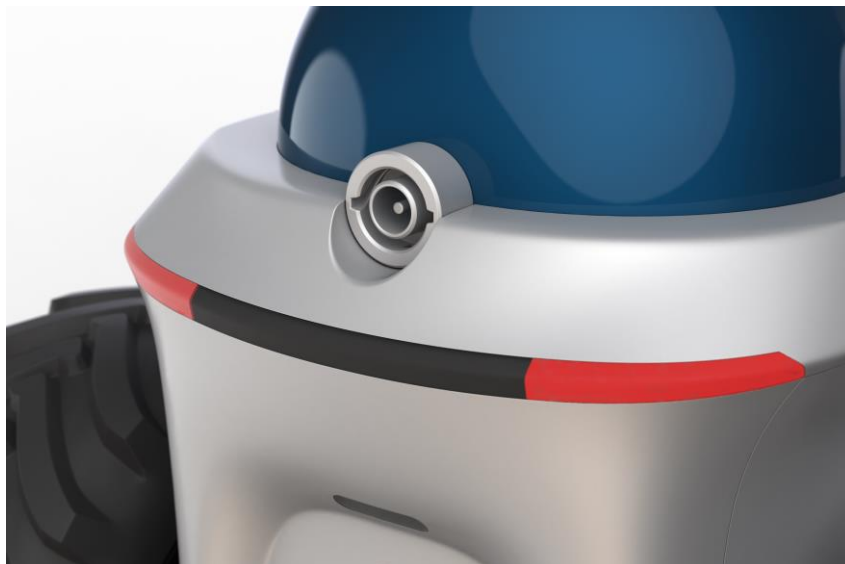


Obr. 6-20 Detailní pohled na zadní světla, změna barvy

Z důvodu nutnosti přesunu traktoru na pole po veřejných komunikacích, což je v Evropě běžnou praxí. Je použito barvu měnících LED světel, které mohou fungovat v bílém režimu při práci a červeném signalizačním režimu v provozu. K zajištění funkčnosti signalizace směru jízdy jsou implementovány LED světla s plným barevným rozsahem jak vepředu, tak vzadu a oranžové pulzy značí směr jízdy či krizovou signalizaci.

Ventil vodíkové nádrže

Ventil vodíkové nádrže ve středu horní části slouží k autonomnímu tankování vodíku. Je využito bajonetového mechanismu, který po navedení tankovací pistole dotáhne spojení. Ventil je do své poloviny zapuštěn v karoserii a je použito proměnného rádiusu u nově vzniklé hrany.



Obr. 6-21 Detailní pohled na ventil vodíkové nádrže

Z ortografického pohledu lze vidět mírné prohnutí zadní hrany se světly a senzory, které vizuálně uhýbá středu neboli ventilu palivové nádrže. A v dolní části vzniká kompozice z otvorů ramen závěsu a čelistem k upevnění adaptéru pro připojení nástroje.

Zároveň z tohoto pohledu působí celkově návrh, že má vysoké těžiště, což je způsobeno především objemnou nádrží. Avšak z konstrukčního hlediska se pod nádrží nachází hydraulický systém a baterie, což jsou jedny z nejtěžších vnitřních komponent.



Obr. 6-22 Zadní ortografický pohled

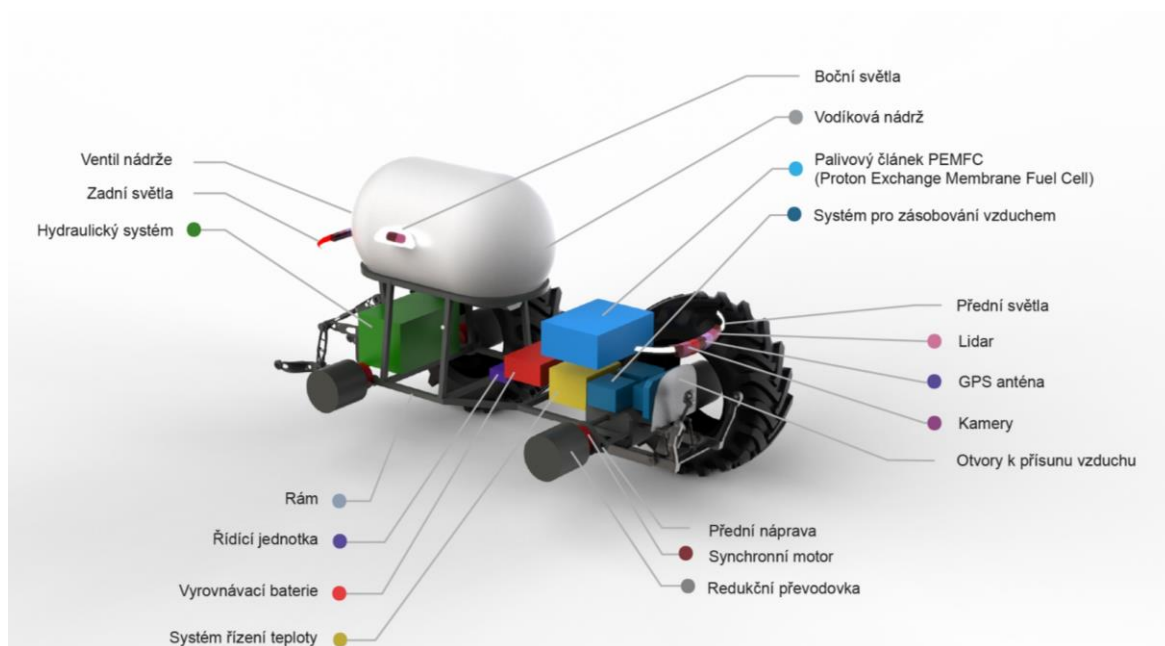
6.2 Konstrukční návrh

Řešení konstrukčního návrhu se zakládá na poznacích z technické analýzy a postupně prostupuje celou diplomovou prací. Avšak cílem práce není kompletní řešení konstrukčních součástí nýbrž jejich pochopení a vymezení potřebného prostoru. Vnitřní schéma komponent je pouze základní vzhled do možného funkčního rozvržení, které bude v realitě mnohem složitější. Z toho důvodu byl nechán dostatek prostoru pro veškeré rozvody, jejichž nastínění ukazuje GLASSBOX schéma ve čtvrté kapitole. Pro jednotlivé konstrukční řešení z hlediska vodíkového pohonu bylo nahlíženo na aktuální technické uspořádání podobných konceptů. Dále byl užitečným základem list technických specifikací traktoru John Deere 7R310, který velikostně a výkonově odpovídá řešenému návrhu. Detailní specifikace a popis vnitřních komponent byl řešen již v koncepčním návrhu a tvořil základ k tvarování celé karoserie.

Podvozek a nápravy

Podvozek je ve formě rámové konstrukce, na kterou jsou posazeny veškeré vnitřní komponenty. Přední části se nachází nezávisle řízené nápravy předních kol, což dovoluje k přesnějším manévrovacím schopnostem i v náročném terénu. Zadní náprava nedisponuje možností zatáčení a je pevná jako u dnešních běžných traktorů. všechny nápravy jsou hydraulicky odpružené, což zároveň dovoluje změnu světlé výšky či rekuperaci energie z tlumičů.

Vnitřní uspořádání

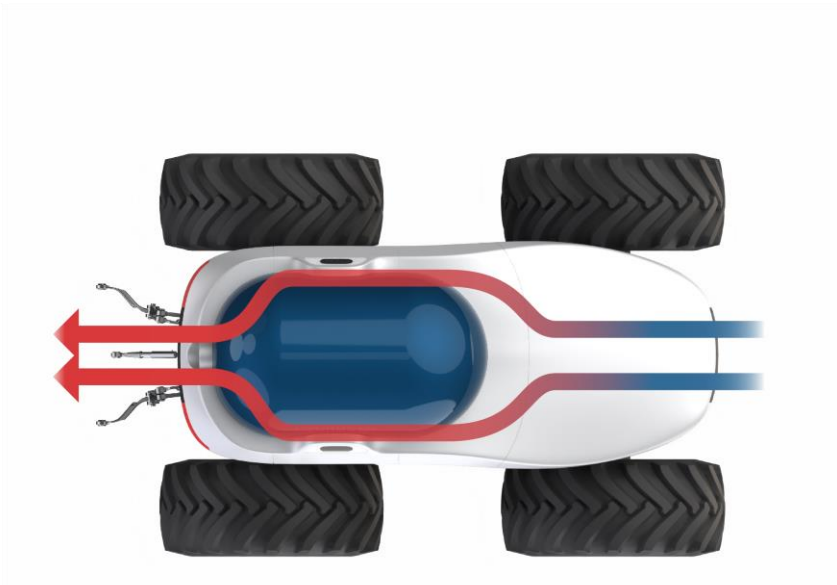


Obr. 6-23 Vnitřní schéma uspořádání komponent

Na vnitřní schématu můžeme vidět umístění elektromotorů s redukčními převodovkami do každého kola, což je výhodné z hlediska přesného řízení trakce a minimalizace poškození půdy. Zároveň díky tohoto řešení odpadá nutnost implementace diferenciálů. V přední části jsou situovány komponenty nutné k provozu PEM palivového článku, který jak již bylo zmíněno, vyžaduje teplotní regulaci a přísun čistého kyslíku, což zajišťuje filtrační systém pro zásobování vzduchem. Ve středu traktoru se nachází vyrovnávací baterie a řídicí jednotka. Je zde nechám dostatek prostoru pro veškeré rozvody a předpokládá se, že v těchto místech jich bude nejvíce. Vzhledem k rozmístění jednotlivých motorů v každém kole a nutnosti implementace senzorů do všech čtyř stran je toto umístění logické. V zadní části pod vodíkovou nádrží je prostor pro hydraulické systémy, které jsou klíčové pro zadní a přední tříbodový závěs či například hydraulické tlumiče.

Na schématu chybí zvažovaný systém sbírání vody, která vzniká jako odpadní produkt při práci palivového článku. Tato voda bude následně využita k ostříku senzorů v případě jejich zanesení, aby bylo vždy zajištěno, že autonomní navigace stroje funguje. Podobný systém můžeme například pozorovat u osobních automobilů, kde slouží k čištění předních světlometů. Jelikož budou rozvody vody směřovat k senzorům, je nutné při konstrukci dbát na bezpečnost vzhledem k ostatním elektrickým rozvodům. Dále je uvažována cirkulace vzduchu, který slouží k chlazení palivového článku a přísunu čistého kyslíku. Vzduch je veden přes funkční komponenty do zadní části, kde odchází skrze šachtu tříbodového závěsu a následně skrze otvory jednotlivých ramen. To způsobuje, že skrz otvory neustále proudí vzduch a tím zabraňuje vstupu nečistot do sestavy tříbodového závěsu čímž prodlužuje životnost.

I vzhledem k složitosti celého systému a jeho nárokům na čistotu pracovního prostředí byla zvolena plně uzavřená karoserie, aby docházelo k minimálnímu vnikání nečistot ke vnitřním komponentám.

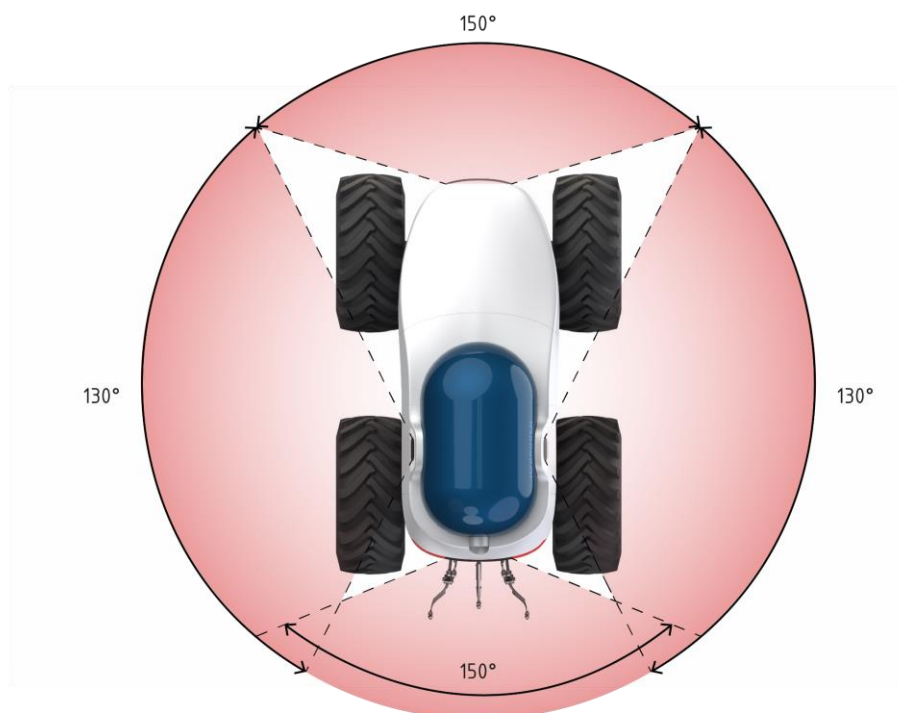


Obr. 6-24 Schéma cirkulace vzduchu

Systémy autonomní navigace

Jak již bylo zmíněno, byly implementovány systémy, které sbírají data o okolním prostředí. Data se následně v řídicí jednotce rozpoznávají a dle zadané práce koná stroj požadované úkoly. Z designového hlediska bylo klíčové umístění zmíněných systému tak, aby bylo zajištěno ideálního výhledu jak pro kamerové systémy, tak pro lidary či rádiové systémy. V přední části jsou veškeré senzory pohromadě v prostoru mezi předními světlomety, kde plní funkci navigace stroje, jako je sledování trasy či vyhýbání se překážkám, ale zároveň slouží k autonomnímu připojování nástrojů předního tříbodového závěsu. Z důvodu umístění zadních sensorických systémů výše, byla nutná implementace sekundárního sensorického systému k zajištění autonomní výměny nástrojů. Zároveň je pro obsluhu nutná vizuální kontrola konání práce stroje, k čemuž přispívá možnost různých úhlů pohledu. Pro boční sensorické systémy byla zvolena pouze kombinace kamer a lidarů, bez kontrolního rádiového snímače, a to z důvodu, že boční výhled není pro navigaci stroje tolik důležitý. Avšak velice důležitým komponentem jsou GNSS antény, které jsou umístěny v přední i zadní sensorické sadě a slouží jako hlavní informační zdroj o poloze stroje. Pro přesnější lokalizaci je využito systému RTK, který je uveden a vysvětlen v technické analýze.

Senzoriku a celkově autonomní pracování stroje podporují připojená zařízení, u kterých se předpokládá budoucí implementace dodatečných kamer a senzorů, například pro rozpoznávání jednotlivých rostlin a jejich selektivnímu postřiku. Díky těmto možnostem fungují připojené nástroje jako další zdroj informací k optimalizaci zemědělských procesů. Na obrázcích níže lze vidět okótované pozorovací úhly jak kamer, tak veškerých senzorů.



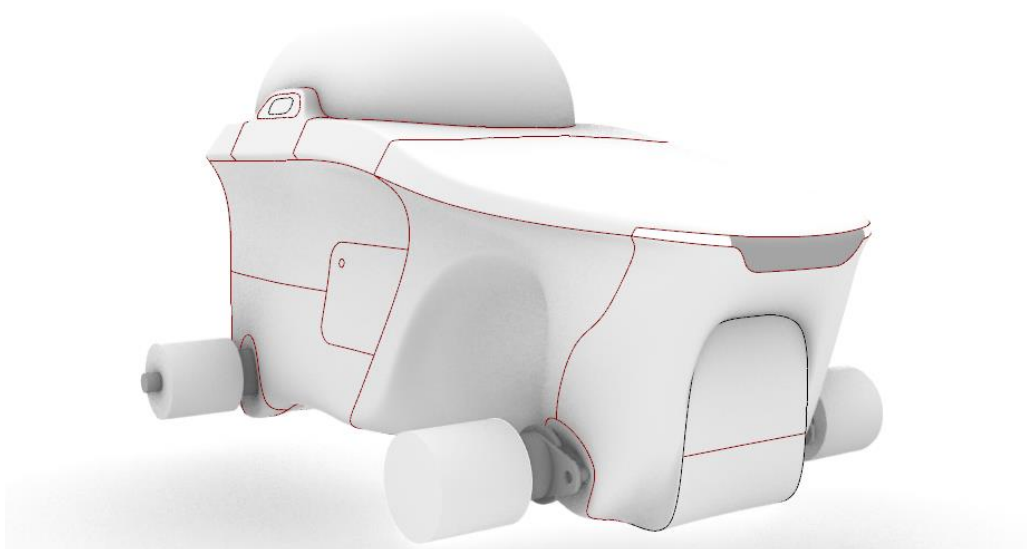
Obr. 6-25 Pozorovací úhly kamer a senzorů, pohled shora



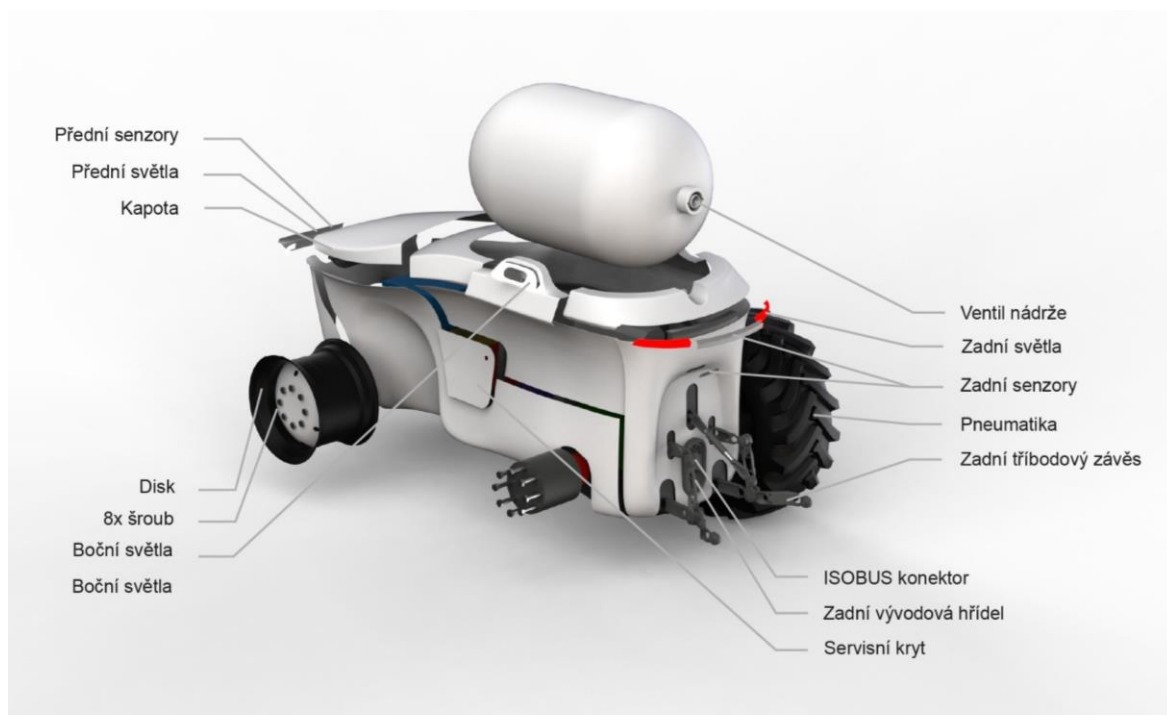
Obr. 6-26 Pozorovací úhly kamer a senzorů, pohled z boku

Karoserie

Dělení jednotlivých dílů karoserie bylo navrhováno s ohledem na vyrobiteľnosť jednotlivých dílů a estetický dopad dělicích linií. Původně bylo zamýšleno využití ocelových plechů, z důvodu lepší udržitelnosti a životnosti. Použití hluboko tažných ocelových plechů vyžaduje použití obrovských lisů, které běžně potkáváme v automobilovém průmyslu. Realisticky se nejspíš bude jednat o malosériovou výrobu, pro kterou je tato metoda příliš nákladná. Bylo tedy rozhodnuto o použití laminátu, který je pro malosériovou výrobu vhodný. Jelikož krytování karoserie slouží především k ochraně vnitřních komponent před vnějšími vlivy a k estetickému vyjádření návrhu, bude použití laminátu vhodné a s použitím povrchové úpravy, bude materiál dílců vizuálně nerozpoznatelný. Ve spodní části, ale přesto budou použity ocelové plechy, protože zde dochází k vyšší pravděpodobnosti poškození a zároveň mají pozitivní vliv na těžiště traktoru.



Obr. 6-27 Proces návrhu dělení karoserie



Obr. 6-28 Schéma vnějších komponent, exploded view

K popisu vnějších komponent a pochopení jejich umístění může posloužit explodovaný pohled viz obrázky výše.

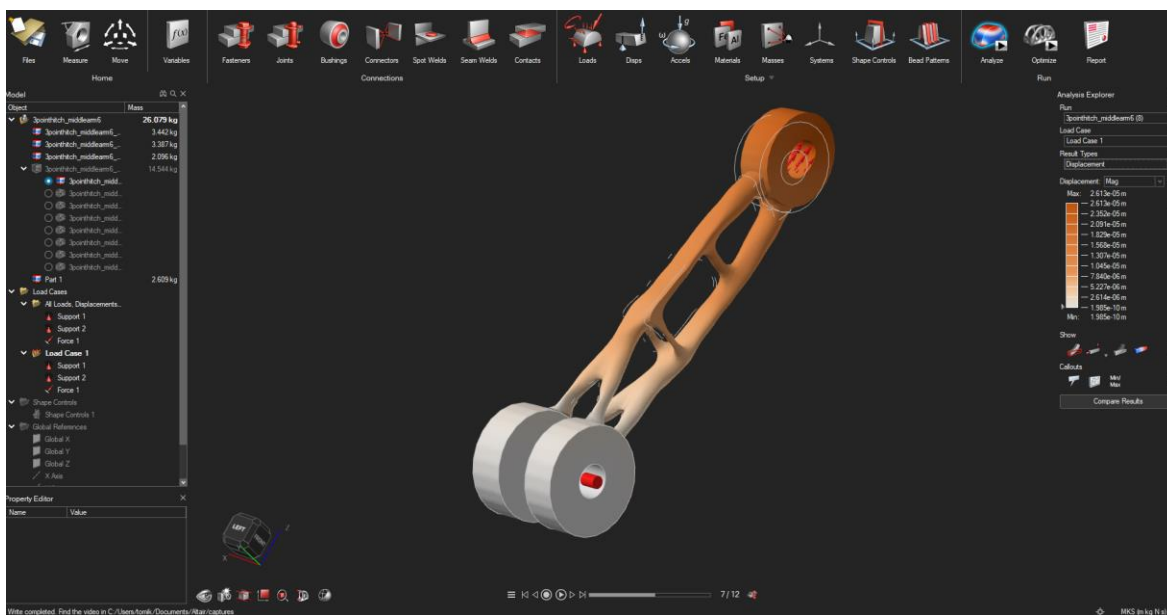
Připojení nástrojů

K připojení nástrojů ve přední či zadní části slouží třibodové závěsy. Jelikož je nutné splnit požadavky na plnou autonomitu stroje, bylo zapotřebí navrhnout, jak bude systém autonomní výměny nástrojů fungovat. Nabízely se možnosti vytvoření zcela nového řešení připojování nástrojů, avšak to by zapříčinilo nekompatibilitu se stávajícími zemědělskými nástroji. Aktuální nástroje prošly lety vývoje a byla by dle mého názoru škoda, aby byly pro tento koncept nepoužitelné. Bylo tedy rozhodnuto implementovat klasický třibodový závěs, který bude po většinu času osazen quick hitch systémem, který bude u protikusů na nástroji upraven přidáním kombinovaného adaptéru s hydraulickými a elektrickými přípojkami. Tím bude zajištěna jak kompatibilita se stávajícími zemědělskými nástroji, tak požadavek na autonomní výměnu nástrojů. Hlavní konstrukce byla zjednodušeně převzata z modelu traktoru John Deere 7R. V zadní části se jedná o třibodový závěs kategorie 3 s maximální nosností a zdvihem 10 tun. Přední částí následuje třibodový závěs kategorie 2, který disponuje nosností a zdvihem tří tun. Rozměry rozsahu pohybu třibodových závěsů odpovídá normovaným hodnotám pro danou kategorii.

Jednotlivá ramena byla poté topologicky optimalizována v programu Altair Inspire. Bylo přidáno odpovídající zatížení, a dále proběhl výpočet vznikajícího napětí v součástech. Na základě výpočtu napětí byla následně součást optimalizována s požadavkem na minimální bezpečnost ($k = 2$) a požadavkem na minimum materiálu. Na obrázcích níže je ukázán proces návrhu topologicky optimalizovaných součástí.



Obr. 6-29 Proces návrhu v programu Altair Inspire, zatížení a analýza



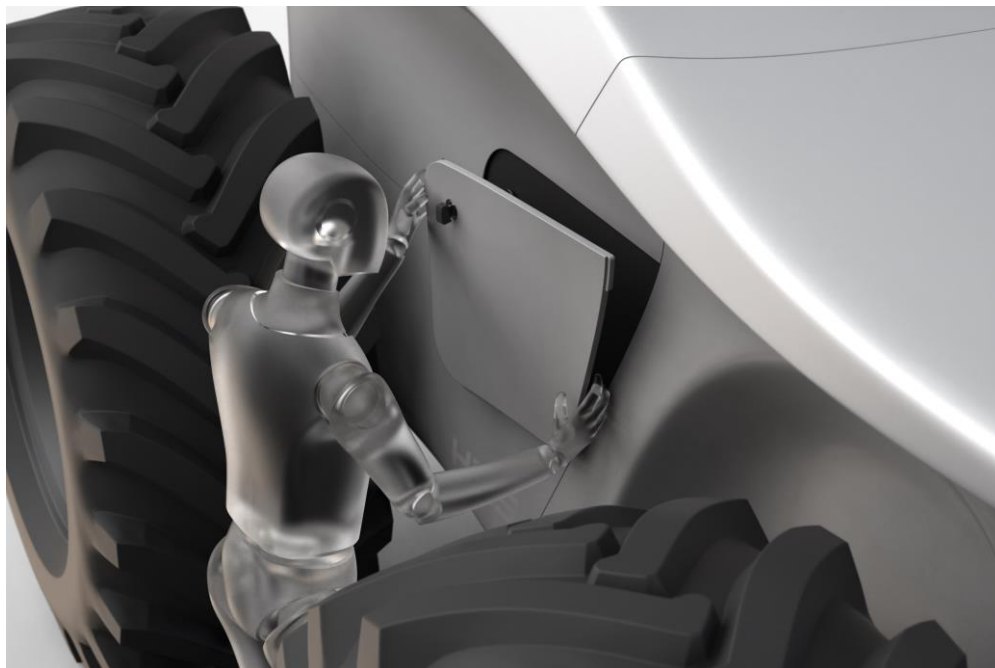
Obr. 6-30 Proces návrhu v programu Altair Inspire, analýza optimalizované součásti

Metoda topologické optimalizace byla využita ve zjednodušeném provedení, například nebylo počítáno s vlivy prostředí či s únavovým poškozením. Jedná se spíše o základ, který by bylo nutno více propracovat.

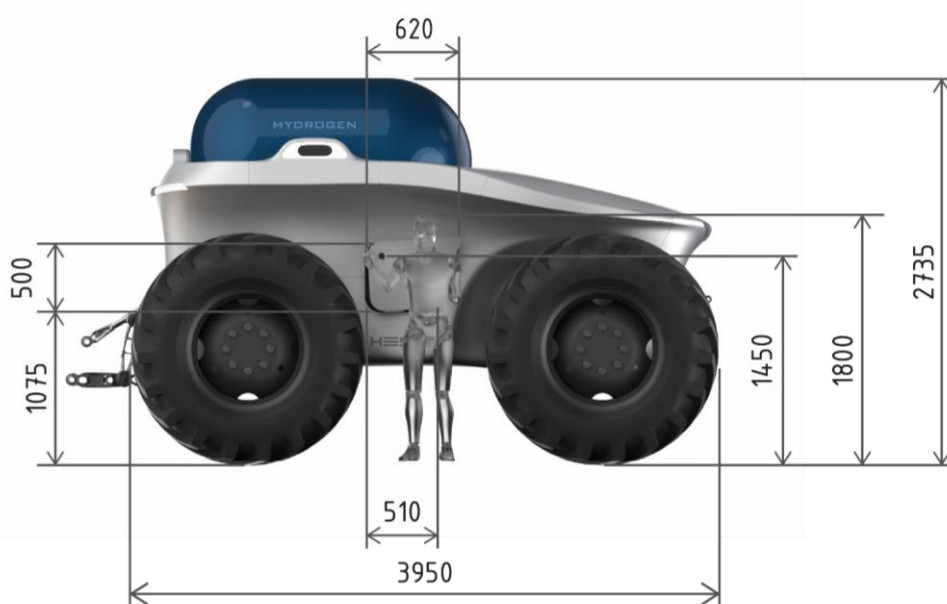
6.3 Ergonomické řešení a bezpečnost

Jelikož se jedná o autonomní stroj, přesune se většina komunikace uživatele s produktem do virtuálního prostoru. Zadávání a kontrola práce bude prováděna pomocí digitálního rozhraní a počítá se s možností ovládání jak z počítače, tak tabletu či chytrého telefonu.

Avšak stále bude nutný lidský zásah v případě údržby či servisu, a proto byly do řešení implementovány odnímatelné kryty po stranách karoserie, které slouží jako přístup k doplňování nebo výměně provozních kapalin či pokročilé diagnostice řídicí jednotky.



Obr. 6-31 Perspektivní pohled na odnímání bočního krytu, detail



Obr. 6-32 Boční ergonomický pohled

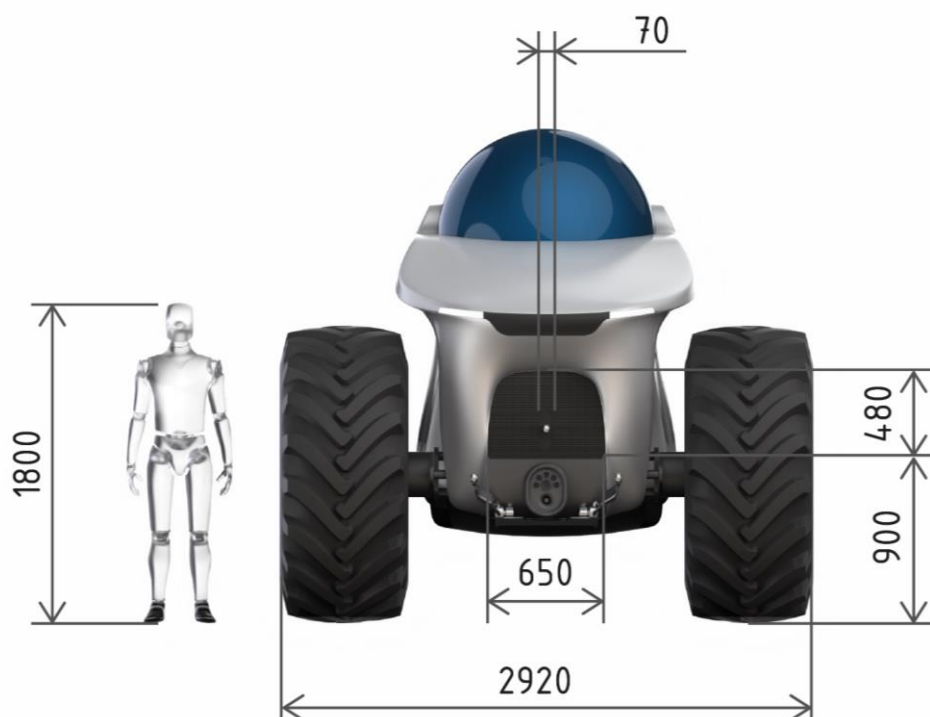


Obr. 6-33 Perspektivní pohled na odnímání bočního krytu

Jak již bylo zmíněno, palivový článek potřebuje k optimální reakci přísun kyslíku, který je získáván ze vzduchu skrz přední ventilační otvor. Následně probíhá filtrace, protože palivový článek požaduje vysokou čistotu vzduchu. Z těchto důvodů bylo myšleno na jednoduchou výměnu filtrů, a to pomocí odnímatelné přední mřížky. Ta je uchycená tvarově v dolní části, magnetickým páskem po obvodu a je pojištěna skrytým zámkem v horní části. Přístup k zámku je skrz otvor horního ramena tříbodového závěsu, kde potáhnutí klíčky odjistí horní zámek. Poté je nutné při odjímání mřížky dbát na zmíněné rameno závěsu.



Obr. 6-34 Perspektivní pohled na odnímání přední mřížky, detail



Obr. 6-36 Přední ergonomický pohled

Otvor ramene závěsů je dostatečně široký pro vložení čtyř prstů či menší dlaně. Podobného mechanismu je použito například u kapot automobilu, kde je nutné poslepu nahmatat páčku odjištění kapoty.



Obr. 6-35 Perspektivní pohled na odnímání přední mřížky

Ergonomické aspekty návrhu nekončí pouze u samostatné interakce s produktem, ale především u autonomního stroje u jeho vztahu k okolnímu prostředí. Je nutné zajistit, aby stroj nezpůsobil škodu na zdraví či majetku. Je nutné počítat se selháním veškerých systému či případnému kybernetickému útoku a poskytnout záložní systém, který traktor okamžitě zastaví. Ve finálním řešení je na klíči, který odemyká boční kryty také dvojice tlačítek, které budou pracovat zcela nezávisle nad tradičními systémy komunikace, a budou sloužit k okamžitému zabrzdění či v druhém případě, okamžitému vypnutí veškerých systémů.

6.4 Barevné a grafické řešení

6.4.1 Barevné řešení

Následující část práce se zaměřuje na detailní rozpracování barevného řešení autonomního traktoru. Představeny budou variantní návrhy finálního barevného schématu, přičemž všechny uvažované odstíny disponují metalickým efektem. Tento specifický typ povrchové úpravy způsobuje, že se vlivem dopadajícího světla a úhlu pohledu mění intenzita a sytost barvy, čímž je dosaženo dynamického a vizuálně atraktivního vzhledu. Metalické laky rovněž přidávají vnímané hodnotě a modernímu charakteru stroje, reflektující jeho technologickou vyspělost. V následujících odstavcích budou jednotlivé barevné varianty popsány a zdůvodněny z hlediska designérských principů a zamýšleného vizuálního sdělení.

Finální barevné provedení

Dominantním prvkem finálního barevného řešení je nádrž na vodík v sytě modré barvě RAL 5010 (Gentian Blue). Tato barva evokuje moderní technologie, čistotu a zároveň odkazuje na environmentální aspekt vodíkového pohonu.



Obr. 6-37 Finální barevné provedení

Kontrastní šedá barva RAL 7005 (Mouse Gray), použitá na kolech a přední části traktoru, zajišťuje vizuální stabilitu a technicistní vzhled, podtrhující jeho funkční charakter. Stříbrná metalíza karoserie RAL 9006 dodává celku sofistikovaný a progresivní vzhled, reflektující inovativní povahu autonomního zemědělského stroje. Toto barevné spojení vytváří harmonický celek, který vyjadřuje efektivitu a ekologickou uvědomělost.

Barevná varianta I – RAL 7004



Obr. 6-38 Barevná varianta I

První barevný variantní návrh pracuje s použitím signální šedé barvy RAL 7004 pro karoserii a kontrastní stříbrné RAL 9006 pro kola, přední část a nádrž, což vytváří monochromatický a technicistní dojem. Tento minimalistický přístup podtrhuje funkčnost a robustnost stroje, přičemž v tmavé barvě karoserie mírně zaniká její tvarování. Bělostříbrné akcenty na vybraných prvcích dodávají dostatečný kontrast, aniž by narušily celkovou střídmost barevného řešení a poutají pozornost k technickým řešením návrhu. Tato varianta oslovuje uživatele preferující nenápadný a profesionální vzhled zemědělské techniky.

Barevná varianta II – RAL 6010



Obr. 6-39 Barevná varianta II

Zelená barva RAL 6010 (Grass Green) použitá pro karoserii evokuje tradiční spojení zemědělství s přírodou a úrodnou půdou. V kombinaci s bělostříbrnými koly, přední částí a nádrží vzniká svěží kontrast. Tato varianta signalizuje ekologický aspekt pohonu a zároveň respektuje vizuální tradici zemědělských strojů. Bělostříbrné prvky dodávají designu lehkost a technologický nádech. Metalíza, podobně jako u předchozí varianty, ztmavuje základní barevný odstín a dochází k podobnému efektu, který byl zmíněn výše.

Barevná varianta III – RAL 1003



Obr. 6-40 Barevná varianta III

Kombinace signální šedé barvy RAL 7004 pro karoserii s výraznou žlutou barvou RAL 1003 (Signal Yellow) na kolech, přední části a nádrži vytváří vysoce kontrastní a dynamické barevné řešení. Žlutá, díky metalíze spíše oranžová, barva zvyšuje vizuální upozornění a zdůrazňuje klíčové funkční části traktoru. Tato varianta je vhodná pro uživatele, kteří preferují výrazný a extravagantní vzhled, který je dobře viditelný v terénu.

Barevná varianta IV – RAL 5015



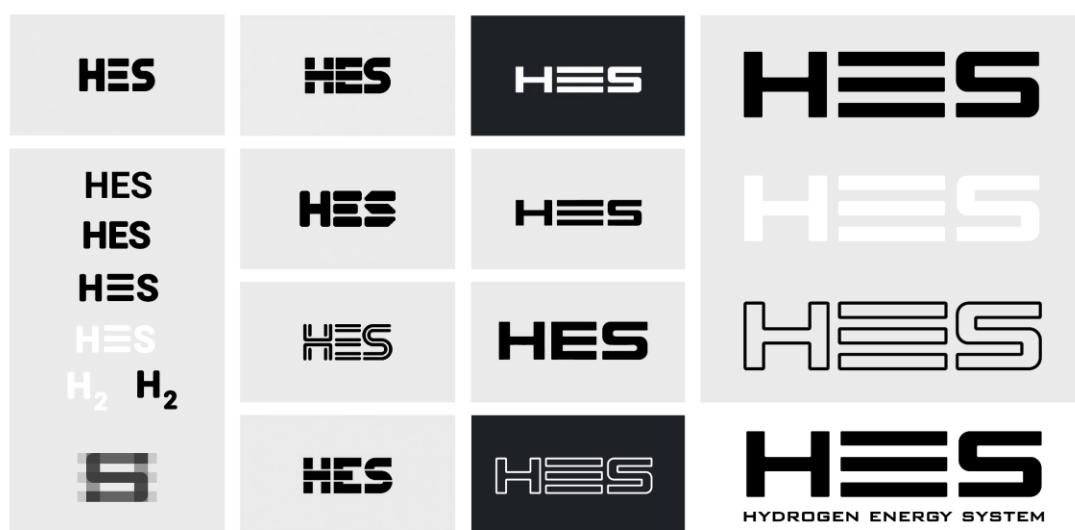
Obr. 6-41 Barevná varianta IV

Použití světle modré barvy RAL 5015 (Sky Blue) pro karoserii evokuje čistotu a moderní technologie. V kombinaci s bělostříbrnými koly, přední částí a nádrží vzniká svěží a optimistický vzhled. Tato varianta podtrhuje inovativní charakter vodíkového pohonu a autonomního provozu. Bělostříbrné detaily dodávají designu eleganci a futuristický nádech.

6.4.2 Grafické řešení

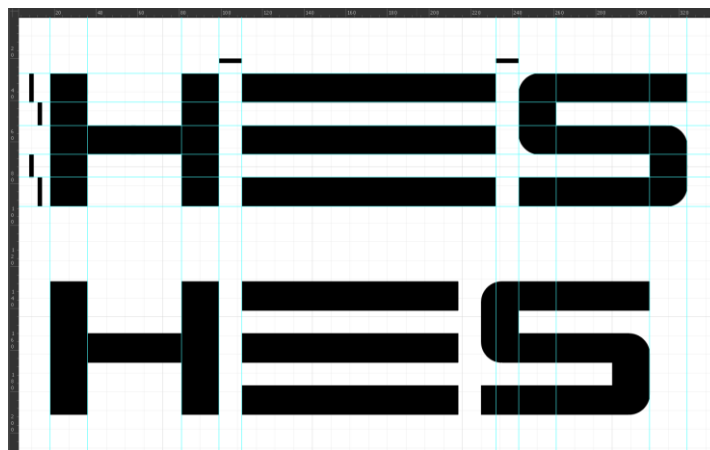
V následující podkapitole bude řešeno grafické zpracování logotypu produktu "HES – Hydrogen Energy System". Detailně bude analyzována jeho typografie, barevnost a kompoziční uspořádání. Následně bude probrána možnost umístění a integrace tohoto loga na autonomním traktoru s vodíkovým pohonem, s důrazem na zachování estetické soudržnosti a funkčnosti jednotlivých prvků.

Grafické řešení logotypu "HES – Hydrogen Energy System" se vyznačuje moderním a technicistním pojetím. Dominantním prvkem je zkratka "HES" provedená robustním, blokovým písmem s mírně zaoblenými hranami u písmena S, což mu dodává solidní a zároveň dynamický charakter. Horizontální členění písmene "E" pomocí tří rovnoběžných linií vytváří vizuálně zajímavý prvek a odkazuje na proudění energie či řádkování polnosti. Pod zkratkou je umístěn plný název "HYDROGEN ENERGY SYSTEM" písmem **Bank Gothic Medium BT**, které bude v rámci vizuální identity projektu využito pro nadpisy v kombinaci s písmem **Roboto** pro textové části. Toto bezpatkové písmo doplňuje a specifikuje význam zkratky.



Obr. 6-42 Proces návrhu logotypu

Celkové provedení loga působí kompaktně, sjednoceně a evokuje stabilitu a inovaci v oblasti energetických systémů. Černá barva loga na bílém pozadí zajišťuje výbornou čitelnost a univerzálnost pro různé aplikace. Na obrázku níže je znázorněno proporční a kompoziční schéma loga, které pro svou konstrukci využívá mřížky, zajišťující přesné a harmonické uspořádání jednotlivých prvků.



Obr. 6-43 Proporce a kompozice loga

Umístění loga "HES" je navrženo na boční straně traktoru ve spodní části. Tato pozice zajišťuje dobrou viditelnost z bočního pohledu, je záměrně umístěno mezi koly, aby grafika nenarušuje celkový design stroje z ostatních pohledů. Provedení je tvořeno matnou průhlednou folií. Nápis "HYDROGEN" bude aplikován přímo na povrch vodíkové nádrže. Pro dosažení vizuálně přitažlivého kontrastu a zdůraznění ekologického aspektu pohonu bude použit světle modrý odstín písma na tmavě modrém pozadí nádrže (RAL 5010). Tento jemný barevný kontrast zajistí dobrou čitelnost, zároveň bude esteticky korespondovat s celkovým barevným řešením traktoru a nebude příliš rušit celkový návrh.



Obr. 6-44 Grafické řešení finálního návrhu

Integrace loga do přední části traktoru ve formě světelného prvku představuje inovativní designové řešení, kde je navržena implementace technologie průhledných LED panelů. Tyto panely umožňují zobrazení svítícího loga "HES" na krytu senzorů a kamer, aniž by omezovaly jejich funkčnost. Technologie průhledných LED diod spočívá v umístění diod do transparentní matrice, která umožňuje průhlednost materiálu při vypnutých diodách. Po aktivaci diody vyzařují světlo a vytvářejí požadovaný obrazec loga. Tímto způsobem je dosaženo esteticky působivého prvku, který zároveň plní funkční roli ochranného krytu senzorů a kamer, aniž by narušoval jejich zorné pole. Tato implementace podtrhuje moderní a technologicky vyspělý charakter autonomního traktoru.



Obr. 6-45 Integrace loga do přední části

6.5 Udržitelnost produktu

Tato kapitola si klade za cíl komplexně zhodnotit ekologickou udržitelnost navrženého řešení autonomního traktoru s vodíkovým pohonem. Zaměřeno bylo na posouzení udržitelnosti samotného traktoru, zohledněny specifika vodíkového pohonu a materiálové aspekty jeho konstrukce. Následně byla analyzována vize zemědělství budoucnosti, integrující lokální výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů.

6.5.1 Udržitelnost autonomního traktoru

Samotný koncept vodíkového pohonu pro zemědělské stroje představuje z hlediska surovinové náročnosti potenciální výhodu oproti rozsáhlým bateriovým systémům. Palivové články, klíčová komponenta vodíkového pohonu, sice obsahují vzácné kovy jako platinu, avšak jejich množství je obecně nižší než objem vzácných a toxických prvků, potřebných pro výrobu rozsáhlých bateriových sad srovnatelného výkonu. Nicméně je nutné objektivně přiznat, že výroba takto technologicky vyspělého stroje s sebou nese značnou ekologickou stopu.

Konkrétní výzvou z hlediska udržitelnosti představují materiály použité na konstrukci traktoru. Laminátové kompozity, využívané pro karoserii z důvodu tvarovatelnosti a malosériovým možností výroby, jsou obtížně recyklovatelné. Separace jednotlivých složek, jako jsou skelná či uhlíková vlákna a epoxidová pryskyřice, je technologicky náročná a energeticky intenzivní. Podobně i vysoko hustotní polyetylen (HDPE), z něhož může být vyrobena vložka vodíkové nádrže, vyžaduje specifické postupy recyklace. Je proto nezbytné v případě dalšího vývoje aktivně hledat ekologicky šetrnější alternativy materiálů a optimalizovat design s ohledem na budoucí recyklovatelnost jednotlivých komponent. I přes potenciál vodíkového pohonu je klíčové přistupovat k celkovému návrhu traktoru s pohledem na minimalizaci jeho environmentálního dopadu v celém životním cyklu nebo alespoň prodloužit jeho životnost.

6.5.2 Vize udržitelného zemědělství budoucnosti

Navrhovaná vize zemědělství budoucnosti spočívá v synergickém propojení autonomního traktoru na vodíkový pohon s lokální, bezemisní výrobou vodíku přímo v zemědělském podniku. Tento integrovaný přístup má potenciál zásadně snížit závislost na fosilních palivech a externích energetických zdrojích, čímž přispívá k větší environmentální a ekonomické udržitelnosti zemědělského sektoru.

Současné metody výroby vodíku a přechod k bezemisním technologiím

V současnosti je dominantní metodou výroby vodíku parní reforming zemního plynu, proces, který je energeticky náročný a produkuje značné množství emisí oxidu uhličitého. Tento způsob výroby tak významně přispívá ke skleníkovému efektu a není v souladu s principy udržitelnosti. Nicméně, výroba vodíku elektrolýzou vody s využitím energie z obnovitelných zdrojů, jako je solární či větrná energie, představuje zcela bezemisní alternativu. Elektrolýza vody je elektrochemický proces, při kterém je voda (H_2O) rozkládána na vodík (H_2) a kyslík (O_2) pomocí elektrického proudu. Účinnost současných komerčně dostupných elektrolýzérů se pohybuje kolem 60 %, přičemž se intenzivně pracuje na vývoji účinnějších technologií, které by tuto hodnotu v budoucnu dále zvýšily.

Využití agrovoltaických systémů pro lokální výrobu vodíku

Koncept agrovoltaiky, tedy souběžného využití zemědělské půdy pro produkci potravin a solární energie, představuje elegantní řešení pro zajištění obnovitelného zdroje energie potřebné pro elektrolýzu vody a výrobu vodíku přímo na farmě. Jak uvádějí studie, agrovoltaika otevírá cestu k energetické soběstačnosti zemědělských podniků a snižuje závislost na fosilních palivech. [59] Výzkumy naznačují, že strategická instalace solárních panelů může mít i pozitivní vliv na mikroklima pod nimi, například snížením teploty půdy a výparu vody, což je zvláště výhodné v suchých oblastech. [60] Globální potenciál sluneční energie je enormní, a její využití v zemědělství skrze agrovoltaiku by mohlo znamenat zásadní transformaci v energetické nezávislosti tohoto sektoru. Ekonomicky agrovoltaické systémy nabízejí zemědělcům možnost diverzifikace příjmů prodejem přebytečné energie. [61]

Je však nutné pečlivě zvažovat vliv zastínění solárními panely na růst a výnosy různých plodin a optimalizovat návrh systémů s ohledem na specifické agronomické a klimatické podmínky. [59] Zemědělské podniky budou muset plánovat výsadbu plodin, pro které je částečné zastínění výhodné.

Matematický model a posouzení proveditelnosti agrovoltaického systému

Na základě výpočtů lze provést prvotní hodnocení proveditelnosti agrovoltaického systému pro pokrytí denní spotřeby vodíku autonomního traktoru. Bylo počítáno s průměrným pracovním časem 10 hodin denně, protože v praxi traktory pracují v závislosti na ročním období, velikosti polnosti a jiných faktorech.

Denní spotřeba vodíku: $6,6 \text{ kg/hod} \times 10 \text{ hod} = 66 \text{ kg/den}$.

Energie pro výrobu vodíku:

K výrobě 1 kg vodíku je potřeba 52,5 kWh (při účinnosti elektrolýzérů ~60 %)

Celková denní energie: $66 \text{ kg} \times 52,5 \text{ kWh/kg} = 3\,465 \text{ kWh/den}$

Potřebná plocha solárních panelů, při průměrné denní insolaci $4,5 \text{ kWh/m}^2$ a účinnosti panelů 20 %:

$$\frac{3\,465 \text{ kWh}}{4,5 \text{ kWh/m}^2 \times 0,20} = 3\,850 \text{ m}^2 (\approx 0,38 \text{ ha})$$

Ve velkých zemědělských podnicích může dojít k plnému vyřízení traktoru, tudíž byl proveden výpočet potřebné plochy panelů k uspokojení požadavků na palivo při nonstop provozu. Výsledná plocha vzroste na 9240 m^2 (0,92 ha). [62]

Tento výpočet ukazuje, že pro pokrytí denní spotřeby vodíku by při současných technologiích, byla zapotřebí relativně rozsáhlá plocha solárních panelů, přibližně 0,38 hektaru pro desetihodinový denní provoz a 0,92 ha k zajištění neustálého provozu 24 hodin denně. Tato plocha může být pro střední i velké zemědělské podniky značnou výzvou.

S ohledem na budoucí vývoj technologií, se v následujících letech předpokládá zvýšení účinnosti solárních panelů, tudíž byl proveden odhad a upravený výpočet. Růst z 20 % na 30–40 %, například díky technologiím jako perovskitové články. [63] Zlepšení elektrolyzérů sníží spotřebu na 45–48 kWh/kg, tudíž vznikne nárůst účinnosti na ~70 %. Po započítání nových hodnot účinností, získáváme tyto výsledky

Pro deseti hodinový provoz:

Při 30% účinnosti panelů: $\approx 2\,200 \text{ m}^2$ ($\approx 0,22 \text{ ha}$)

Při 40% účinnosti panelů: $\approx 1\,650 \text{ m}^2$ ($\approx 0,17 \text{ ha}$)

Pro dvaceti čtyřhodinový provoz:

Při 30% účinnosti panelů: $\approx 5\,280 \text{ m}^2$ ($\approx 0,53 \text{ ha}$)

Při 40% účinnosti panelů: $\approx 3\,960 \text{ m}^2$ ($\approx 0,40 \text{ ha}$).

I s očekávaným nárůstem účinnosti solárních panelů a elektrolyzérů bude stále zapotřebí významná plocha pro instalaci agrovoltaických systémů. Je však nutné zdůraznit, že agrovoltaika umožňuje souběžné využití této plochy pro zemědělskou produkci, čímž se maximalizuje efektivita využití půdy, sníží se odpar, a tudíž i degradace půdy. Průměrný zemědělský podnik, má dle sčítání průměrně 121 ha na podnik, tudíž prostor k implementaci je, avšak pokulhává legislativa, která zatím nedovoluje využití agrovoltaiky. A v neposlední řadě je překážkou finanční stránka věci.

Alternativní řešení: Využití větrné energie pro výrobu vodíku

Alternativou k agrovoltaickým systémům pro zajištění bezemisní výroby vodíku se nabízí využití větrné energie. Tento přístup je zvláště relevantní pro zemědělské podniky nacházející se v oblastech s příznivými větrnými podmínkami.

V matematickém modelu bude opět srovnání 10 hod. a 24 hod. provozu (66 kg H₂/den a 158,4 kg H₂/den) vzhledem k současným a předpokládaným budoucím vývojem:

Požadovaná energie při současné účinnosti elektrolyzéry (60 %):

$$66 \text{ kg} \times 52,5 \text{ kWh/kg} = 3\,465 \text{ kWh/den}$$

$$158,4 \text{ kg} \times 52,5 \text{ kWh/kg} = 8316 \text{ kWh/den}$$

Při kapacitním faktoru 30 %, který je typický pro vnitrozemské oblasti, potřebujeme turbínu o výkonu:

$$\frac{3\,465 \text{ kWh}}{24 \text{ h} \times 0,30} = 481 \text{ kW}$$

$$\frac{8316 \text{ kWh}}{24 \text{ h} \times 0,30} = 1155 \text{ kW}$$

Studie z Kanady ukázala, že turbína EWT Directwind 500/54 s výkonem 500 kW vyrobí 15,62 tun H₂/rok ($\approx 42,8$ kg/den), což je blízké požadované spotřebě. Pro pokrytí 66 kg/den či dokonce 158,4 kg/den by bylo třeba více turbín, vyšší výkon nebo vyšší kapacitní faktor, čímž se dostáváme k předpokládanému vývoji za 30 až 40 let (2055–2065). [64]

Očekává se zvýšení kapacitního faktoru na 45 %, díky implementace vertikálních turbín, a zvýšení účinnost elektrolyzéry na 70 % (spotřeba energie klesne na 45 kWh/kg), čímž se sníží výkonová náročnost následovně:

$$\frac{66 \text{ kg} \times 45 \text{ kWh/kg}}{24 \text{ h} \times 0,30} = 275 \text{ kW}$$

$$\frac{158,4 \text{ kg} \times 45 \text{ kWh/kg}}{24 \text{ h} \times 0,30} = 660 \text{ kW}$$

Potenciál větrné energie ukazuje příklad z Indie, kde turbína Suzlon S144 (3,0 MW) s kapacitním faktorem 50,51 % vyrobí 239,86 tun H₂/rok (≈ 657 kg/den). Pro malou farmu postačí menší turbína (např. 1 MW s kapacitním faktorem 45 %). [65]

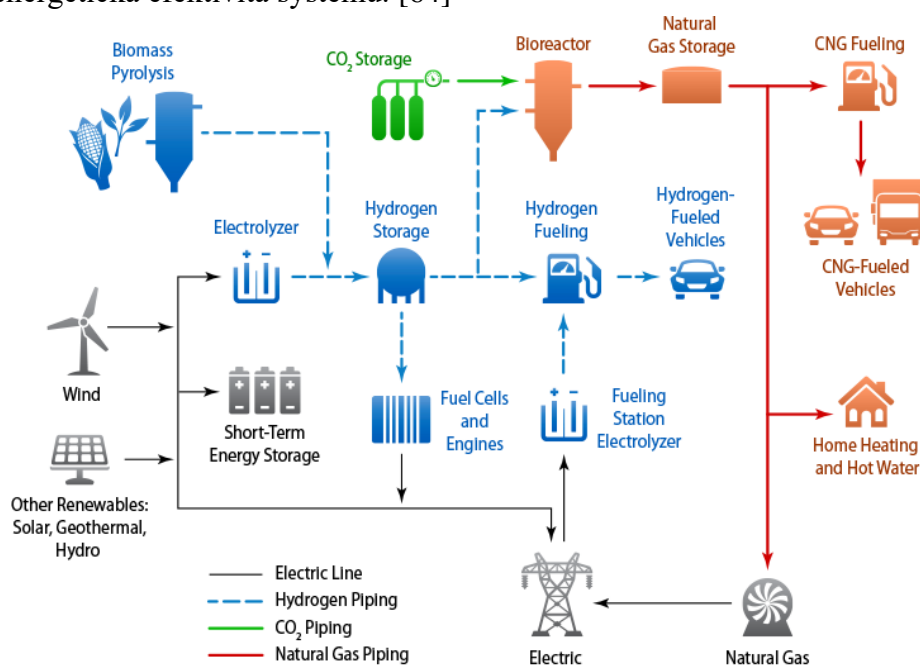
Srovnání agrovoltaiky a větrné energie

Parametr	Větrná energie (současnost)	Větrná energie (budoucnost)	Agrovoltaika (budoucnost)
Instalovaný výkon	500 kW	300 kW	1,65–2,75 MW (FVE)
Potřebná plocha	0,05 ha (pro turbínu)	0,03 ha (pro turbínu)	0,17–0,22 ha
Účinnost systému	30 % (kapacitní faktor)	45 % (kapacitní faktor)	30–40 % (FVE)
Náklady na údržbu	Vyšší	Nižší	Střední

Tab. 6-1 Srovnání obnovitelných zdrojů k výrobě vodíku

Oba přístupy, agrovoltaika i větrná energie, nabízejí potenciál pro udržitelnou lokální výrobu vodíku. Agrovoltaika vyžaduje větší plochu, ale umožňuje souběžnou zemědělskou produkci a může mít pozitivní vliv na mikroklima, což vede k možnosti diverzifikovat portfolio pěstovaných plodin. Větrná energie je vhodná pro větrné oblasti, a bylo by nutné provést detailní analýzu oblasti. Turbína využívá minimální prostor z hlediska půdy, avšak skýtá negativa v podobě vlivu na ptactvo či může působit jako rušivý element na obzoru.

Optimálním řešením pro mnoho farem by mohla být kombinace obou zdrojů v hybridním systému, čímž by se snížila závislost na výkyvech počasí a maximalizovala spolehlivost dodávky energie. Inženýři z amerického NREL (National Renewable Energy Laboratory) vyvíjí systém, který dále rozvíjí tuto problematiku viz obrázek níže. Dále lze zvážit využití odpadního tepla z elektrolyzérů pro vytápění hospodářských budov, čímž se dále zvyšuje celková energetická efektivita systému. [64]



Obr. 6-46 Various scenarios for producing renewable hydrogen and electricity [64]

Závěrem lze konstatovat, že integrace autonomního traktoru na vodíkový pohon s lokální výrobou vodíku z obnovitelných zdrojů představuje slibnou cestu k dosažení větší environmentální a ekonomické udržitelnosti v zemědělském sektoru. Pečlivé zvážení lokálních podmínek, optimalizace technologií a integrace různých obnovitelných zdrojů energie bude klíčové pro úspěšnou implementaci této vize.

6.6 Hodnocení klíčových parametrů

Tato diplomová práce začala převážně definicí, jaké klíčové parametry bude návrh obsahovat. V zadání práce bylo zpracovat technicky výtvarnou studii autonomního traktoru na alternativní pohon, tudíž výběr specifikací produktu byl také předmětem této práce a výrazně ovlivnil finální vzhled. V prvopočátku bylo přemýšleno o práci na nejvyšší výkonnostní kategorii traktoru, vhodného pouze pro největší polnosti v Austrálii, Americe či na Ukrajině, a to z důvodu, minimální potřeby zásahu řidiče. Také se jedná o nejvíce monotónní práci, ideální pro autonomní stroj. Při rešerši a konzultaci bylo od této myšlenky upuštěno a zaměření práce změněno. Bylo rozhodnuto věnovat se středně velké kategorii traktoru, vhodné pro evropské, tudíž i české polnosti.

Po důkladné analýze a srovnání jednotlivých typů pohonu vhodných pro výkonnostní kategorii nad 150 kW, bylo zvoleno jít cestou vodíkového pohonu. Lépe řečeno implementaci elektromotorů, poháněných přes vyrovnávací baterii, kterou dobíjí PEM palivový článek. Toto rozhodnutí hodnotím, jako jedno z definujících směřování celé diplomové práce. Celkové tvarování a proces hledání variantních návrhů probíhal na základě dílčího cíle, přizpůsobit estetiku vodíkovému pohonu. Při práci vznikla inovativní myšlenka odhalit vodíkovou nádrž, která dále určovala tvarování karoserie. Toto řešení hodnotím jako velmi progresivní vzhledem k zvolenému alternativnímu pohonu a jeho vyjádření, a vzhledem k psychologické funkci nádrže, která připomíná chybějící kabinu řidiče. Po zpracování předběžného návrhu z varianty II, bylo rozhodnuto se vrátit zpět a změnit základní tvarování, včetně tvaru nádrže směrem varianty I. Toto rozhodnutí bylo v počátku velice těžké a zásadně ovlivnilo finální výsledek diplomové práce. Na základě připomínek byl zpracován nový návrh, kde po určení základního tvarování karoserie, bylo pracováno na implementaci funkčních komponent k zajištění autonomního provozu. Finální řešení splňuje výhledové charakteristiky kamer a senzorů. Tyto prvky jsou na všech stranách propojeny s osvětlením, které umožňuje práci za tmy a přesun po veřejných komunikacích, což byl také jeden z cílů vývoje. Spojením vzniká přední maska, která navazuje na tvarování karoserie a dodává návrhu specifický výraz a vzhled.

Z bočního pohledu hodnotím prvky vystupující z karoserie, které vizuálně upevňují nádrž za povedené. Rozbívá jednoduchost tvarování kolem nádrže, upevňují ji v tvarování, a přitom plní důležitou funkci vzhledem k autonomnímu provozu. V zadní části slouží prvky světel a senzorů mimo jiné jako oddělení nástrojové části, a části týkající se doplňování vodíku, což má z mého hlediska pozitivní kompoziční dopad. Tvarové řešení třibodových závěsů pomocí metody topologické optimalizace může být do budoucna progresivním přístupem, který zanechává poutavý vizuální dojem. Zvolení klasických normovaných závěsů s využitím rychloupínacího mechanismu (quick hitch) hodnotím jako vstřícný přístup k možnostem využití starších, ale funkčních nástrojů, při zachování autonomní výměny. Klíčovým parametrem je udržitelnost návrhu, která není z výrobního hlediska a recyklovatelnosti materiálů příliš pozitivní, ale výrazně lepší než při použití bateriových systémů. Hlavní pozitivní dopad na udržitelnost návrhu má jeho bezemisní provoz po celou dobu životnosti, díky implementaci agrovoltaického systému a elektrolyzérů k výrobě vodíku lokálně.

7 ZÁVĚR

V úvodní fázi práce bylo nezbytné zvolit optimální technologii alternativního pohonu pro budoucí autonomní zemědělské traktory. Klíčové bylo posoudit relevanci kabiny řidiče u plně autonomního stroje pro střední a velké polnosti v evropském kontextu (s výhledem na 30–40 let), a zároveň rozhodnout o typu podvozku (pásový či kolový), neboť obě volby mají zásadní vliv na estetický výraz výsledného designu.

Na základě důkladné designérské a technické analýzy bylo zvoleno vodíkové palivo, které je v PEM palivovém článku elektrochemicky přeměňováno na elektrickou energii s vedlejším produktem – vodou. Tato elektrická energie následně prostřednictvím vyrovnávací baterie pohání elektromotory integrované s redukčními převodovkami v každém kole. Společně s absencí kabiny řidiče a volbou kolového podvozku, z důvodu nutnosti přesunu po veřejných komunikacích, tvořila tato rozhodnutí klíčovou premisu pro tvarování celého návrhu.

Design je inovativní především odhalením velké vodíkové nádrže v prostoru chybějící kabiny, která symbolizuje vodíkový pohon a vizuálně zaujímá dominantní pozici, čímž napomáhá akceptaci nové koncepce plně autonomního provozu. Toto inovativní řešení se odráží ve tvarování karoserie, jež plynule navazuje na vodíkovou nádrž s využitím hlavní vlny, která volně přechází do zaoblení v přední části, kde se napojuje na světlometry a senzorické systémy. V zadní části jsou na této linii umístěny zadní senzory, kamery a hlavní osvětlení, sloužící jak k osvětlení pracovní plochy, tak k signalizaci při provozu na veřejných komunikacích. Tvarování a barevné provedení decentně odlišuje přední a zadní funkční zóny pro připojení nástrojů a mřížky ventilace. Pro zachování soudržnosti návrhu jsou použity opakující se tvarové motivy připomínající řez nádrže. Ke konstrukci tříbodových závěsů byla využita technologie topologické optimalizace, která na základě výpočtů zatížení navrhla organicky tvarovanou součást s optimálním rozložením materiálu vzhledem k zatížení, což vedlo ke specifickému estetickému výrazu.

Výsledkem diplomové práce je komplexní výtvarně-technická studie autonomního zemědělského traktoru s alternativním vodíkovým pohonem na bázi PEMFC a výkonem 200 kW. Pohonná jednotka, prostřednictvím vyrovnávací baterie, napájí řídicí jednotku, systém řízení kol, elektromotory integrované v každém kole, elektromotory externích vývodových hřídelí, hydraulický systém, systém regulace teploty, systém přísunu čistého vzduchu a další palubní systémy. Práce se podrobně zabývala technickým řešením s cílem poskytnout ucelený přehled a odhad vnitřních a vnějších komponent budoucích autonomních traktorů, což vytvořilo reálný základ pro estetické zpracování karoserie. Tato práce poskytla široký přehled o aktuálních řešeních autonomních traktorů, zabývající se jak technickými, tak převážně výtvarnými aspekty, přičemž přinesla vlastní inovativní přístup.

Zvolený alternativní pohon je dále podpořen řadou zjednodušených výpočtů, které například odhadují dobu provozu traktoru na jednu nádrž na 16 hodin. Práce rovněž řeší problematiku lokální výroby vodíku z obnovitelných zdrojů přímo v místě zemědělské činnosti. Výsledky výpočtů ukazují, že plocha solárních panelů v rámci agrovoltaického systému pro nepřetržitý provoz jednoho traktoru by se v budoucnu mohla pohybovat kolem 0.20 ha. Ačkoliv je toto číslo zanedbatelné vzhledem k průměrné velikosti českého zemědělského podniku (121 ha), celková investice do elektrolyzérů, skladovacích nádrží, autonomního traktoru a adaptérů na stávající nástroje by byla značná. Právě z těchto důvodů je tento návrh koncipován jako vize do budoucnosti za 30–40 let, kdy se investice do systémů cirkulární ekonomiky a trvalé udržitelnosti, nejen v zemědělském průmyslu, stanou ekonomicky a technologicky přijatelnějšími. I přes komplikace vzniklé změnou varianty splnil výsledný návrh všechny definované cíle práce a poskytl zajímavou vizi designu budoucích zemědělských traktorů následujících desetiletí.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Druh výsledku	Funkční vzorek
Název výsledku	Autonomní zemědělský traktor
Autoři	Bc. Tomáš Kárych
Původci	-
Místo uložení výsledku	VUT Brno

Tab. 8-1 Výsledek výzkumu RIV

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HARIK, El Houssein Chouaib; GUINAND, Frédéric a GEIPEL, Jakob. A Semi-Autonomous Multi-Vehicle Architecture for Agricultural Applications. Online. *Electronics (Basel)*. 2023, roč. 12, č. 17, s. 3552. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/electronics12173552>. [cit. 2024-06-03].
- [2] *Claas Digitální řešení*. Online. Claas. 2024. Dostupné z: https://www.claas.cz/produkty/Digitalni-reseni?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=digistory_2023&utm_content=ad_375&utm_term=claas_connect&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw0WyBhDMARIsAL1Vz8sv6PjEIqZix4V7uigSQkMnDSikQHRsudlFOLV37L_yFmNSLYXfJiEaAnkMEALw_wcB. [cit. 2024-06-03].
- [3] HAMMES, Stephan a WOOPEN, Thomas. Roadmap 2030 - Perspective on Future Tractor Technology. Online. *ATZheavy duty worldwide*. 2019, roč. 12, č. 3, s. 32-35. ISSN 2524-8774. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s41321-019-0037-3>. [cit. 2024-06-03].
- [4] *Engineering of Smart Agriculture*. Online. 2023. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. ISBN 3036594973. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9497-2>. [cit. 2025-05-22].
- [5] ANDREW, F. W. Driverless tractor. *Popular Mechanics*. 1940, roč. 1940, č. 74, s. 7-8. ISSN 0032-4558.
- [6] *Driverless Tractors*. Online. Southeast AgNet. 2016. Dostupné z: <https://southeastagnet.com/2016/04/12/agri-view-driverless-tractors/>. [cit. 2025-04-14].
- [7] TILLET, N. D. Image analysis for autonomous guidance of agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1994, roč. 1994, č. 11, s. 187-202. ISSN 0168-1699.
- [8] ROBERT, P. C. Precision agriculture: a future farming perspective. *Journal of Production Agriculture*. 1997, roč. 1997, č. 10, s. 14-23. ISSN 0890-8524.

- [9] KHAN, M. A. a YULE, I. J. Autonomous agricultural vehicles for broad-acre farming: A review. *Precision Agriculture*. *Precision Agriculture*. 2016, roč. 2016, č. 17(6), s. 875-903. ISSN 1573-1618.
- [10] OLSEN, M. T. a ŠŘRUM, H. Semi-autonomous steering of agricultural tractors. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2000, roč. 2000, č. 25, s. 175-191. ISSN 0168-1699.
- [11] GARCÍA-MATEOS,, Ginés; PARRAS-BURGOS, Dolores a MARTÍNEZ, José Miguel Molina. *Agriculture 4.0 – The Future of Farming Technology*. Online. 2023. MDPI, 2023. ISBN ISBN978-3-0365-9759-1. Dostupné z: https://mdpi-res.com/bookfiles/book/8467/Agriculture_40_The_Future_of_Farming_Technology.pdf?v=1710747174. [cit. 2024-03-18].
- [12] CASE IH AUTONOMOUS CONCEPT, FORWARD FARMING. *Auto & Design*. 2017, roč. 2017, č. 222, s. 22-26. ISSN 0393-8387.
- [13] *VIDEO Autonomous Tractor: Case IH Concept*. Online. YOUCAR. 2017. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=i8yChqU4mBE>. [cit. 2025-04-14].
- [14] LEMKEN. *Krone and LEMKEN present autonomous system*. Online. 2024. Dostupné z: <https://lemken.com/en-en/news/agriculture-news/detail/combined-powers>. [cit. 2024-04-28].
- [15] *Combined Powers: The next level of automated agriculture*. Online. 2023. Dostupné z: <https://combined-powers.com/en/>. [cit. 2024-04-21].
- [16] Combined Powers VTE: Better together? Online. *Profi Farm Machinery Magazine*. 2022, roč. 2022. Dostupné z: <https://www.profi.co.uk/test-centre/tractors/combined-powers-vte-better-together/>. [cit. 2025-04-14].
- [17] *Autonomous, electric tractor could be the future face of smart farming*. Online. CNET. 2020. Dostupné z: <https://www.cnet.com/roadshow/news/autonomous-electric-tractor-future-farming/>. [cit. 2025-04-14].
- [18] *John Deere debuts autonomous one-axle, electric drive tractor concept*. Online. RealAgriculture. 2019. Dostupné z: <https://www.realagriculture.com/2019/11/john-deere-debuts-autonomous-one-axle-electric-drive-tractor-concept/>. [cit. 2025-04-14].

- [19] *Valtra H202 Series Concept*. Online. Behance. 2017. Dostupné z: <https://www.behance.net/gallery/55034391/Valtra-H202-Series-Concept>. [cit. 2025-04-18].
- [20] *Valtra H202 – Traktor bez vodiča*. Online. Automagazin. 2020. Dostupné z: <https://automagazin.sk/2019/02/22/valtra-h202-traktor-bez-vodica/>. [cit. 2025-05-02].
- [21] *Belarus shows autonomous tractor prototype*. Online. FUTURE FARMING. 2021. Dostupné z: www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semiauto-steering/autonomous-vehicles/belarus-shows-autonomous-tractor-prototype/. [cit. 2025-05-02].
- [22] *Már az MTZ/Belarus is teszteli az önműködő traktorát, ami ráadásul jól is néz ki*. Online. Agrár Unió. 2023. Dostupné z: <https://www.agrarunio.hu/hirek/gepesites/9637-mtz-belarus-traktor-onmukodo-teszt-szantas-kaszalas-hibrid>. [cit. 2025-05-02].
- [23] JÄRVINEN, Joonas. *Valtra Phantom*. Online. Autodesk community project gallery. 2018. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/community/gallery/project/135436/valtra-phantom>. [cit. 2025-05-02].
- [24] PROESSLER, Christoph. *About me*. Online. Christoph Proessler. Dostupné z: <https://www.christophproessler.com/about>. [cit. 2025-05-02].
- [25] PROESSLER, Christoph. *Bolid*. Online. Designboom. 2012. Dostupné z: <https://www.designboom.com/readers/christoph-proessler-bolid/>. [cit. 2025-05-02].
- [26] *MOD² concept wins Valtra Design Challenge*. Online. Profi - The Farm Machinery magazin. 2017. Dostupné z: <https://www.profi.co.uk/news/mod%20B2-concept-wins-valtra-design-challenge/>. [cit. 2025-05-03].
- [27] MANSILLA, Juan Garcia; MADIA, Marcos; CASTRO, Ezequiel a PHELAN, Sylvester. *Design Challenge winners revealed*. Online. Agriland. 2017. Dostupné z: <https://www.agriland.ie/farming-news/glimpse-of-the-future-valtra-design-challenge-winners-revealed/>. [cit. 2025-05-03].

- [28] *Thermal Imaging in Agriculture: Crop Production and Animal Husbandry*. Online. Infratec. 2025. Dostupné z: <https://www.infratec.eu/thermography/industries-applications/agriculture/>. [cit. 2025-05-03].
- [29] MURPHY, Mike. *128-laser LiDAR sensor significantly sharpens autonomous cars' vision*. Online. Newatlas. 2017. Dostupné z: <https://newatlas.com/velodyne-lidar-vls-128-sensor/52453/>. [cit. 2025-05-03].
- [30] HWANG, Changho; KIM, Yong-Hyun a KIM, Hak-Jin. Development of Sensor Fusion-based Obstacle Detection and Collision Avoidance Technology for Autonomous Tractor. Online. *Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society*. Roč. 2024. Dostupné z: <https://doi.org/10.5762/kais.2024.25.1.780>. [cit. 2025-05-03].
- [31] QU, Jiwei; ZHANG, Zhe; QIN, Zhixin; GUO, Kangkang a LI, D. M. Applications of Key Autonomous Navigation Technologies for Unmanned Agricultural Tractors: A Review. Online. *Preprints*. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints202402.0401.v1>. [cit. 2025-05-03].
- [32] *Computers and Electronics in Agriculture*. 1994, roč. 1994, č. 11. 1994. ISSN 0168-1699.
- [33] *Internet and Computers for Agriculture*. Online. 2023. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. ISBN 3036566317. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6631-3>. [cit. 2025-05-22].
- [34] GHOBADPOUR, Amin; MONSALVE, German; CARDENAS, Alben a MOUSAZADEH, Hossein. Off-Road Electric Vehicles and Autonomous Robots in Agricultural Sector: Trends, Challenges, and Opportunities. Online. *Vehicles*. 2022, roč. 4, č. 3, s. 843-864. ISSN 2624-8921. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/vehicles4030047>. [cit. 2024-06-03].
- [35] YUNG-CHUAN, Chen; LI-WEN, Chen a MING-YEN, Chang. A Design of an Unmanned Electric Tractor Platform. Online. *Agriculture*. 2022, roč. 12, č. 1, s. 1-19. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010112>. [cit. 2024-06-03].
- [36] HOQUE, Azmirul a PADHIARY, Mrutyunjay. Automation and AI in Precision Agriculture: Innovations for Enhanced Crop Management and Sustainability. Online. *Asian Journal of Research in Computer Science*. 2024, roč. 17, č. 10, s. 95-109. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.9734/ajrcos/2024/v17i10512>. [cit. 2025-05-03].

- [37] *Autonomous Farm Equipment Hitching To A Tractor*. Continental Automotive Systems. Uděl.: 26. 3. 2020.
- [38] *6068CI5506.8L Industrial Diesel Engine*. Online. John Deere. 2025. Dostupné z: <https://www.deere.com/en/industrial-engines/final-tier-4-stage-v/6068ci550/>. [cit. 2025-05-04].
- [39] CARLEY, Larry. *Building for Biodiesel*. Online. EngineBuilder. 2015. Dostupné z: <https://www.enginebuildermag.com/2015/06/building-for-biodiesel/>. [cit. 2025-05-04].
- [40] BONNICI, David. *Hyundai reveals cheaper, punchier fuel-cell system*. Online. WhichCar. 2021. Dostupné z: <https://www.whichcar.com.au/news/hyundai-cheaper-hydrogen-fuel-cell-system>. [cit. 2025-05-04].
- [41] CHAPMAN, Becky. *How does a lithium-Ion battery work?* Online. Lets Talk Science. 2019. Dostupné z: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-explained/how-does-a-lithium-ion-battery-work>. [cit. 2025-05-04].
- [42] *Electric shock: battery power is back*. Online. GrainNews. 2017. Dostupné z: <https://www.grainnews.ca/machinery/electric-shock-battery-power-it-back-2/>. [cit. 2025-05-04].
- [43] LAGNELÖV, Oscar; LARSSON, Gunnar; NILSSON, Daniel; LARSOLLE, Anders a HANSSON, Per-anders. Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation. Online. *Biosystems engineering*. 2020, roč. 194, s. 121-137. ISSN 1537-5110. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.017>. [cit. 2024-06-03].
- [44] YAN, Xianghai; ZHAO, Yifan; LIU, Xiaohui; LIU, Mengnan; WU, Yiwei et al. Research on Energy Management Strategy for Series Hybrid Tractor under Typical Operating Conditions Based on Dynamic Programming. Online. *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*. 2024. ISSN 2032-6653. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/wevj15040156>. [cit. 2025-05-04].
- [45] *Tractor with hybrid power system (US)*. HUSSON, Geoffroy, Malcolm SHUTE a Gabriel MENIER. Uděl.: 3. květen 2011. 9637000. Dostupné také z: <https://www.freepatentsonline.com/9637000.html>.

- [46] *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Online. Fuel Cells Works. 2025. Dostupné z: <https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/pemfc>. [cit. 2025-05-04].
- [47] ZHANG, Jingyun; WANG, Buyuan; ZHANG, Junjiang; XU, Liyou a ZHANG, Kai. Research on Power Optimization for Energy System of Hydrogen Fuel Cell Wheel-Driven Electric Tractor. Online. *World electric vehicle journal*. 2024, roč. 15, č. 5, s. 188. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/wevj15050188>. [cit. 2024-06-03].
- [48] *HYDROGEN FUEL CELL TRACTOR KIM* (Korea). 2023. Přihl.: 20. 8. 2021. Uděl.: 16. 8. 2022. WO2022KR12182.
- [49] *Synchronous Motor VS. Induction Motor*. Online. Lamnow. 2025. Dostupné z: <https://lamnow.com/synchronous-motor-vs-induction-motor/>. [cit. 2025-05-04].
- [50] *Vehicle Storage Tank Truck H2 Gas Cylinders High Pressure Hydrogen Cylinder*. Online. Auyanglobe. 2022. Dostupné z: <https://www.auyanglobe.com/high-pressure-hydrogen-cylinder/High-Pressure-Hydrogen-Cylinder.html>. [cit. 2025-05-04].
- [51] *Gaseous versus Liquid Hydrogen Storage*. Online. Powertorque. 2023. Dostupné z: <https://powertorque.com.au/gaseous-versus-liquid-hydrogen-storage/>. [cit. 2025-05-04].
- [52] *Podvozky kolových a pásových traktorů, jejich odpružení a řízení*. Online. Agroportal24h. 2019. Dostupné z: <https://www.agroportal24h.cz/clanky/podvozky-kolovych-a-pasovych-traktoru-jejich-odpruzeni-a-rizeni>. [cit. 2025-05-05].
- [53] PESSINA, Domenico. *The axles of wheeled agricultural machinery*. Online. Mondomacchina. 2023. Dostupné z: <https://www.mondomacchina.it/en/the-axles-of-wheeled-agricultural-machinery-c4000>. [cit. 2025-05-07].
- [54] ARVIDSSO, Johan a KELLER, Thomas. *Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction*. Online. 2023. ELSEVIER, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.004>. [cit. 2024-05-03].
- [55] JILEK, Petr; ŠEFČÍK, Ivo a DUŠÁK, Lukáš. *Pneumatiky pro zemědělskou techniku*. Online. 2016. ISSN 1801-674X. [cit. 2024-03-18].

- [56] JEON, Hyeon-Ho a JUNG, Yeon-Jun. Development and Validation of simulation model for three point-hitch during agricultural operation. Online. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Roč. 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.13031/aim.201901032..> [cit. 2025-05-07].
- [57] *Titan Category 1, 3 Point Black Quick Hitch*. Online. Titan attachments. 2025. Dostupné z: <https://palletforks.com/products/titan-category-1-3-point-quick-hitch>. [cit. 2025-05-07].
- [58] *The Essential Components of Your Tractor's Hydraulic System*. Online. LaneSharkUSA. 2024. Dostupné z: <https://lanesharkusa.com/blogs/news/the-essential-components-of-your-tractor-s-hydraulic-system>. [cit. 2025-05-07].
- [59] DUPRAZ, Christian; MARROU, Hélène; TALBOT, Grégoire a DUFOUR, L. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. Online. *Renewable Energy*. 2011, roč. 36, č. 10, s. 2725-2732. ISSN 2725-2732. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>. [cit. 2025-05-08].
- [60] MARROU, Hélène; WERY, Jacques; DUFOUR, L. a DUPRAZ, Christian. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. Online. *European Journal of Agronomy*. 2013, roč. 44, č. 1, s. 54-66. ISSN 1161-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>. [cit. 2025-05-08].
- [61] SMIL, Vaclav. *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. Online. 2. Praeger, 2017. ISBN 978-1-4408-5324-1. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://syllabus.pirate.care/library/Vaclav%2520Smil/Energy%2520Transitions%2520Global%2520and%2520National%2520Perspectives,%25202nd%2520Edition%2520%252867%2529/Energy%2520Transitions%2520Global%2520and%2520National%2520Pe%2520-%2520Vaclav%2520Smil.pdf&ved=2ahUKEwj7sMzGwZSNaxUDk_0HHWa4HC8QFnoECAoQAQ&usg=AOvVaw1bp0YGswseF-VjzaDyljB. [cit. 2025-05-08].
- [62] *What are Peak Sun Hours?* Online. 8Msolar. 2019. Dostupné z: <https://8msolar.com/what-is-a-peak-sun-hour-psh/>. [cit. 2025-05-13].

- [63] BAROCH, Pavel. *Kolik energie lze vymáčkout ze solárních panelů? Jejich účinnost raketově roste.* Online. Obnovitelne.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/clanek/3134/kolik-energie-lze-vymacknout-ze-solarnich-panelu-jejich-ucinnost-raketove-roste>. [cit. 2025-05-13].
- [64] NREL. *Hydrogen and Fuel Cells Research.* Online. 2025. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/hydrogen/research>. [cit. 2025-05-13].
- [65] GARLAPATI, Nagababu; PATEL, Kunj a PATEL, Yagna. Exploring the Feasibility of Green Hydrogen Production Using Wind Energy in India. Online. *Environmental and Climate Technologies*. 2025, roč. 29, č. 1, s. 21–34. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/rtuect-2025-0002>. [cit. 2025-05-13].
- [66] Ag equipment giant unveils the future. *The Western Producer*. 2019, roč. 2019. Dostupné také z: <https://www.producer.com/crops/ag-equipment-giant-unveils-the-future/>.
- [67] VIDEO *Autonomous Electric Tractor - Future of Farming | John Deere*. Online. John Deere UK IE. 2020. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=gMaQq_vRaa8. [cit. 2025-04-14].
- [68] *See how the first Belarusian unmanned tractor BELARUS A3523i plows.* Online. Potatoes News. 2021. Dostupné z: <https://potatoes.news/belarusian-unmanned-tractor-belarus-3523-plows/>. [cit. 2025-05-02].
- [69] *Valtra Design Challenge 2018 Honorable mention; Phantom.* Online. Joonas Järvinen Behance Profile. 2018. Dostupné z: https://www.behance.net/gallery/72695239/Valtra-Design-Challenge-2018-Honorable-mention-Phantom?tracking_source=search_projects|Valtra+Design+Challenge+2018+Honorable+mention;+Phantom&l=0. [cit. 2025-05-02].
- [70] *Real-Time Kinematic (RTK) and GNSS corrections.* Online. U-Blox. 2025. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en/technologies/rtk-real-time-kinematic>. [cit. 2025-05-03].

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam použitých zkratek

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
PTO	Power Take-Off
LED	Light-Emitting Diode
AI	Artificial Intelligence
LiDAR	Light Detection And Ranging
MTZ	Minsk Tractor Works
3D	trojrozměrný/trojdimenzionální
CPU	Central processing unit
IP	Ingress protection
IMU	Inertial measurement unit
RTK	Real-Time Kinematic
VCU	Vehicle Control Unit
ACU	Autonomous Control Unit
GPU	Graphics Processing Unit
NMC	Nickel-manganese-cobalt
NCA	Nickel-cobalt-aluminium
LFP	Lithium-iron-phosphate
SESAM	Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery
PEM	Proton exchange membrane
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell
PMSM	Permanent magnets synchronous motor
HDPE	High density polyethylen
VF	Very high Flexion
IF	Improved Flexion

ECU	Electronic control unit
UV	Ultrafialové
HES	Hydrogen Energy System
NREL	National Renewable Energy Laboratory
RAL	ReichsAusschuss für Lieferbedingungen

10.2 Seznam použitých veličin a jednotek

<i>MW</i>	megawatt
<i>t</i>	tuna
<i>m²</i>	metr čtvereční
<i>ha</i>	hektar
<i>hod</i>	hodina
<i>A</i>	ampér
<i>l</i>	litr
<i>%</i>	procento
<i>ot/min</i>	otáčky za minutu
<i>bar</i>	jednotka tlaku
<i>psi</i>	jednotka tlaku
<i>°C</i>	stupně celsia
<i>V</i>	volt
<i>kWh</i>	kilowatt-hour
<i>Wh/kg</i>	Watt-hour per kilogram
<i>Wh/l</i>	Watt-hour per liter
<i>kW</i>	kilowatt
<i>°</i>	symbol stupně
<i>kg</i>	kilogram
<i>m</i>	metr
<i>mm</i>	milimetr

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 PRISMA diagram	17
Obr. 2-2 Developments in autonomous tractors [3]	18
Obr. 2-3 Driverless tractor in Popular Mechanics Journal 1940 [5]	20
Obr. 2-4 CASE IH Autonomous Concept [12]	22
Obr. 2-5 CASE IH Autonomous Concept [12]	23
Obr. 2-6 Combined Powers [15]	24
Obr. 2-7 Combined Powers (verze Krone) [15]	25
Obr. 2-8 Kubota X Tractor [17]	26
Obr. 2-9 Koláž detailů Kubota X Tractor [17]	27
Obr. 2-10 John Deere Autonomous Electric Tractor Concept [66]	28
Obr. 2-11 Autonomous Electric Tractor – Future of Farming [67; 67; 18]	29
Obr. 2-12 Valtra H2O2 [19]	30
Obr. 2-13 Valtra H2O2 [19]	31
Obr. 2-14 Valtra H2O2 Cab version [19]	31
Obr. 2-15 Valtra H2O2 Průhledové schéma [20]	32
Obr. 2-16 Belarus A3523i [22]	33
Obr. 2-17 Belarus A3523i Orání půdy s osmiradličným pluhem [68]	34
Obr. 2-18 Belarus A3523i boční pohled [21]	35
Obr. 2-19 Valtra Phantom [23]	36
Obr. 2-20 Valtra Phantom [23; 69]	37
Obr. 2-21 Valtra Phantom [69]	37
Obr. 2-22 Valtra Phantom [23]	38
Obr. 2-23 Christoph Proessler Bolid [25]	39
Obr. 2-24 Christoph Proessler Bolid [25]	40
Obr. 2-25 C. Proessler Design exploration [25]	40
Obr. 2-26 MOD ² concept [27]	41
Obr. 2-27 MOD ² Docking and maintance [26]	41
Obr. 2-28 MOD ² Detail [26]	42

Obr. 2-29 Thermal Imaging in Agriculture [28].....	44
Obr. 2-30 An optical image of the resolution by the Velodyne LiDAR VLS-128 [29].....	45
Obr. 2-31 Real-Time Kinematic (RTK) and GNSS corrections [70].....	46
Obr. 2-32 Sketch diagram of key autonomous navigation technologies of UATs. [31]	48
Obr. 2-33 AI-powered robotic systems [36]	49
Obr. 2-34 John Deere 6068CI5506.8L Industrial Diesel Engine [38]	52
Obr. 2-35 What Is Biodiesel? [39].....	53
Obr. 2-36 Parts of a lithium-ion battery [41].....	54
Obr. 2-37 The 130 kWh, 670V Li-ion battery system [42]	55
Obr. 2-38 Topological structure diagram of the power system for a series hybrid tractor [44]	57
Obr. 2-39 PEMFC fuel cell scheme [46]	58
Obr. 2-40 Hyundai – A next-generation fuel cell systém [40].....	59
Obr. 2-41 Lamnow – synchronous motors and asynchronous motors [49]	61
Obr. 2-42 Brushless Gear Deceleration Motor Wheel.....	62
Obr. 2-43 Vehicle Storage Tank Truck H2 Gas [50].....	63
Obr. 2-44 Liquid Hydrogen Storage [51]	64
Obr. 2-45 Rámová konstrukce podvozku Fastrac [52]	65
Obr. 2-46 Polorámová konstrukce podvozku Fendt [52].....	65
Obr. 2-47 The axles of wheeled agricultural machinery [53]	67
Obr. 2-48 Hydropneumatické odpružení přední nápravy [52].....	68
Obr. 2-49 Pásový systém značky Kubota [17]	69
Obr. 2-50 Řez pláštěm pneumatiky a uspořádání kostry: a – radiální, b – diagonální [52]	70
Obr. 2-51 Rotating-shaft of three-point hitch [56]	71
Obr. 2-52 Titan Category 2, 3 Point Black Quick Hitch [57].....	72
Obr. 2-53 The Essential Components of Your Tractor’s Hydraulic System [58].....	73
Obr. 4-1 Strom cílů, omezení a funkcí	84
Obr. 4-2 GLASSBOX – Vnitřní schéma komponent.....	85
Obr. 4-3 Návrh variantních řešení II	91
Obr. 4-4 Návrh variantních řešení I	91

Obr. 4-5 Návrh variantních řešení III.....	92
Obr. 4-6 Varianta I, zezadu	93
Obr. 4-7 Varianta I, zepředu.....	93
Obr. 4-8 Varianta II, zepředu.....	94
Obr. 4-9 Varianta II, zezadu	95
Obr. 4-10 Varianta III, zezadu	96
Obr. 4-11 Varianta III, zepředu.....	96
Obr. 5-1 Předběžný návrh z varianty II, pohled zezadu	101
Obr. 5-2 Předběžný návrh z varianty II, pohled zepředu	101
Obr. 5-3 Předběžný návrh z varianty II, detail	102
Obr. 5-4 Rozměrové řešení předběžného návrhu z varianty II	102
Obr. 5-5 Vnitřní schéma předběžného návrhu varianty II	103
Obr. 5-6 Předběžný návrh z varianty I, pohled zepředu	105
Obr. 5-7 Rozměrové řešení předběžného návrhu z varianty I	106
Obr. 5-8 Předběžný návrh z varianty I, pohled zezadu.....	106
Obr. 5-9 Předběžný návrh z varianty I, detail	107
Obr. 5-10 Řešení osvětlení předběžného návrhu z varianty I.....	107
Obr. 5-11 Exploded view předběžného návrhu z varianty I.....	108
Obr. 5-12 Vnitřní schéma předběžného návrhu varianty I.....	108
Obr. 6-1 Perspektivní pohled finálního návrhu	111
Obr. 6-2 Proporce vzhledem k muži 95P	112
Obr. 6-3 Perspektivní pohled finálního návrhu zezadu	113
Obr. 6-4 Perspektivní pohled na přední část návrhu	113
Obr. 6-5 Variantní návrhy přední masky	114
Obr. 6-6 Perspektivní pohled na přední masku	115
Obr. 6-7 Varianty tvarování předního prolisu	115
Obr. 6-8 Perspektivní pohled na přední tříbodový závěs, PTO a přípojky	116
Obr. 6-9 Perspektivní pohled na přední tříbodový závěs, PTO a přípojky	116
Obr. 6-10 Perspektivní boční pohled	117
Obr. 6-11 Ortografický boční pohled s vyznačenými liniemi	117

Obr. 6-12 Perspektivní pohled na boční světla a senzory	118
Obr. 6-13 Perspektivní pohled na odnímatelný kryt údržby.....	118
Obr. 6-14 Zadní perspektivní pohled	119
Obr. 6-15 Varianty tvarování zadního prolisu.....	119
Obr. 6-16 Detailní pohled topologicky optimalizovaných součástí.....	120
Obr. 6-17 Perspektivní pohled na zadní třibodový závěs.....	120
Obr. 6-18 Detailní pohled na zadní třibodový závěs, PTO, hydr. a el. systémy	121
Obr. 6-19 Perspektivní pohled na zadní světla a senzory.....	122
Obr. 6-20 Detailní pohled na zadní světla, změna barvy	122
Obr. 6-21 Detailní pohled na ventil vodíkové nádrže.....	123
Obr. 6-22 Zadní ortografický pohled	123
Obr. 6-23 Vnitřní schéma uspořádání komponent	124
Obr. 6-24 Schéma cirkulace vzduchu	125
Obr. 6-25 Pozorovací úhly kamer a senzorů, pohled shora	126
Obr. 6-26 Pozorovací úhly kamer a senzorů, pohled z boku.....	127
Obr. 6-27 Proces návrhu dělení karoserie.....	127
Obr. 6-28 Schéma vnějších komponent, exploded view	128
Obr. 6-29 Proces návrhu v programu Altair Inspire, zatížení a analýza.....	129
Obr. 6-30 Proces návrhu v programu Altair Inspire, analýza optimalizované součásti...	129
Obr. 6-31 Perspektivní pohled na odnímání bočního krytu, detail	130
Obr. 6-32 Boční ergonomický pohled.....	130
Obr. 6-33 Perspektivní pohled na odnímání bočního krytu.....	131
Obr. 6-34 Perspektivní pohled na odnímání přední mřížky, detail.....	131
Obr. 6-35 Perspektivní pohled na odnímání přední mřížky	132
Obr. 6-36 Přední ergonomický pohled	132
Obr. 6-37 Finální barevné provedení	133
Obr. 6-38 Barevná varianta I	134
Obr. 6-39 Barevná varianta II	135
Obr. 6-40 Barevná varianta III.....	135
Obr. 6-41 Barevná varianta IV.....	136

Obr. 6-42 Proces návrhu logotypu	137
Obr. 6-43 Proporce a kompozice loga	137
Obr. 6-44 Grafické řešení finálního návrhu.....	138
Obr. 6-45 Integrace loga do přední části	138
Obr. 6-46 Various scenarios for producing renewable hydrogen and electricity [64]	143

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Vymezení atributů a cílů produktu.....	80
Tab. 4-1 Hodnocení vybraných variant návrhu.....	97
Tab. 6-1 Srovnání obnovitelných zdrojů k výrobě vodíku.....	143

13 SEZNAM PŘÍLOH

- zmenšený sumarizační poster A4
- zmenšený designérský poster A4
- zmenšený ergonomický poster A4
- zmenšený technický poster A4
- zmenšený poster k výstavě iD 25
- fotografie modelu ve stavu k 23. 5. 2025

Samostatné přílohy

- sumarizační poster A1
- designérský poster A1
- ergonomický poster A1
- technický poster A1
- poster k výstavě iD 25
- model autonomního zemědělského traktoru 1:8



Vize autonomního traktoru pro následující desetiletí počítá s využitím vodíku jako alternativního pohonu. Vodík je zde v proton exchange membránovém (PEM) palivovém článku elektrochemicky přeměněn na elektrickou energii. Jedná se o těžkou zemědělskou techniku s maximálním výkonem 200 kW, určenou pro střední a velké polnosti převážně v Evropě. Stroj je koncipován pro plně autonomní provoz, zahrnující i automatické doplňování vodíku a výměnu nástrojů.

Typické místo kabiny řidiče nahrazuje vodíková nádrž, která je tvarově propojena s karoserií a vizuálně upevněna vystupujícími prvky po stranách, které nesou boční osvětlení, kamery a senzory. Hlavní senzorické řešení se nachází v prostoru mezi světlými, čímž umožňuje efektivní kontrolu práce, usnadňuje autonomní tankování a výměnu nástrojů, a zároveň zajišťuje ideální pozorovací úhly pro autonomní navigaci stroje.

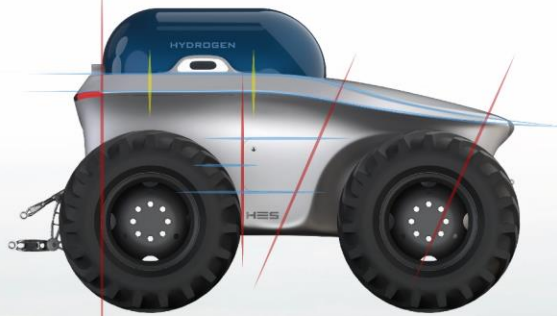
Traktor dále disponuje předním i zadním třibodovým závěsem, předními i zadními vývodovými hřídeli, ISOBUS konektory, hydraulickými přípojkami a výkonným osvětlením, které umožňuje práci i v nočních hodinách, čímž výrazně zvyšuje efektivitu. Zadní a přední osvětlení má dvojitou funkci – při práci na poli osvětluje nástroje, zatímco při přesunu po silnici změni barvu na červenou nebo signalizuje změnu směru. Plynulé tvarování karoserie symbolizuje čistotu vodíkového pohonu, při současném zachování robustního charakteru těžkého zemědělského stroje. Vzniká kontrast mezi koly a karoserií, který je podpořen barevným řešením. Název konceptu je Hydrogen Energy System (HES), odkazující na zvolený pohon.

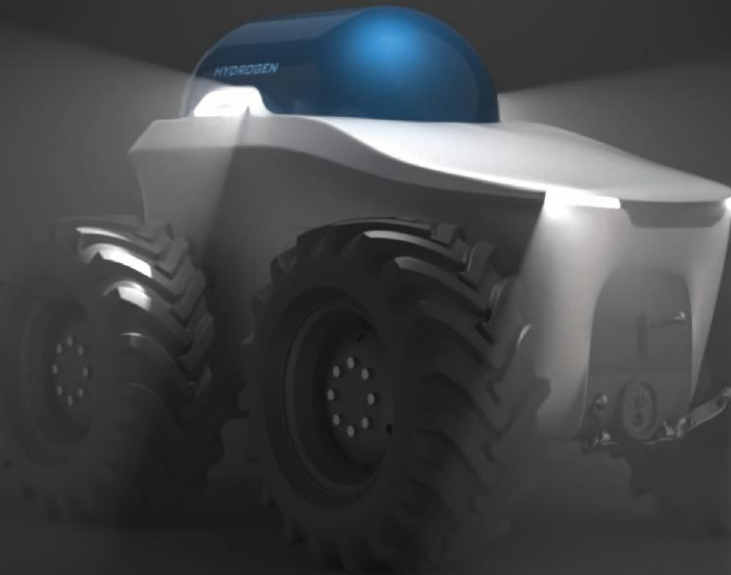




Tento koncept mění typické uspořádání zemědělských traktorů. Odhalená vodíková nádrž je hlavním vizuálním prvkem, propojeným s liniemi karoserie. Organické tvarování karoserie s minimem ostrých zlomů zachovává výraz těžkého stroje a odráží princip vodíkového pohonu. Po stranách nádrže jsou prvky, které ji vizuálně upevňují a integrují boční senzory a LED osvětlení. Design je kompozičně rozdělen na tři vizuální části: kola, vodíkovou nádrž a karoserii, která tyto prvky propojuje. Dělení karoserie, patrné z bočního pohledu, využívá rovnoběžných linií a nenarušuje výsledný návrh při zachování výrobitelnosti dílů. V přední části stroje je implementováno transparentní LED logo "HES", které svítí, aniž by omezovalo funkčnost pod ním umístěných senzorů a kamer.

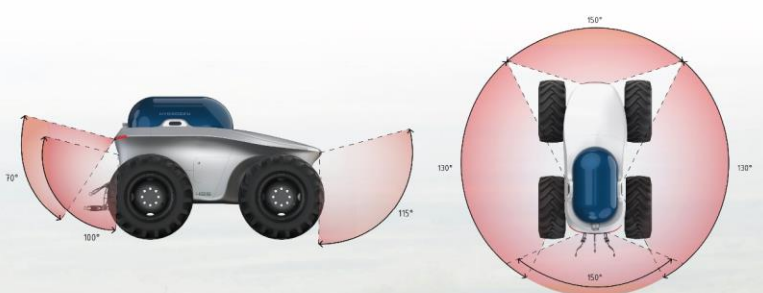
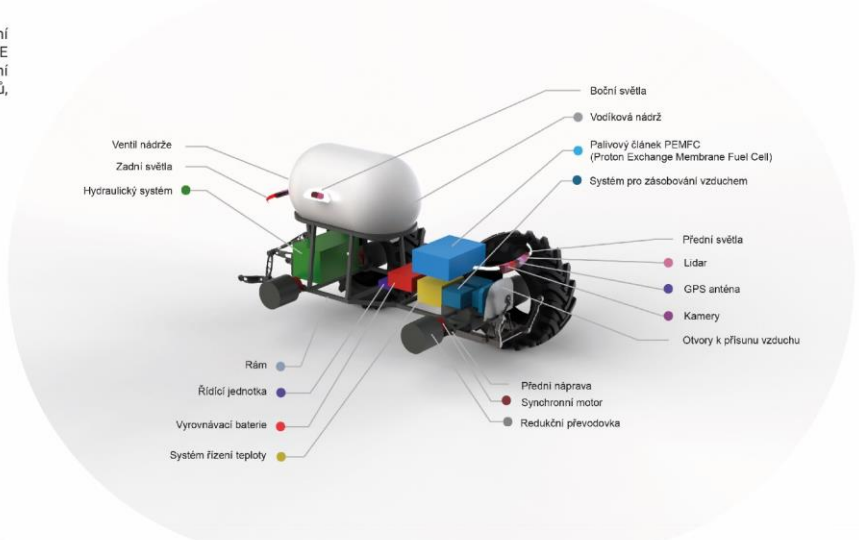
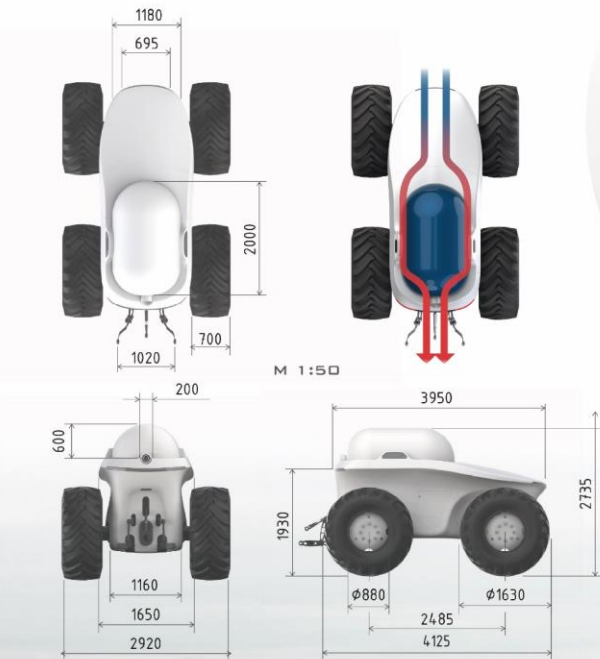
Barevné řešení zdůrazňuje navržený design a funkční aspekty. Dominantním prvkem je nádrž na vodík v syté modré barvě RAL 5010 (Gentian Blue), která evokuje moderní technologie a čistotu. Kontrastní šedá barva RAL 7005 (Mouse Gray) je použita na kolech a přední části traktoru pro vizuální stabilitu a technicistní vzhled. Karoserie je vyvedena ve stříbrné metalize RAL 9006, což dodává celku progresivní až futuristický vzhled. Dále byly zkoumány i další barevné schémata, zahrnující například šedou karoserii RAL 7004 s bílo-stříbrnými detaily, zelenou karoserii RAL 6010 nebo modrou karoserii RAL 5015.

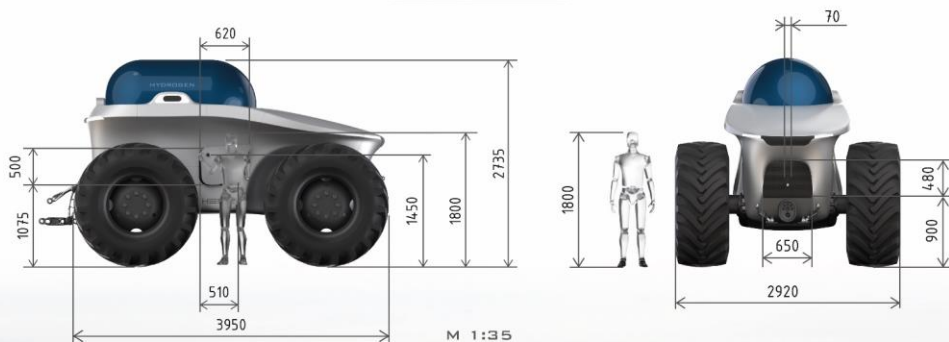




Technické řešení návrhu se zaměřilo na několik klíčových oblastí. Zásadní bylo vnitřní uspořádání součástí s ohledem na efektivní cirkulaci vzduchu a vzájemnou integraci systémů. Dále bylo prioritou umístění senzorů a kamer tak, aby poskytovaly optimální pozorovací úhly nezbytné pro plně autonomní provoz. Neméně důležitá byla implementace osvětlení, které umožňuje jak noční práci, tak bezpečný přesun stroje po veřejných komunikacích, čemuž odpovídá i celková šířka traktoru do 3 metrů

Karosérie traktoru je vyrobena převážně z laminátu. Vodíková nádrž využívá kompozitní konstrukci z karbonových vláken s epoxidovou maticí, doplněnou o vnitřní HDPE vložku a vnější polyuretanový obal pro zvýšenou odolnost. Maximální výkon stroje činí 200 kW, což je plně dostačující pro pohon elektromotorů a dalších palubních systémů, včetně například vnějších vývodových hřídelí (PTO).





Vzhledem k plně autonomnímu provozu traktoru HES se primární komunikace uživatele se strojem přesouvá do virtuálního prostředí. Zadávání a kontrola pracovních úkonů probíhá prostřednictvím digitálního rozhraní, přístupného z počítače, tabletu nebo chytrého telefonu. Lidský zásah je však stále nezbytný pro údržbu a servis. Pro tyto účely jsou implementovány odnímatelné kryty po stranách karoserie, které umožňují přístup k doplňování provozních kapalin, výměně filtrů a pokročilé diagnostice řídicí jednotky. Výměna vzduchových filtrů palivového článku, nezbytných pro optimální reakci, je usnadněna odnímatelnou přední mřížkou s magnetickým uchycením a skrytým zámekem. Přístup k zámku je řešen otvorem v horním rameni tříbodového závěsu. Ergonomie autonomního stroje zahrnuje i jeho vztah k okolí a zajištění bezpečnosti. Proto je na klíči pro odemykání krytů umístěn nezávislý záložní systém se dvěma tlačítky pro okamžité zabrzdění nebo úplné vypnutí všech systémů stroje.



Design autonomního zemědělského traktoru

2025

Tomáš Kárych

vedoucí: doc. akad. soch. Ladislav Krenek ArtD.

HES představuje vizi autonomního traktoru pro zemědělství budoucnosti, cirka za 30 let, který pro pohon využívá vodík s PEM palivovým článkem a je koncipován pro plně autonomní provoz včetně doplňování paliva a výměny nástrojů. Design traktoru radikálně mění dosavadní řešení, tradiční kabina řidiče je nahrazena odhalenou vodíkovou nádrží, která se stává ústředním prvkem. Její tvar je plynule propojen s karoserií a po stranách ji obepínají vystupující prvky, které integrují boční senzory a osvětlení. Organické tvarování karoserie s minimem ostrých zlomů symbolizuje čistotu vodíkového pohonu, přičemž si zachovává robustní výraz těžkého stroje. Hlavní sensorické řešení je umístěno mezi světlý pro optimální navigaci a kontrolu práce. Traktor disponuje předním i zadním tříbodovým závěsem a osvětlením umožňujícím noční práci i přesun po komunikacích, s dvojitou funkcí signalizace. Součástí návrhu je vytvoření plně lokálního udržitelného systému, který vyrábí vodík přímo na farmě z obnovitelných zdrojů energie.

