

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

# DISERTAČNÍ PRÁCE

2023

Ing. et Ing. Kristýna Havlíková

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P0715D270029 Průmyslové inženýrství a management

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

Metodika pro podporu kontroly kvality svařence s využitím rozšířené reality

Autor: **Ing. et Ing. Kristýna Havlíková**  
Školitel: **doc. Ing. Pavel Kopeček, CSc.**  
Konzultant specialista: **doc. Ing. Petr Hořejší, Ph.D.**

Akademický rok 2022/2023

## **PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ**

Předkládám tímto k posouzení disertační práci zpracovanou na téma:

*Metodika pro podporu kontroly kvality svařence s využitím rozšířené reality*

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, dle Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne: .....

.....  
Ing. et Ing. Kristýna Havlíková

### **Upozornění**

Podle Zákona o právu autorském, č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků disertační práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala všem členům Katedry průmyslového inženýrství a managementu Západočeské univerzity v Plzni za poskytnutí odborné pomoci při vypracování disertační práce.

Mockrát děkuji svému školiteli doc. Ing. Pavlu Kopečkovi, CSc. za odborné vedení, podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

Touto cestou také velmi děkuji doc. Ing. Petru Hořejšímu, Ph.D., jehož cenné podněty, odborné rady a podnětná kritika byly klíčové pro vznik této práce.

# ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni

ak.rok odevzdání: 2023

<b>AUTOR</b>	<i>Příjmení (včetně titulů)</i> Ing. et Ing. Havlíková	<i>Jméno</i> Kristýna
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	P0715D270029 Průmyslové inženýrství a management	
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<i>Příjmení (včetně titulů)</i> doc. Ing. Kopeček, CSc.	<i>Jméno</i> Pavel
<b>PRACOVNÍŠTĚ VEDOUCÍHO</b>	ZČU – FST – KPV	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Metodika pro podporu kontroly kvality svařence s využitím rozšířené reality	

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

<b>Celkem</b>	158	<b>Textová část</b>	146	<b>Grafická část (přílohy)</b>	12
---------------	-----	---------------------	-----	--------------------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Hlavním tématem této disertační práce je vliv podpory rozšířené reality na proces kontroly kvality svařenců. Cílem je návrh metodiky pro kontrolu kvality s podporou rozšířené reality a experimentální ověření navrženého AR přístupu. Výzkum se zaměřuje na pracovníka z hlediska jeho výkonnosti, chybovosti a mentální zátěže. Porovnává inovativní přístup s podporou rozšířené reality a tradiční postupy s tištěnými podklady. Zároveň sleduje 2 skupiny respondentů v závislosti na aspektu pracovních zkušeností s danými kontrolními činnostmi.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Rozšířená realita, kontrola, kvalita, svařování, výkonnost, analýza, efektivita, mentální zátěž.

# SUMMARY OF DISSERTATION WORK

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

Submitted: 2023

<b>Author</b>	<i>Surname (including of Degrees)</i> Ing. et Ing. Havlíková	<i>Name</i> Kristýna
<b>Study Programmes</b>	P0715D270029 Industrial Engineering and Management	
<b>Supervisor</b>	<i>Surname (including of Degrees)</i> doc. Ing. Kopeček, CSc.	<i>Name</i> Pavel
<b>Instution/ Department</b>	ZČU – FST – KPV	
<b>Title of the Work</b>	Methodology to support quality control of welded parts with augmented reality	

## Number of pages

<b>Total</b>	158		<b>Part of Text</b>	146		<b>Attachment</b>	12
--------------	-----	--	---------------------	-----	--	-------------------	----

<b>Brief Description of the Theme, Findings and Benefits</b>	This thesis investigates the effect of augmented reality support on the quality control process of welded structures. It proposes a methodology for this innovation and examines the performance, error rate, and mental workload of workers. A comparison is made between traditional procedures using printed documentation, and the innovative approach using augmented reality support. It also examines two groups of participants in terms of their work experience with the defined inspection activities.
<b>Key Words</b>	Augmented reality, inspection, quality, welding, performance, analysis, efficiency, mental workload.

# 1 Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam zkratk .....	12
Úvod .....	13
1 Cíle disertační práce .....	15
1.1 Dílčí cíle.....	15
1.2 Výzkumné otázky.....	15
2 Charakteristika zkoumané problematiky.....	17
2.1 Pozadí výzkumu .....	17
2.2 Vymezení tématu .....	18
2.3 Rozsah a limity výzkumu .....	19
2.4 Struktura práce.....	20
3 Teoretická východiska práce .....	21
3.1 Rozšířená realita .....	21
3.1.1 Definice rozšířené reality .....	21
3.1.2 Historie rozšířené reality.....	22
3.1.3 AR Software.....	23
3.1.4 AR Hardware .....	24
3.2 Kontrola kvality.....	25
3.2.1 Představení kontroly kvality .....	25
3.2.2 Měřicí systém .....	25
3.2.3 Přesnost kontroly .....	26
3.3 Automatizace v průmyslovém prostředí .....	27
4 Související výzkumy a studie.....	30
4.1 Představení teoretické rešerše .....	30
4.2 Metodika kontroly kvality .....	30
4.3 AR v kontrole kvality ve strojírenství.....	36
4.4 Automatizovaná kontrola svarů s podporou AI .....	41
5 Shrnutí rešeršní části .....	43
6 Konceptuální návrh obecné metodiky kontrolního procesu s podporou AR.....	47
7 Pilotní AR software pro experimentální studii .....	53
7.1 Propojená databáze .....	53
7.2 Příprava CAD modelů .....	55
7.3 Příprava 2D grafiky .....	55

7.4	Vuforia Engine .....	56
7.5	Unity 3D Game Engine .....	58
8	Metodika výzkumu .....	61
8.1	Vymezení výzkumu .....	61
8.2	Metodika testování .....	61
8.3	Konvenční metodika kontroly .....	64
8.4	Navržená AR podpora kontroly .....	66
8.5	Data získaná z experimentu .....	67
8.6	Kvalita výzkumu .....	68
9	Použité vědecké metody .....	69
9.1	Empirické metody .....	69
9.1.1	Pozorování .....	69
9.1.2	Měření .....	69
9.1.3	Experiment .....	69
9.2	Obecně teoretické metody .....	69
9.2.1	Analýza – syntéza .....	70
9.2.2	Indukce – dedukce .....	70
9.2.3	Generalizace .....	70
9.2.4	Komparace .....	70
9.3	Statistické metody .....	70
9.3.1	Studentův t-test .....	71
9.3.2	Wilcoxonův test .....	71
9.3.3	Shapiro-Wilkův test .....	71
9.3.4	Dvoucestná ANOVA .....	71
9.3.5	Tukeyho test .....	72
9.3.6	Leveneův test .....	72
9.3.7	Friedmanův test .....	72
9.4	NASA TLX .....	72
9.5	SUS .....	73
9.6	Stanovení velikosti výzkumného souboru .....	74
9.7	Testování hypotéz .....	75
10	Výsledky a statistické vyhodnocení experimentu .....	76
10.1	Celkový čas dokončení kontroly .....	77
10.1.1	Testování normálního rozdělení dat – TCT .....	77
10.1.2	Dvoucestná ANOVA – TCT .....	89



10.1.3	Analýza reziduí – TCT .....	93
10.1.4	Post hoc Tukeyho test – TCT .....	96
10.1.5	Leveneův test – TCT .....	96
10.1.6	T-test – TCT .....	96
10.1.7	Mann-Whitney U test – TCT.....	99
10.1.8	Shrnutí.....	99
10.2	Míra chybovosti.....	101
10.2.1	Testování normálního rozdělení dat – chybovost .....	101
10.2.2	Friedmanův test – chybovost.....	106
10.2.3	Mann Whitneyho U test – chybovost .....	107
10.2.4	Shrnutí.....	108
10.3	Mentální zátěž .....	109
10.3.1	Testování normálního rozdělení dat – mentální zátěž .....	110
10.3.2	Dvoucestná ANOVA – mentální zátěž.....	116
10.3.3	Párový t-test – mentální zátěž .....	120
10.4	SUS.....	121
10.5	Obecné hodnocení AR přístupu .....	122
11	Diskuze .....	124
12	Přínosy disertační práce .....	126
12.1	Teoretický přínos práce .....	126
12.2	Praktický přínos práce .....	126
12.3	Doporučení pro další výzkum .....	126
	Závěr .....	128
	Seznam použité literatury .....	130
	Seznam publikovaných prací .....	146
	Seznam příloh.....	i

## Seznam obrázků

Obrázek 3-1: Kontinuum realita – virtualita dle [38] .....	22
Obrázek 3-2: Optical see-through display vs. video see-through display [47] .....	24
Obrázek 3-3: Stupnice úrovní automatizace dle [33].....	28
Obrázek 3-4: Vztah konkurenceschopnosti a míry automatizace dle [33] .....	29
Obrázek 4-1: Sedm základních kroků kontrolního procesu dle [50] .....	31
Obrázek 4-2: Schéma kontrolního procesu dle [62] .....	32
Obrázek 4-3: Rámec kontrolního systému dle [66].....	35
Obrázek 4-4: Ukázka AR nástroje pro kontrolu provedení montáže dle [125].....	40
Obrázek 6-1: Vazby mezi prvky AR metodického rámce [81] .....	48
Obrázek 6-2: Návrh metodiky kontrolního procesu s podporou AR [zdroj autor] .....	49
Obrázek 6-3: Struktura navržené AR podpory [zdroj autor] .....	51
Obrázek 7-1: AR SW – Úvodní scéna [zdroj autor].....	54
Obrázek 7-2: AR SW – Scéna registrace uživatele [zdroj autor] .....	54
Obrázek 7-3: AR SW – Přihlášení uživatele [zdroj autor] .....	54
Obrázek 7-4: AR SW – Úprava CAD modelu v Blenderu [zdroj autor] .....	55
Obrázek 7-5: AR SW – 2D grafika vytvořená v Adobe Illustrator [zdroj autor].....	56
Obrázek 7-6: AR SW – Konfigurace modelu v MTG Vuforia [zdroj autor] .....	57
Obrázek 7-7: AR SW – Tvorba databáze ve Vuforii [zdroj autor] .....	57
Obrázek 7-8: AR SW – Scéna s výběrem z dílů [zdroj autor].....	58
Obrázek 7-9: AR SW – Detekce produktu v Unity [zdroj autor].....	59
Obrázek 7-10: AR SW – Kontrolní scéna v Unity včetně checklistu [zdroj autor] .....	59
Obrázek 8-1: Uspořádání pracoviště při konvenčním přístupu ke kontrole [zdroj autor] .....	65
Obrázek 8-2: Pracoviště připravené pro konvenční přístup kontroly [zdroj autor].....	65
Obrázek 8-3: Průběh kontroly konvenčním přístupem [zdroj autor] .....	66
Obrázek 8-4: Kontrola s podporou AR [zdroj autor] .....	67
Obrázek 9-1: SUS – náhled dotazníku dle [153].....	73
Obrázek 9-2: Testování hypotéz [155] .....	75
Obrázek 10-1: Ukázka TCT a míry chybovosti v experimentu [zdroj autor] .....	76
Obrázek 10-2: Ukázka naměřené mentální zátěže z experimentu [zdroj autor] .....	77
Obrázek 10-3: Q-Q plot TCT AR [zdroj autor].....	79
Obrázek 10-4: TCT AR – bell curve [zdroj autor] .....	80
Obrázek 10-5: Q-Q plot TCT PAP [zdroj autor].....	80
Obrázek 10-6: TCT PAP – bell curve [zdroj autor] .....	81
Obrázek 10-7: Q-Q plot TCT AR S1 [zdroj autor] .....	82
Obrázek 10-8: TCT AR S1 – bell curve [zdroj autor] .....	82
Obrázek 10-9: Q-Q plot TCT AR S2 [zdroj autor].....	83
Obrázek 10-10: TCT AR S2 – bell curve [zdroj autor] .....	84
Obrázek 10-11: Q-Q plot TCT PAP S1 čistý čas kontroly [zdroj autor] .....	85
Obrázek 10-12: TCT PAP S1 čistý čas kontroly – bell curve [zdroj autor] .....	85
Obrázek 10-13: Q-Q plot TCT PAP S2 čistý čas kontroly [zdroj autor] .....	86
Obrázek 10-14: TCT PAP S2 čistý čas kontroly – bell curve [zdroj autor] .....	86
Obrázek 10-15: Q-Q plot TCT PAP S1 celkový čas kontroly [zdroj autor] .....	87
Obrázek 10-16: TCT PAP S1 celkový čas kontroly – bell curve [zdroj autor] .....	87
Obrázek 10-17: Q-Q plot TCT PAP S2 celkový čas kontroly [zdroj autor] .....	88

Obrázek 10-18: TCT PAP S2 celkový čas kontroly – bell curve [zdroj autor] .....	88
Obrázek 10-19: Shapiro-Wilkův test – TCT [zdroj autor] .....	89
Obrázek 10-20: Průměry a standardní chyby – TCT [zdroj autor].....	91
Obrázek 10-21: ANOVA analýza TCT [zdroj autor].....	93
Obrázek 10-22: Q-Q plot rezidua [zdroj autor] .....	94
Obrázek 10-23 : Rozptylový graf – rezidua/úroveň zkušeností [zdroj autor] .....	95
Obrázek 10-24: Rozptylový graf – rezidua/metoda podpory [zdroj autor] .....	95
Obrázek 10-25: T-testy TCT [zdroj autor].....	98
Obrázek 10-26: Q-Q plot chybovost AR S1 [zdroj autor] .....	102
Obrázek 10-27: Chybovost AR S1 – bell curve [zdroj autor] .....	102
Obrázek 10-28: Q-Q plot chybovost AR S2 [zdroj autor] .....	103
Obrázek 10-29: Chybovost AR S2 – bell curve [zdroj autor] .....	103
Obrázek 10-30: Q-Q pot chybovost PAP S1 [zdroj autor] .....	104
Obrázek 10-31: Chybovost PAP S1 – bell curve [zdroj autor] .....	104
Obrázek 10-32: Q-Q plot chybovost PAP S2 [zdroj autor] .....	105
Obrázek 10-33: Chybovost PAP S2 – bell curve [zdroj autor] .....	105
Obrázek 10-34: Průměrná chybovost [zdroj autor] .....	107
Obrázek 10-35: Mann-Whitneyův test – chybovost [zdroj autor].....	108
Obrázek 10-36: NASA TLX AR - bell curve [zdroj autor] .....	110
Obrázek 10-37: Q-Q plot NASA TLX AR [zdroj autor] .....	111
Obrázek 10-38: NASA TLX PAP – bell curve [zdroj autor] .....	111
Obrázek 10-39: Q-Q plot NASA TLX PAP [zdroj autor] .....	112
Obrázek 10-40: NASA TLX S1 AR – bell curve [zdroj autor] .....	112
Obrázek 10-41: Q-Q plot NASA TLX S1 AR [zdroj autor] .....	113
Obrázek 10-42: NASA TLX S2 AR – bell curve [zdroj autor] .....	113
Obrázek 10-43: Q-Q plot NASA TLX S2 AR [zdroj autor] .....	114
Obrázek 10-44: NASA TLX S1 PAP – bell curve [zdroj autor].....	114
Obrázek 10-45: Q-Q plot NASA TLX S1 PAP [zdroj autor] .....	115
Obrázek 10-46: NASA TLX S2 PAP – bell curve [zdroj autor].....	115
Obrázek 10-47: Q-Q plot NASA TLX S2 PAP [zdroj autor] .....	116
Obrázek 10-48: Průměrná celková mentální zátěž [zdroj autor] .....	117
Obrázek 10-49: Průměrná dílčí mentální zátěž [zdroj autor].....	117
Obrázek 10-50: Dvoucestná ANOVA - mentální zátěž [zdroj autor] .....	119
Obrázek 10-51: T-testy – mentální zátěž [zdroj autor] .....	120
Obrázek 10-52: Výsledky SUS testování [zdroj autor] .....	121

## Seznam zkratek

AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
CNN	Convolutional Neural Networks
GPS	Global Positioning System
HHD	Hand-held Device
HMD	Head Mounted Display
HSD	Honestly Significant Difference
HW	Hardware
ID	Identifikace
IoT	Internet of Things
LoA	Levels of Automation
MR	Mixed Reality
MSA	Measurement System Analysis
PAP	Označení pro popsanou konvenční metodiku s papírovými podklady
PISMOEA	Part, Instrument, Standard, Method, Operator, Environment, Assumptions
REST	Representational State Transfer
RQ	Research Question
RTLX	Raw Task Load Index
SW	Software
TCT	Task Completion Time
TLX	Task Load Index
VR	Virtual Reality
VST	Video See Through

## Úvod

V dnešním digitalizovaném a globalizovaném světě stále rostou požadavky na výrobu produktů v co nejkratším čase a v bezchybné kvalitě. Procesy kontroly kvality jsou zásadní součástí mnoha průmyslových procesů. Jedná se o opakující se a přesné úkoly, které jsou často velmi komplexní a zahrnují několik kroků, které musejí být správně provedeny různými operátory nebo inspektory.

Rozšířená realita je progresivní interaktivní technologie. Zatímco virtuální realita je založena na zcela pohlcujícím virtuálním prostředí, rozšířená realita překrývá virtuální obsah s reálným světem. Význam rozšířené reality byl již dříve prokázán a tato technologie začala nacházet uplatnění v řadě průmyslových aplikacích díky své schopnosti poskytovat interaktivní rozhraní vizualizovaného digitálního obsahu. Rozšířená realita může poskytovat funkční nástroje, které podporují uživatele při provádění úkolů, a především jim usnadňuje vizualizaci dat a interakci tím, že propojuje fyzický reálný prostor a vnímání uživatele. S pomocí rozšířené reality se operátoři mohou lépe soustředit na daný úkol a zároveň mít k dispozici vizualizovaná virtuální data. Efektivní využití výhod rozšířené reality, které může uživatelům pomoci při provádění kontrolních úkolů, je hlavním obsahem této práce.

Tradiční postupy kontroly kvality často využívají návody nebo výkresovou dokumentaci. Tyto podklady jsou zpravidla k dispozici v papírové nebo digitální podobě a provádějí pracovníka různými typy kontrolních postupů. Inspektoři musejí dostupné pokyny a dokumentaci správně interpretovat a porovnat se skutečnými objekty. Dělení pozornosti mezi instrukce a samotný úkol může vést ke zpomalení postupu a zvýšení chybovosti. V této souvislosti představuje významnou technologickou příležitost použití systémů informační podpory využívajících rozšířenou realitu, která může zvýšit efektivitu práce a snížit počet chyb tím, že pracovník bude soustředěn na úkol díky virtuální vizuální podpoře. Rozšířená realita umožňuje zobrazovat digitální informace na scéně reálného světa v reálném čase a je tak potenciálně přínosná pro procesy kontroly kvality.

Technologie rozšířené reality může při řízení kvality poskytovat interaktivní relevantní informace, které pracovníkům pomohou orientovat se v neznámých situacích nebo složitých operacích. Je proto důležité ověřit, zda s podporou této technologie je možné pomoci pracovníkům provádět tyto činnosti rychleji, efektivněji a s nižším mentálním úsilím než v případě tradičních papírových podkladů.

Navzdory uvedeným potenciálním výhodám je na trhu relativně málo dostupných nástrojů pro kontrolu kvality využívajících technologii rozšířené reality, není proto zatím jasně prokázán jejich skutečný přínos v reálném průmyslovém kontextu. Jedním z možných vysvětlení nedostatečného využití rozšířené reality v průmyslových úkolech může být složitost procesu tvorby virtuálních instrukcí. Jedná se o zdlouhavý, časově náročný a nákladný proces.

Tato práce zkoumá potenciál provázání rozšířené reality a kontrolorů v průmyslových procesech, konkrétně se zaměřuje na kvalitu svařených výrobků. Za tímto účelem jsou realizovány tři fáze výzkumu. První fáze určuje možnosti, jak může rozšířená realita podpořit uživatele v průmyslových aplikacích. Ve druhé fázi je navržen koncepční metodický rámec kontrolního procesu s podporou rozšířené reality spolu s implementovanou mobilní aplikací rozšířené reality, která byla navržena a vyvinuta pro přenosná zařízení, jako jsou chytré telefony nebo tablety. Ve třetí fázi je zkoumán navržený AR přístup pro interakci uživatelů

kontroly svařených výrobků v průmyslových procesech s digitálními interaktivními vizualizacemi v rámci experimentálního výzkumu.

Úkolem této disertační práce je zkoumat možnosti, jak může rozšířená realita pomoci uživatelům v konkrétní průmyslové aplikaci, a sice při vizuální kontrole svařených výrobků, ověřit, zda je možné s pomocí navrženého metodického přístupu zvýšit efektivitu daného kontrolního procesu, a sledovat, jaký má vliv na mentální zátěž vnímanou uživateli během tohoto procesu.

# 1 Cíle disertační práce

Hlavní cíle této disertační práce jsou následující:

- Návrh obecné metodiky kontrolního systému s podporou rozšířené reality v průmyslovém prostředí na základě teoretické rešerše obecných kontrolních modelů.
- Experimentální ověření navrženého kontrolního AR přístupu s koncovými uživateli.

## 1.1 Dílčí cíle

Za účelem splnění těchto hlavních cílů byly definovány následující dílčí cíle:

- Konceptuální návrh obecné metodiky kontroly s podporou AR.
- Modifikace návrhu metodiky na základě zkušeností a výsledků z pozorování průběhu experimentu.
- Návrh a vývoj pilotního interaktivního AR softwaru pro podporu kontroly kvality.
- Provedení terénního kontrolovaného experimentálního výzkumu s koncovými uživateli v reálném pracovním prostředí s vytvořeným AR řešením pro ověření navrženého přístupu.
- Vyhodnocení vlivu AR přístupu na výkon inspektora z hlediska objektivních metrik v porovnání s tradičními kontrolními postupy.
- Sledování vlivu AR přístupu na vnímanou mentální zátěž uživatelů v porovnání s tradičními kontrolními postupy.
- Pozorování hodnocení použitelnosti navrženého AR řešení.
- Komparativní analýza vlivu navržené metodiky na výkon dvou skupin koncových uživatelů rozdělených v závislosti na zkušenostech s kontrolou kvality svařenců.

## 1.2 Výzkumné otázky

Primárním záměrem této disertační práce je zkoumat vliv rozšířené reality na proces kontroly kvality svařence.

Pro dosažení tohoto záměru byly formulovány následující výzkumné otázky:

**RQ1:** Mohla by být AR využívána inspektory kvality svařovaných konstrukcí pro efektivní podporu kontrolních procesů v průmyslovém prostředí?

**RQ2:** Může HHD AR usnadnit interakci inspektorů s kontrolovaným produktem a proces interpretace dat a rozhodování?

**RQ3:** Jak může AR přístup ovlivnit výkon uživatele při kontrole kvality svařence?

Následující schéma uvádí přehled výzkumných otázek.

Výzkumné otázky	Výzkumné kroky a přínosy
<p>RQ1: Může být AR využívána inspektory kvality svařovaných výrobků pro efektivní podporu kontrolních procesů v průmyslovém prostředí?</p>	<p>Přehled současného stavu používání AR ke kontrole kvality v průmyslových aplikacích.</p> <p>Identifikace potřeby používat AR při kontrole kvality svařenců v průmyslovém prostředí pro efektivní podporu provedení a monitorování procesů.</p> <p>Návrh obecného metodického přístupu ke kontrolnímu procesu pro zpracování a vizualizaci dat při průmyslové kontrole</p> <p>Integrace technologie AR pro podporu vizualizace dat, jejich interpretaci, posouzení kontrolovaného dílu a rozhodování na pracovišti.</p>
<p>RQ2: Může HHD AR usnadnit interakci inspektorů s kontrolovaným produktem a proces interpretace dat a rozhodování?</p>	<p>Vytvoření komplexního AR SW přístupu pro podporu inspektorů kvality pro kontextovou analýzu vizualizace dat a kontrolovaného výrobku pomocí HHD AR.</p> <p>Zprostředkování imerzivního prostředí a interaktivních vizualizací pro snazší pochopení a interpretaci dat, pro zvýšení výkonnosti a uživatelského zážitku.</p>
<p>RQ3: Jak může AR přístup ovlivnit výkon uživatele při kontrole kvality svařence?</p>	<p>Návrh a provedení komparativní studie pro prokázání efektivity navrhovaného AR přístupu ve srovnání s konvenčními metodami a získání zpětné vazby.</p> <p>Zkoumání účinku navrženého AR přístupu a pomocných AR vizualizací na efektivitu plnění kontrolního úkolu.</p> <p>Statistické zpracování získaných výsledků a zkušeností z měření uživatelů během experimentu.</p>



## 2 Charakteristika zkoumané problematiky

V úvodní části této práce jsou představena východiska výzkumu a vymezena zkoumaná problematika.

### 2.1 Pozadí výzkumu

Tato práce se zabývá potenciálem spojení technologie rozšířené reality (Augmented Reality – AR) a vizuální kontroly kvality ve strojírenské výrobě. Inspekce kvality je nezbytná součástí výstupní kontroly průmyslových výrobků. Je náročná pro operátory, zejména na jejich dlouhodobé soustředění na detail.

Trendy celosvětového otevřeného trhu přináší strojírenskému průmyslu mnoho výzev. Společnosti jsou neustále pod tlakem zvyšovat svou produktivitu, aby si udržely tržní pozici. Podniky jsou v tržní konkurenci pod rostoucím tlakem na bezchybnou kvalitu, vysokou flexibilitu a zároveň minimální výrobní náklady. Jedním z nástrojů, jak tohoto dosáhnout, je mimo jiné důkladný monitoring kontrolních procesů a digitalizace a analýza dostupných standardizovaných dat.

Pro účely této práce bude přijímána Syamova [1] definice produktivity, který ji popisuje jako objem vysoce kvalitní produkce vyrobené použitými výrobními zdroji ve stanoveném čase. V souvislosti s touto definicí je potřeba vymezit pojem kvalita ve strojírenské výrobě. V literatuře je možné najít dva hlavní obecné směry v přístupu k definici kvality. Juran [2] definuje kvalitu jako přítomnost vlastností produktu, které splňují potřeby zákazníků, a tím zajišťují spokojenost zákazníka. Nahlíží tedy na kvalitu jako na prostředek k vyšší spokojenosti zákazníka s očekáváním navýšení podnikových příjmů. Druhý směr definice je zaměřen nákladově. Cílí tedy zejména na omezení nedostatků, které vedou k nutnosti oprav nebo opakování celého výrobního procesu a které mohou případně způsobit selhání v terénu u koncového uživatele, nespokojenost zákazníka a zákaznické reklamace.

Rozšířená realita je technologie, která doplňuje reálný svět o virtuální objekty, které zdánlivě existují ve stejném prostředí, a funguje interaktivně v reálném čase. Systémy rozšířené reality umožňují člověku přístup k digitálním informacím prostřednictvím informační vrstvy umístěné nad reálným světem. Zatímco v některých oblastech není AR ještě zcela připravena pro průmyslová nasazení, v jiných oborech se již běžně používá [3].

Technologie rozšířené reality vyžaduje vyspělé technologie, hardware i software. S výrazným rozvojem moderních HW i SW nástrojů během posledních několika let se tato technologie stává značně dostupnější. Tento trend je patrný také z množství zpracovaných vědeckých publikací, které v posledních letech narůstá.

Svařování je technologický proces, který slouží k vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje strojních součástí pomocí tepla při teplotě tavení obou materiálů nebo tlaku vyvolávajícího deformaci kontaktních ploch [4].

Úroveň automatizace v dnešních výrobních podnicích roste [5][6]. Vzhledem k požadavkům na vysokou kvalitu, rychlost a opakovatelnost se automatizace začíná rozvíjet i v procesech vysoce závislých na manuální práci, jako je i proces kontroly kvality. Na druhou stranu existuje stále řada typů výrob, pro které není z technologického nebo jiného důvodu plná automatizace vhodná nebo možná [7].

Nárůst komplexnosti a variability výroby vyžaduje odpovídající přizpůsobení výrobních procesů, což vede k potřebě častých změn při kontrole výroby [8]. Nutné změny musejí být do výrobních procesů implementovány efektivně a pružně, aby společnosti obstály v měnících se podmínkách na trhu [9]. Žádný systém není zcela bezchybný, procesy kontroly jsou proto ve výrobních systémech nezbytné k zachycení případné vady před dodáním zákazníkovi.

Kontrola kvality zahrnuje činnosti měření, porovnávání nebo testování jedné nebo více vlastností výrobku a porovnání výsledku se stanovenými požadavky s cílem zjistit, zda je u každé vlastnosti dosaženo shody [10].

Koren a kol. [11] zkoumali rekonfigurovatelné výrobní systémy a shrnují, že kvalitu výrobků jak na sériových linkách, tak ve flexibilních výrobních systémech je možné zajišťovat vložením bran kvality pro kontrolu přímo v průběhu jednotlivých fází výrobního procesu. Průběžná kontrola kvality má za úkol zabránit šíření vadných dílů do dalších fází výroby, a tím zvyšovat produktivitu a snižovat náklady [12] [13].

Tradičně je kontrola kvality prováděna manuálně ve chvíli, kdy operátoři nebo inspektoři sami kontrolují svou práci během operace, nebo kontrolují předchozí provedenou práci pro zajištění vysoké kvality [14]. Lidští operátoři jsou obecně schopní se dobře vyrovnávat s nepředvídatelnými situacemi, přizpůsobit se a být flexibilní při různých podmínkách s využitím, mimo jiné, tacitních znalostí [15] [16]. Provádění kontrol lidskými operátory je však spojeno s vysokými náklady na lidské, finanční a časové zdroje [17] [18].

Tradiční techniky kontroly kvality vykazují určitá omezení v kontextu moderní vysoce variabilní malosériové výroby. Existuje proto potřeba rychlejších, přesnějších, spolehlivějších a flexibilnějších řešení kvality [8] [19].

Aby mohlo docházet ke zvyšování kvality a zefektivňování kontrolních procesů, je potřeba optimálně propojovat ICT, modely umělé inteligence, nástroje kontroly kvality a vhodné využití dat k přizpůsobení se dynamickému prostředí. Rozvíjející se technologie, jako je například AR, a inteligentní systémy, poskytují výrobním podnikům nové možnosti pro řízení procesu kontroly kvality [20] [21].

## 2.2 Vymezení tématu

Tato práce se zabývá potřebou zkoumat využití technologie AR pro kontrolu kvality ve strojírenství, konkrétně v oboru svařování. Snaha o automatizaci kontroly kvality naráží v některých typech výroby na problémy ve snaze o nahrazení lidského inspektora při kontrole dílů [22] [23] [24].

Přestože existují studie, které navrhují aplikaci technologie AR pro kontrolu kvality, hlubší porozumění metodám použití, ovlivňujícím faktorům a problémům, které kontrolní proces v reálné průmyslové výrobě ovlivňují, je omezen.

Deniz a kol. [25] zkoumají otázku, jaké efektivity kontroly kvality je možné dosáhnout, pokud je manuální kontrola nahrazena plně kontrolou automatizovanou a jaký přínos by plně automatizovaná kontrola kvality mohla do výrobního systému přinést. Pfeiffer a kol. [26] se věnovali zkoumání otázek, jakou přidanou hodnotu má lidský operátor v procesu kontroly kvality a jaké nejistoty může robotický systém přinést do výrobního procesu, pokud je lidský operátor z kontrolního procesu odstraněn.

U dílů, u kterých není plná automatizace ve výrobě svařovaných výrobků z technologických nebo jiných důvodů vhodná nebo proveditelná, převládá metoda manuální kontroly svařování inspektorem. Při vizuální kontrole svařování je potřeba komplexní provedení kontrolního procesu. Musí se kontrolovat nejen kvalita provedení svarových spojů a parametry jako je převýšení, zápal, trhliny, studené spoje nebo jiné vady, ale také jejich rozmístění, počet, délka, velikost a také kompletace a správné umístění všech komponent [27] [28] [29] [30].

Takový kontrolní proces vyžaduje velkou míru koncentrace i odbornosti. Musí ho provádět zkušený expert s odbornými znalostmi a schopností interpretace i komplexní výkresové dokumentace. I přes vysokou kvalifikaci těchto pracovníků se však vždy jedná o subjektivní posouzení kontrolovaného dílu daným inspektorem a představuje tak pro inspektora relativně vysokou mentální zátěž. Míra soustředění může proto v průběhu směny polevit například vlivem únavy nebo při zvýšení tlaku ve výrobní špičce během dne [31].

Dalším důležitým aspektem v této souvislosti je skutečnost, že podobně jako v dalších oborech generace zkušených pracovníků stárne a nové pracovníky firmy těžce shánějí a pomalu zaučují na úroveň nutnou pro samostatné rozhodování. Pro kontrolu kvality je zároveň typické, že přesto, že se jedná o nezbytnou operaci všech výrobních systémů, nepřidává tato operace výrobně hodnotu produktu. Z výše uvedených důvodů je proto důležité tento proces maximálně optimalizovat a zvyšovat jeho spolehlivost [32] [33].

V návaznosti na uvedené studie tato práce hledá odpovědi na otázku, jak může být efektivita kontroly kvality ovlivněna, pokud je proces kontroly kvality podpořen technologií rozšířené reality.

### 2.3 Rozsah a limity výzkumu

Tato práce se zabývá oblastí strojírenského průmyslu a využitím pokročilých informačních technologií. Konkrétně je pozornost věnována rychle se rozvíjející technologii rozšířené reality a jejímu potenciálu v průmyslových aplikacích. Z průmyslových oborů se výzkum soustředí na obor svařování. Pozornost je zaměřena na typy průmyslových výrob, ve kterých není plná automatizace kontrolního procesu z technologických nebo jiných důvodů proveditelná nebo vhodná. Pro tuto práci byla pozornost zaměřena na malosériovou výrobu s vysokou variabilitou výrobků. Tato práce představuje výzkum zacílený na uživatele, tedy inspektora nebo operátora, který má za úkol po ukončení operace svařování zkontrolovat kvalitu provedené operace a rozhodnout, zda vyrobený díl odpovídá požadovaným specifikacím předepsaným pro tento produkt. Úkolem výzkumu je sledovat, jakým způsobem zapojení technologie rozšířené reality do kontrolního procesu ve strojírenské výrobě ovlivňuje sledované uživatele, jejich objektivní výkonnost, jejich vnímanou mentální zátěž během prováděné kontrolní činnosti, a posoudit vliv navržené metodiky na dvě sledované skupiny uživatelů, zkušené inspektory kvality a operátory s omezenými zkušenostmi s kontrolními postupy.

K experimentálnímu výzkumu je použita randomizovaná sada dílů za účelem zamezení efektu učení, který by mohl ovlivňovat výsledky. Umělé osvětlení představuje jeden z nejvýraznějších limitujících faktorů experimentů. Nedostatek světla může omezovat schopnost rozpoznání scény, na druhou stranu silné osvětlení může na lesklých površích

vytvářet odlesky, které negativně ovlivní funkci AR. Další omezení vyplývá ze struktury kontrolované sady dílů. Převážná část kontrolovaných dílů jsou výrobky vyhovující.

## 2.4 Struktura práce

Tato práce se skládá z několika částí. Po představení zkoumané problematiky budou v následující třetí kapitole vymezena teoretická východiska relevantní pro tento výzkum. Ve čtvrté kapitole budou shrnuty výsledky teoretické rešerše a představeny související výzkumy a studie. Pátá kapitola shrne rešeršní část a definuje hypotézy v návaznosti na výzkumné otázky. Na základě provedené rešerše bude v kapitole 6 navržen obecný metodický rámec pro kontrolu kvality s podporou AR. V kapitole 7 bude poté představen návrh a vývoj pilotního AR softwaru vytvořeného pro experimentální ověření části navržené obecné metodiky kontroly. Kapitola 8 shrne metodiku výzkumu a představí experiment pro ověření navržené metodiky. S pomocí zvolených statistických metod představených v kapitole 9 bude poté v kapitole 10 provedena detailní statistická analýza dat získaných v průběhu experimentu. Na závěr budou shrnuty výsledky tohoto experimentu, výstupy výzkumu a představena doporučení pro budoucí výzkum.

### 3 Teoretická východiska práce

Tato část představuje teoretický rámec tohoto výzkumu. Je postaven na tématech rozšířená realita, metodika kontroly kvality a automatizace ve strojírenské výrobě.

#### 3.1 Rozšířená realita

Tato úvodní část vymezuje technologii AR. Vzhledem k tomu, že se jedná o již poměrně známou a rozšířenou technologii, je poskytnuto jen stručné představení.

##### 3.1.1 Definice rozšířené reality

Rozšířená realita je celosvětově považována za jednu z nejvýznamnějších technologií 21. století a zároveň za jeden z pilířů nové průmyslové revoluce. Několik studií podrobně popisuje konkrétní aplikace AR vyvinuté za účelem ověření jejího potenciálu v různých oblastech. Na druhé straně stojí nedostatek zdrojů, které by podrobně popisovaly současné limity této technologie v případě jejího zavedení do reálného pracovního prostředí, kde by operátoři mohli provádět každodenní úkoly s využitím přístupu založeného na rozšířené realitě [34] [35] [36].

Od 90. let 20. století se ve vědeckých pracích objevilo několik definic AR [37]. Pro účely této práce byla přijata definice rozšířené reality autorů Santi a kol. [36], kteří AR shrnují jako techniku počítačové grafiky, při níž se k videostreamu vnějšího reálného prostředí v reálném čase přidává umělý virtuální objekt (například CAD model, symbol, obrázek, text).

Hardware a software potřebný k její realizaci závisí na konkrétní aplikaci a okolních podmínkách, složitosti virtuální scény, kterou je potřeba přidat a na zařízení, které uživateli virtuální model zprostředkuje v reálném čase. Minimální technické požadavky na hardware jsou dané kamerou snímající okolní svět, obrazovkou nebo objektivem pro promítání videostreamu a výpočetními prostředky potřebnými pro zpracování videozáznamu, detekci polohy a překrývání vizuálních symbolů na něj.

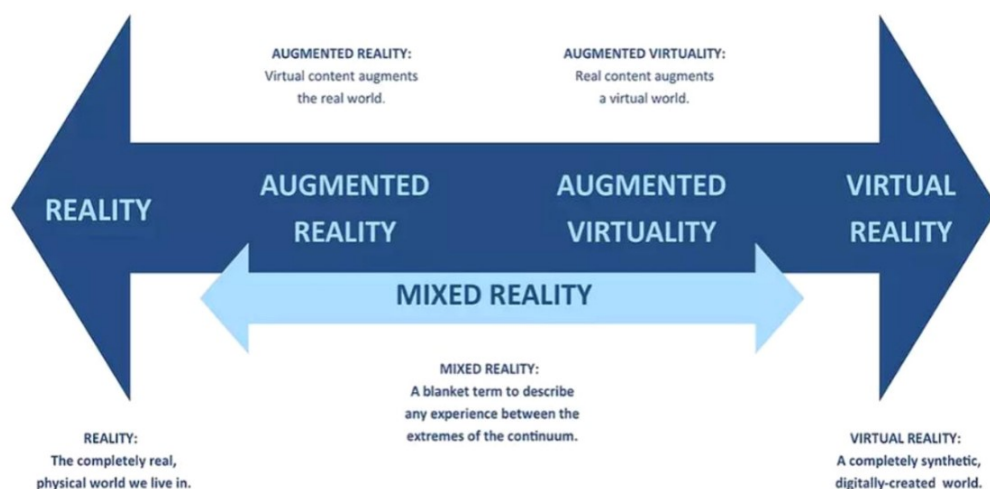
Mezi výzkumníky je o témata AR a Průmysl 4.0 velký zájem a dle databází Scopus a WOS je každému z těchto témat odděleně věnováno v posledních několika letech ročně více než 3000 příspěvků. Naproti tomu článků zkoumajících integraci AR a Průmyslu 4.0 je jen přibližně 100-150 ročně. To tedy naznačuje, že jsou tyto technologie v současné době studovány zatím spíše odděleně.

Ačkoli hlavní technologií popisovanou v této práci je AR, je vhodné vymezit vztah mezi AR (Augmented Reality), VR (Virtual Reality) a MR (Mixed Reality). Zatímco AR je technologie, která umožňuje přístup k digitálním informacím a překrývá tyto informace s fyzickým světem, VR umožňuje uživatelům účastnit se simulované reality. Definice AR jsou tedy podobné definici virtuální reality (VR), kdy hlavní rozdíl spočívá v tom, že zatímco ve VR je uživatel obvykle zcela oddělen od reality pomocí speciálních brýlí a neustále se pohybuje ve zcela virtuálním světě, uživatel v AR není nikdy od reality oddělen. Výše uvedené pojmy zasadil do kontextu Paul Milgram, který definoval kontinuum realita-virtualita, jak zobrazuje Obrázek 3-1.

V Milgramově definici AR je popsána celá oblast od reálného k virtuálnímu prostředí. Milgram uvádí 4 hlavní části: [38]

- Reálné prostředí
- Rozšířená realita
- Rozšířená virtualita
- Virtuální realita

Rozšířená virtualita zde byla definována jako součást kontinua smíšené reality, v níž jsou reálné objekty přidány k virtuálním. Stejně jako VR fungují obě ve virtuálním prostředí ve srovnání s AR, která vychází z reálného prostředí.



Obrázek 3-1: Kontinuum realita – virtualita dle [38]

### 3.1.2 Historie rozšířené reality

Ačkoli je rozšířená a virtuální realita populárním a rychle se rozvíjejícím konceptem hlavně v posledních letech, jeho počátky se datují do 60. let 20. století. První zmínku autoři připisují harvardskému profesorovi Sutherlandovi, který v roce 1968 vynalezl první prototyp zařízení upravené reality. Jednalo se o první Head Mounted Display (HMD), který se nosil na hlavě a měl zabudovanou zobrazovací optiku. Tato optika umožňovala uživateli ponoření do vizuálně simulovaného 3D prostředí [39].

Tato inovace však zůstala po mnoho let po svém prvním objevení neprozkoumaná. Popularita rozšířené reality začala stoupat až v 90. letech, kdy vědci Tom Caudell a David Mizell vyvinuli první systém rozšířené reality pomocí HMD. Hlavním cílem tohoto experimentálního systému AR bylo zjednodušit výrobní procesy v letectví [39].

V následujících letech vyvíjelo mnoho výzkumníků prototypy pro simulaci různých průmyslových aplikací s AR. Technologie AR se rozšiřovala a s ní i zájem nejen vědců a výzkumníků, ale i firem v mnoha oblastech použití, jako je vojenství, medicína, letectví nebo strojírenství.

Rychlý růst výpočetního výkonu, zvyšující se možnosti ukládání dat a stále nižší náklady na mobilní zařízení otvíraly stále nové možnosti využití technologie rozšířené reality. Významný

pokrok v oblasti hardwaru i vývoj softwaru, jako je například AR Toolkit, výrazně přispěl k pokroku systémů rozšířené reality [40].

Mobilní zařízení a chytré telefony se staly nezbytnou a základní součástí moderní spotřeby a života. Jak se technologie zdokonalovala, začalo být její používání firmami běžnější. Lze uvést několik příkladů praktického využití AR, jako je aplikace MARTA společnosti Volkswagen specializovaná na návody k obsluze automobilů, instrukce pro mechaniky, ale také pro kosmetické účely designu automobilů. Další známou praktickou aplikací byly brýle Google Glass, které společnost Google odhalila v roce 2014. Přestože úspěch Google Glass nenaplnil původní očekávání, jednalo se o velmi důležitý krok ve vývoji AR.

Mnohem úspěšnější aplikací nositelného systému AR byly HoloLens představené společností Microsoft v roce 2016. Testy potvrdily, že tato technologie vedle zvýšení produktivity a efektivity může přispívat i ke snížení chybovosti [40].

Podle nejnovějších návrhů vývoje by měla budoucnost s významem rozšířené reality výrazně stoupat. Očekává se, že zákazníci obecně budou více pracovat s realitou obohacenou o virtuální obsah. AR je tedy velmi perspektivní obor, který se neustále rozvíjí a má velký vliv na mnoho oblastí využití [35].

### 3.1.3 AR Software

V současné době existuje mnoho SW řešení a nástrojů, které umožňují vytváření aplikací pro AR [41]. Pro virtuální a rozšířenou realitu existuje mnoho knihoven pro vývojáře AR obsahu. Podrobné porovnání jednotlivých SDK (Software Development Kits) vypracovali například autoři Amin a kol. [42] nebo Khadse a kol. [43].

Jednou z možností jsou nástroje založené na sledování markerů, příkladem je ARToolkit. Tyto nástroje využívají speciální značky k získání orientace kamery použité k zachycení vnějšího světa. Další možností je Vuforia, která nabízí také pokročilejší technologii bez nutnosti používat markery. K určení orientace a polohy kamery se využívá jen samotná okolní scéna, díky schopnosti rozpoznávání vzorů na reálných 2D (image tracking) nebo 3D objektech (object tracking) mohou tyto sledované skutečné díly sloužit jako markery a poskytovat tak uživateli větší flexibilitu [44]. V kontrolním procesu tak tedy může být použitý jako marker i samotný kontrolovaný objekt. Tím je možné omezit nutnost použití markerů nebo jiných objemných sledovacích zařízení pro podporu AR. Gattullo a kol. [45] tuto schopnost hodnotí jako jednu ze zásadních pro možnost rozšíření použitelnosti AR aplikací z laboratorních výzkumů do reálných průmyslových aplikací.

Další důležité nástroje ARCore a ARKit představily společnosti Google a Apple. Oba nástroje snímají prostředí pomocí své kamery. ARCore, který se vyvinul z předchozího „Project Tango“ funguje na moderních Android zařízeních. ARKit funguje na rozdíl od ARCore pouze na zařízeních s operačním systémem iOS. Tyto nástroje jsou schopné ukotvit hologramy do horizontálně mapovaného prostředí, nové aktualizace rozvíjejí také práci s vertikálními rovinami [36]. Knihovny jako OpenCV jsou zásadní pro funkci zpracování obrazu, protože dokáží získávat obraz z kamery a aplikovat filtry a matematické algoritmy pro rozpoznání vzorů, které jsou základem image tracking.

Nejrozšířenější softwarové nástroje, díky kterým je možné uživatelsky příjemně pracovat s těmito knihovnami, jsou například Unity a Unreal. Unity 3D je multiplatformní herní engine nabízející širokou škálu nástrojů a funkcí a umožňující tvorbu interaktivních 2D a 3D aplikací

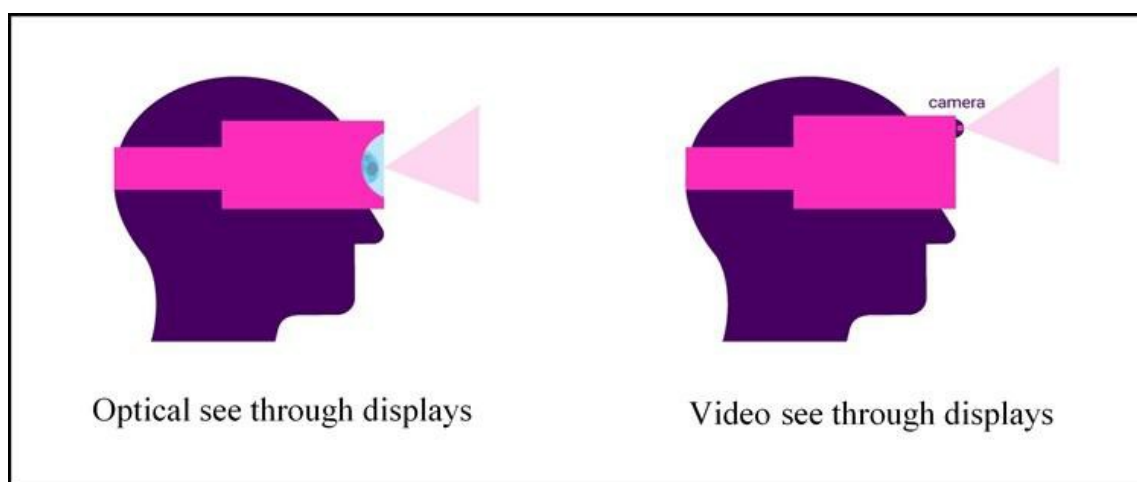
pomocí vizuálního editoru a propojení s externími i interními zdroji. V prostředí těchto softwarů je možné využívat mnoho kódů najednou a vytvářet v nich výslednou scénu, na které AR fungují. Aplikace v nich vytvořené je možné kompilovat pro různé platformy jako je Android, iOS, Windows.

### 3.1.4 AR Hardware

Hlavním faktorem při volbě hardwaru pro aplikaci AR je rozsah konečné aplikace. Existuje několik hlavních kategorií displejů, které lze použít k zobrazení sloučeného reálného a virtuálního prostředí: [46]

- Head-mounted Displays
- Hand-held Displays
- Spatial Displays

Tyto displeje mohou fungovat dvěma různými způsoby, a to jako optical see-through (OST) a video see-through displays (VST), jak ukazuje Obrázek 3-2 [47]. Technologie VST je založena na použití kamery, která snímá vnější scénu. U OST jsou virtuální symboly nebo modely přidávány v reálném čase do videostreamu. Zařízení OST promítají syntetické virtuální modely na poloprůhledné čočky, kdy uživatel tak vidí skutečný vnější svět doplněný o virtuální model. Při VST na druhou stranu vidí uživatel skutečný svět na displeji zařízení.



Obrázek 3-2: Optical see-through display vs. video see-through display [47]

HMD se nasazují na hlavu uživatele a umožňují tak pohled na reálné i virtuální prostředí.

HHD jsou systémy, které uživatel drží v ruce, typicky tablety nebo chytré telefony. HHD využívají technologii VST. Hlavní výhodou HHD je jejich přenosnost. Také díky rychlému vývoji chytrých telefonů po celém světě dostupnost této technologie rychle roste. Naprostá většina těchto zařízení je vybavena kamerami a globálním systémem určování polohy (GPS), a jsou tak vynikající platformou pro aplikaci rozšířené reality. Spatial displays nejsou ve srovnání s HMD a HHD spojeny s tělem uživatele.

Výzkumy zaměřené na zkoumání potenciálu AR pro Průmysl 4.0 se shodují, že přestože je AR technika počítačové grafiky dobře známá a ustálená ve výzkumných aplikacích, pro její zavedení do průmyslového provozu jsou nutná další vylepšení z hlediska SW i HW. Pro širokou aplikaci AR v průmyslovém prostředí navrhuje autoři například vývoj brýlí AR s vysokými výpočetními schopnostmi, dobrými ergonomickými vlastnostmi a odolností vůči světelným



podmínkám. Z hlediska budoucího vývoje SW autoři vyzdvihují například správu automatického nastavení globálního a přímého osvětlení v závislosti na poloze uživatele ve vnitřním nebo vnějším prostředí, okluzi a její realistickou implementaci, rozvoj práce s CAD modely a propojení AR SW s CAD systémy nebo uživatelsky příznivá rozhraní člověk-stroj, která mohou využívat gesta ruky [36].

## 3.2 Kontrola kvality

Ve druhé části této kapitole je krátce shrnuta problematika procesu kontroly kvality ve strojírenských výrobních systémech.

### 3.2.1 Představení kontroly kvality

Kontrola kvality ve výrobních systémech je ústředním tématem této práce. Pro účely této práce byla přijata definice Groovera, která definuje výrobní systém jako „lidi, zařízení a postupy, které jsou organizovány pro kombinace materiálů a procesů, které tvoří výrobní operace společnosti“ [48].

Kontrola kvality se používá ke zjištění shody výrobku s výrobními standardy a zahrnuje činnosti jako je měření, zkoumání a testování vlastností.

Každý úkol ve výrobním podniku je možné zařadit do jedné ze tří kategorií: [49]

- Aktivita přidávající hodnotu.
- Podpůrné aktivity jako je kontrola kvality, které nepřidávají hodnotu výrobku, ale jsou v současném výrobním procesu nezbytné.
- Aktivita ztrátové.

Význam kontroly kvality není možné v moderních výrobních systémech přehlížet. Jedná se o jeden z hlavních procesů řízení kvality a spočívá v hodnocení skutečného stavu, porovnávání skutečného stavu s cíli kvality a jednání na základě shody nebo rozdílu [50]. K zajištění uspokojivé kvality výrobků v rámci řízení kvality podniky obvykle používají proces kontroly kvality k odhalení odchylky před dodáním zákazníkovi [48].

V této práci je kontrola kvality definována jako manuální nebo automatická činnost rozhodování o shodě zkoumané charakteristiky s určitým požadavkem. Pro správnou funkci kontroly kvality v moderních strojírenských systémech musí systém kontroly a řízení kvality mít nejen schopnost odhalovat vady, ale také se přizpůsobovat novým normám a požadavkům systému řízení výroby a zároveň tak předcházet opětovnému výskytu historických chyb [51].

### 3.2.2 Měřicí systém

MSA (Measurement System Analysis) je soubor pokynů pro hodnocení kvality systému měření [52].

Pro účely MSA je systém měření definován jako „soubor přístrojů nebo měřidel, etalonů, operací, metod, přípravků, SW, personálu, prostředí a předpokladů používaných ke kvantifikaci měřné jednotky nebo stanovení hodnocení měřené charakteristiky“. Aby kontrola kvality fungovala správným způsobem, musí být proces měření zbaven nejistot. Společným rysem každého postupu měření je porovnání neznámé hodnoty se známou hodnotou [48].

Tento systém popisuje dva rozhodující aspekty předepsaného standardu:

- Předepsaný a porovnávaný standard musí být konstantní a nesmí se měnit v čase.
- Zároveň musí být založen na soustavě jednotek, která je konsistentní a známá uživatelům.

Všechny měřicí přístroje mají vlastnosti, které umožňují jejich používání v aplikacích, pro které jsou určeny. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří přesnost, preciznost, rychlost odezvy, pracovní rozsah nebo cena [48]. Míra, do jaké se naměřená hodnota shoduje se skutečnou hodnotou sledované veličiny, se nazývá přesnost měření. Přesnost je mírou reprodukovatelnosti měření. S rostoucí přesností se snižuje míra náhodných chyb v procesu měření.

Gao a kol. představuje klasifikaci různých podmínek procesu měření. Upozorňuje, že maximální účinnost kontroly kvality nastává, pokud se měření provádí v místě co nejbližší výrobnímu procesu. Tím je umožněna rychlá reakce na odchylky dílů a případné korekce výrobního procesu [23].

### 3.2.3 Přesnost kontroly

Kontrola kvality není stejně jako jakýkoliv jiný proces bezchybná. Chyby vycházející z kontrolního procesu se mohou objevovat během zkoumání i rozhodování. Položky vyhovující kvality jsou například nesprávně klasifikovány jako neshodné s předepsanými specifikacemi a neshodné díly mohou být chybně vyhodnoceny jako vyhovující.

Při manuální kontrole jsou tyto chyby důsledkem například některých z následujících faktorů: [53][54]

- Složitost a obtížnost kontrolního úkonu
- Přirozené odchylky kontrolního postupu
- Nutnost úsudku požadovaného od lidského operátora nebo inspektora
- Mentální únava lidského kontrolora
- Nepřesnost nebo problémy s měřidly nebo měřicími přístroji používanými při kontrole

Pokud je díl kontrolován plně automatizovaným systémem, dochází k chybám při kontrole v důsledku následujících faktorů: [53] [54]

- Složitost a obtížnost kontrolního úkolu
- Rozlišovací schopnost kontrolního snímače
- Poruchy zařízení
- Chyby v programu řídicím kontrolní postup

Imkamp a kol. [9] předpověděl pět budoucích témat vývoje měření a kontroly kvality pro řešení výroby bez chyb:

- Rychlost (zkrácení doby měření)
- Přesnost (snížení chyb měření a zvládnání nejistot)
- Spolehlivost (ověření nejistot měření)
- Flexibilita (zvyšování hustoty informací a rozmanitosti měřících technik)
- Holistický přístup (příslušné charakteristiky kvality jsou spojeny dohromady a tvoří základ pro hodnocení kvality výrobku)

Z hlediska vývoje jsou první tři témata spojena především s technologickým vývojem, zatímco poslední dvě vyžadují změnu metodiky.

### 3.3 Automatizace v průmyslovém prostředí

Průmyslové podniky se v souvislosti se změnami na světových trzích musejí vyrovnávat s řadou výzev. Mezi tyto výzvy patří nedostatek kvalifikované pracovní síly, nízká míra nezaměstnanosti a pokles zájmu o dělnické pozice. Podniky tak čelí vysoké fluktuaci pracovní síly a snižování kvality produkce.

Jedním z řešení těchto problémů je rozvoj automatizace výrobních a kontrolních procesů. Automatizace v tomto pojetí tedy nemá za úkol pouze optimalizaci nákladů, ale celkovou podporu podnikových procesů pro zajištění spokojenosti zákazníků a plnění podnikových strategií.

Pro pojem automatizace je možné najít řadu definic. Jedna ze základních definic popisuje automatizaci jako „proces náhrady lidské činnosti za strojní činnost“. Pro účely této práce však bylo přijato chápání automatizace jako „plné nebo částečné náhrady činností vykonávaných lidským operátorem“ [30]. Uvedená definice poukazuje na škálovatelnost míry automatizace.

Moderní výroba podporovaná novými technologiemi, mezi které patří i AR, stále více směřuje k vyšší flexibilitě, propojenosti a inteligenci [55]. Tento celosvětový trend se snaží o větší propojení kybernetického a fyzického světa a všech souvisejících činností prostřednictvím IoT [9].

Očekává se, že moderní výrobní systémy budou vysoce automatizované, flexibilní, ovladatelné na dálku v reálném čase a odolné vůči odchylkám na všech úrovních, což by mělo přinést výrazné zvýšení produktivity a efektivity zdrojů [54]. Pojem flexibilita je chápán jako „schopnost systému měnit své chování, aniž by se změnila jeho konfigurace“ [56]. Podle Takaya a kol. [57] by měla být integrace CAD, CAM, CAE dat spolu s historickými údaji o výkonnosti systému [5] zaznamenána pro podporu procesu rozhodování a zabránění opakování historických problémů a vad [58].

I v automatizované výrobě je potřeba kontrolovat provedenou práci. Kontrola kvality zde plní následující funkce: [48]

- Ujistit se, že je daný proces plně dokončen.
- Zajistit, že díly byly sestaveny kompletně a dle specifikace.
- Identifikovat vady materiálu.

Parasuraman a kol. zkoumají implikace automatizace a otázku, co by mělo být do jaké míry automatizováno [29]. Navrhují, aby designéři rozdělili úkoly mezi lidi a stroje s ohledem na 4 skupiny systémových funkcí:

- Získávání informací
- Analýza informací
- Rozhodování a volba akcí
- Provádění akcí

V dostupné literatuře je představeno několik přístupů ke škálování míry automatizace [30]. Pro potřeby této práce byla přijata metoda Levels of Automation (LoA), která chápe

automatizaci jako proces postupného nahrazování lidské činnosti za strojní a je sledována ze dvou následujících aspektů: [33]

- Mechanický aspekt (mechanizace je vnímaná jako automatizace fyzických úkonů, která představuje rozvoj strojního zařízení a vybavení)
- Kognitivní aspekt (komputerizace je vnímaná jako automatizace řízení a nakládání s informacemi, která představuje rozvoj sběru dat a nakládání s informacemi a řízení technologie)

Endsley a Kaber navrhli desetiúrovňovou škálu pro širší použitelnost na řadu kognitivních úloh vyžadujících řízení v reálném čase, kterou zachycuje Obrázek 3-3 [33].

Tato práce se věnuje výzkumu neúplné automatizace odpovídající úrovni 4-5 na uvedené škále.

		<b>Role</b>			
<i>Úroveň automatizace (LoA)</i>		<i>Monitoring</i>	<i>Generování</i>	<i>Výběr</i>	<i>Implementace</i>
1	<b>Manuální kontrola</b>	Člověk	Člověk	Člověk	Člověk
2	<b>Podpora úkolu</b>	Člověk/počítač	Člověk	Člověk	Člověk/počítač
3	<b>Variantní zpracování</b>	Člověk/počítač	Člověk	Člověk	Počítač
4	<b>Sdílená kontrola</b>	Člověk/počítač	Člověk/počítač	Člověk	Člověk/počítač
5	<b>Podpora rozhodování</b>	Člověk/počítač	Člověk/počítač	Člověk	Počítač
6	<b>Sdílené rozhodování</b>	Člověk/počítač	Člověk/počítač	Člověk/počítač	Počítač
7	<b>Rigidní systém</b>	Člověk/počítač	Člověk	Člověk	Počítač
8	<b>Automatizované rozhodování</b>	Člověk/počítač	Člověk/počítač	Počítač	Počítač
9	<b>Dohledové řízení</b>	Člověk/počítač	Člověk	Počítač	Počítač
10	<b>Plná automatizace</b>	Počítač	Člověk	Počítač	Počítač

Obrázek 3-3: Stupnice úrovní automatizace dle [33]

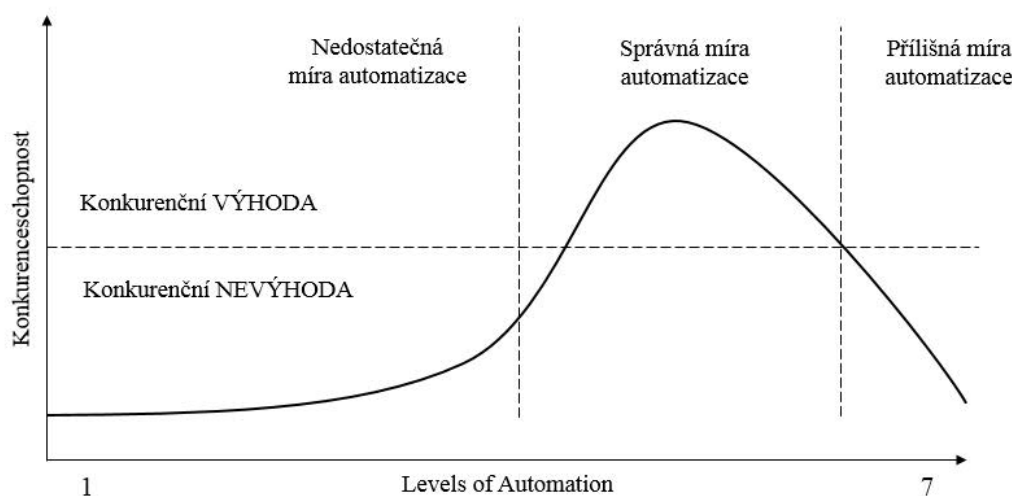
Pro průmyslové prostředí je rozvoj automatizace úzce spojen s následujícími faktory:

- Technická proveditelnost
- Náklady na vývoj a implementaci
- Dynamika trhu práce
- Ekonomické přínosy
- Tvorba legislativy a norem

Výrobní podniky mohou narážet na různé bariéry zavádění automatizace, díky kterým není plná automatizace výhodná nebo proveditelná: [48]

- Jedná se o činnost, která je technicky příliš složitá pro plnou automatizaci. U některých úkonů může být plná automatizace na hraně technických možností a je proto spojená s relativně velmi vysokými náklady a zároveň rizikem nízké spolehlivosti.
- Životní cyklus výrobku je příliš krátký a není proto časově možné nebo finančně výhodné plnou automatizaci realizovat.
- U výroby na zakázku není plně automatizované provedení výrobního a kontrolního procesu možné.
- Při velkých výkyvech poptávky není možné zaručit návratnost vstupní investice do plné automatizace procesu.
- Při zavádění nového výrobku na trh existuje riziko neúspěchu nebo potřeby dalších konstrukčních úprav, pro snížení tohoto rizika se plná automatizace zavádí až postupně se stabilizací výrobku na trhu.

Rozvoj automatizace může podpořit výrobní podniky při zvyšování produktivity a kvality produkce. Na druhou stranu zavádění automatizace v nevhodných situacích za hranicí proveditelnosti nebo užitečnosti může vést k opačnému výsledku, kdy podnik nebude schopen se flexibilně přizpůsobovat potřebám výroby či přáním zákazníka, nebo bude riskovat pokles produktivity [59]. Graficky tuto situaci shrnul Obrázek 3-4.



Obrázek 3-4: Vztah konkurenceschopnosti a míry automatizace dle [33]

Při nedostatečné míře automatizace může podnik čelit nedostatečné produktivitě, kvalitě nebo ergonomii, tato varianta je však spojena s nízkými náklady na investice, údržbu. Na druhou stranu přílišná míra automatizace může způsobit pokles pružnosti, produktivity a problémy s plněním termínů ve výrobě. Zároveň vyžaduje vysoké vstupní investiční náklady a nároky na údržbu. Přesto, že by v tomto případě měla automatizace teoreticky vést ke zvýšení kapacity a kvality, z důvodů převažujících provozních problémů není možné tyto výhody využít. Výrobní podniky by proto měly najít relativně optimální míru automatizace vzhledem k charakteru svých podnikových procesů.

## 4 Související výzkumy a studie

V této části práce jsou představeny výsledky teoretické rešerše, které mají souvislost se zkoumaným tématem.

### 4.1 Představení teoretické rešerše

Hlavním zdrojem pro teoretickou rešerši byly databáze Scopus a Web of Science.

V těchto databázích byly vyhledávány dostupné zdroje na základě následujících specifikací:

- Definované klíčové pojmy
  - „Augmented Reality“, „Inspection“, „Quality“, „Industry 4.0“
- Výsledky v anglickém jazyce
- Příspěvky především od roku 2011 do současnosti
- Vědecké články, příspěvky ke konferencím a odborné knižní zdroje

Výsledkem bylo 90 zdrojů splňujících zadané vyhledávané parametry. Tyto výsledky zahrnují mimo strojírenství také především obor stavebnictví a letectví. První příspěvky věnované zkoumané problematice jsou datované od roku 2002, kdy se objevuje první zmínka o možném použití AR v průmyslovém prostředí ke kontrolní činnosti. Zvláštní pozornost v této rešerši je věnována příspěvkům od roku 2011, kdy byla představena koncepce Průmyslu 4.0.

Z rešerše vyplývá, že rostoucí množství dostupných holistických dat vyžaduje interoperabilitu (například s pomocí cloud computing), zapojení inteligentních modulů (například s podporou AI), a změnu metodiky pro kontrolu kvality.

Výsledky rešerše dále ukazují, že pro přizpůsobení kontroly kvality potřebám moderní výroby hrají informační a komunikační technologie zásadní roli ve vzájemném působení mezi výrobními procesy s přidanou hodnotou, monitorovacím systémem a kontrolními systémy.

Tato práce se věnuje zkoumání AR při kontrolních procesech v oblasti strojírenské výroby. Pro teoretickou rešerši bylo nicméně čerpáno z článků z různých oborů pro vyhledávání přístupů a studií, které mohou být přínosem pro výzkum zaměřený na oblast strojírenství.

Rostoucí požadavky zákazníků na variabilitu výrobků vyvolaly značný tlak na výrobní společnosti. Aby si udržely svou konkurenceschopnost, musejí výrobní podniky často a efektivně přizpůsobovat své procesy a zároveň poskytovat vysoce kvalitní výrobky.

Základem pro tuto část práce je rešerše literatury. Syntéza stávající literatury slouží jako základ pro rozvoj znalostí, usnadňuje rozvoj potvrzujících teorií, zamítnutí nerelevantních oblastí výzkumu a identifikaci synergie v rámci stávající literatury [60] [61].

### 4.2 Metodika kontroly kvality

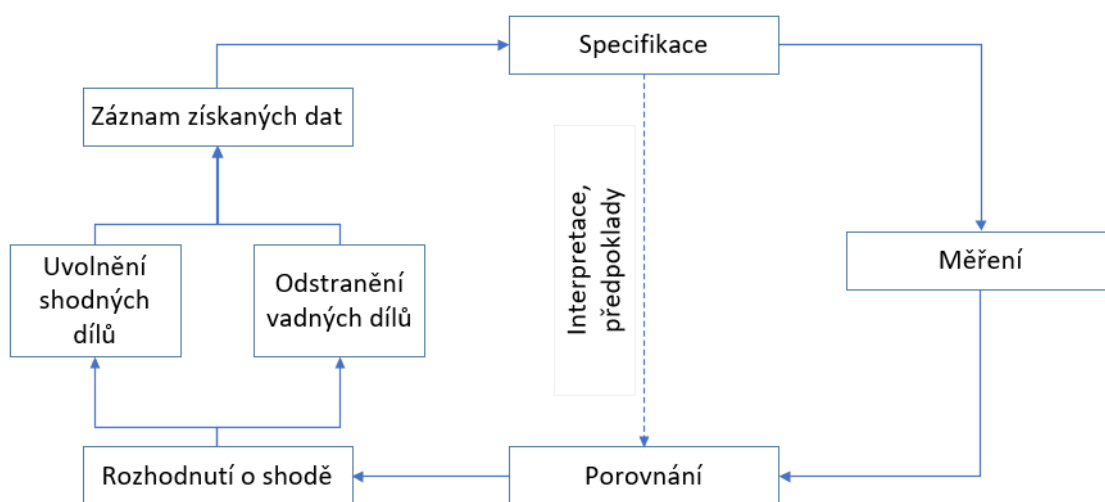
Cílem této části je získat přehled o existujících modelech a metodikách kontroly kvality a na základě této znalosti následně navrhnout komplexní metodiku kontroly kvality svařenců ve strojírenské výrobě s podporou AR.

Z dostupné literatury bylo vyzdviženo několik autorů, kteří se zaměřují na studium a výzkum procesů kontroly kvality v průmyslu a obecně na možnosti automatizace a zlepšování

produktivity. V dalším textu jsou identifikovány klíčové směry a obecné modely, které je potřeba prozkoumat pro hlubší pochopení dané problematiky.

Jedno ze základních obecných vymezení kontrolního procesu představil Juran, který navrhl 7 hlavních kroků kontroly kvality, které jsou znázorněny na následujícím schématu: [50]

- Identifikace a interpretace specifikace
- Měření kvality zkoumané charakteristiky
- Srovnání mezi interpretací specifikace a výsledkem měření dané charakteristiky
- Proces posouzení shody
- Uvolnění vyhovujících položek do dalších fází procesu
- Vyřazení nevyhovujících položek
- Zaznamenání získaných informací



Obrázek 4-1: Sedm základních kroků kontrolního procesu dle [50]

V Juranově modelu tok informací začíná u informací definovaných konstruktérem. Interpretace specifikací a příslušných předpokladů ovlivňuje celkovou kvalitu kontroly. Záznamy získaných údajů mohou být v případě potřeby použity k aktualizaci specifikací. Kontrolní model se tak chová jako uzavřená smyčka.

Přestože je Juranův model vhodný jak pro manuální, tak pro automatickou kontrolu, jedná se o koncepci silně ovlivněnou lidským chováním. Lidského operátora Juran definuje jako součást socio-technologického systému. Z tohoto důvodu si je vědom trendů výrobního procesu, lidí zapojených do výrobního procesu a kvality jejich práce. Tato znalost slouží inspektorovi jako výhoda, protože mu poskytuje výhodu při odhadu možného umístění vady.

Přesněji tak může předem stanovit kontrolní strategii. Na druhou stranu proces interpretace normy lidským operátorem může vést k určité míře odchylky od specifikací zamýšlených konstruktérem. Tato skutečnost je v následujícím modelu PISMOEA charakterizována jako „Assumptions“.

Obecný model kontrolního procesu může být vyjádřen zkratkou PISMOEA, která zastupuje hlavní zdroje variability kontrolního procesu: [52]

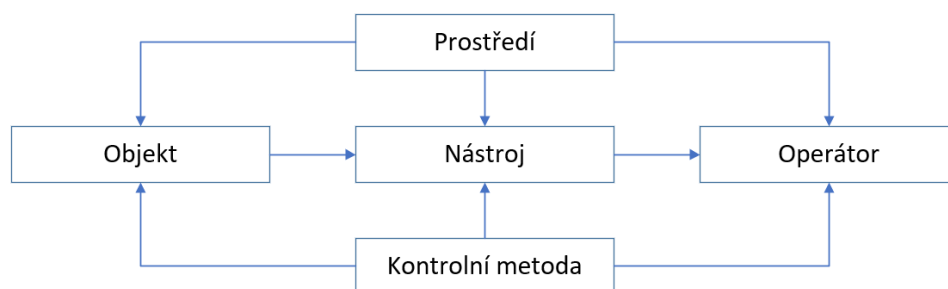
- Part
- Instrument
- Standard
- Method
- Operator
- Environment
- Assumption

Podobně zkratka SWIPE vyjadřuje základní prvky zobecněného kontrolního systému: [52]

- Standard
- Workpiece
- Instrument
- Person and Procedure
- Environment

Pendrill definoval měřicí systém jako koncepci zahrnující následující prvky: [62]

- Měřený objekt
- Měřicí nástroj nebo vlastní úsudek operátora
- Operátor nebo inspektor, který manipuluje s měřicím nástrojem a rozhoduje o shodě
- Měřicí metoda
- Prostředí



Obrázek 4-2: Schéma kontrolního procesu dle [62]

V tomto modelu kontrolního systému (Obrázek 4-2) jsou informace přenášeny z objektu měření, často například prostřednictvím měřicího nástroje k operátorovi. Objekt, přístroj a operátor jsou hlavními prvky kontrolního systému. Metoda měření a prostředí však mohou ovlivnit hlavní prvky systému při zajišťování celkové kvality kontrolního procesu.

Propojení modelů kontrolního procesu a koncepce Průmyslu 4.0 vymezil jako jeden z prvních Imkamp a kol. [9]. Autoři zde určili 5 hlavních vývojových oblastí kontroly kvality, které musejí reagovat na trendy a výzvy čtvrté průmyslové revoluce. Z těchto témat se první



tři týkají především technologického pokroku. Poslední dvě témata zároveň zahrnují změnu metodického přístupu. Mezi tyto výzvy patří:

- Rychlost
- Přesnost
- Spolehlivost
- Flexibilita
- Holistický přístup

Složitost posuzování shody se zvyšuje s rostoucí integrací nedestruktivních měřících technik. Technickými trendy v oblasti procesní kontroly a měření se zabýval Takaya [57]. Takaya ve své práci navrhl rozšíření kontroly kvality a navrhl komplexní strategický model kontroly v uzavřené smyčce, kde integroval CAD/CAM/CAE data s holistickými měřícími technikami.

Majstorovic a kol. vycházeli z požadavků charakterizujících smart továrnu, to znamená především optimalizaci, flexibilitu, odolnost prostředí proti poruchám, schopnost sebeoptimalizace a řízení rizik [63]. Na základě těchto předpokladů navrhli rámec pro kontrolní model ve strojírenství. Ten se skládá z následujících dílčích modulů:

- Rozpoznání geometrických vlastností
- Inteligentní plánování kontroly
- Analýza výsledků, generování zpráv a poskytnutí reportů všem zainteresovaným subjektům v životním cyklu výrobku

Při přizpůsobování kontroly kvality moderní strojírenské výrobě hrají ICT zásadní roli při interakci mezi procesy přidávajícími hodnotu, systémem monitoringu a kontrolním systémem. Kontrolní systém by měl využívat dostupné databáze při provádění činností předcházejících měření, při kterých probíhá odhad odchylky na základě údajů z konkrétního a výrobního procesu a následně při tvorbě kontrolní strategie. S rostoucím množstvím dostupných informací je důležitý strategický přístup ke kontrolnímu procesu k omezení časově náročných postupů měření. Někteří autoři pro tento účel popisují využití dolování a analýzy dat pro kontrolu kvality. Další autoři zdůrazňují důležitost vývoje inteligentních kontrolních systémů, které by mohly přispět ke zmírnění výskytu vad ve výrobním procesu, a zabránění opakovanému výskytu dříve zachycených historických vad.

Použití technik kontroly poskytuje poznatky z výrobního systému měření jedné nebo více charakteristik výrobku, které potvrzují shodu nebo neshodu s požadavky. S ohledem na technologický pokrok a nárůst množství dostupných dat jsou na systém řízení kvality kladeny stále vyšší nároky. Cílem průmyslových podniků je zajištění výrobního systému bez vad.

Musí být proto umožněna provázanost a plynulá spolupráce zdrojů kontroly kvality pro podpoření rozhodování o shodě. Shoda zkoumaných geometrických vlastností výrobku přímo souvisí s výkonností systému kvality a zároveň s výrobními operacemi, které přidávají výrobku hodnotu a předcházejí kontrolnímu procesu. Pro plnění klíčových funkcí kontrolního procesu je nutné propojení všech zdrojů. Různé studie se proto zaměřily na zkoumání rozvoje ICT pro zajištění integrace konektivity do systémové kontroly kvality [63] [64] [65]. Využívají k tomu především cloud computing. Zpřístupnění systému kontroly kvality pro všechny subjekty v životním cyklu výrobku, jako jsou konstruktéři a technologové, mohou umožnit vyšší transparentnost i úpravy na základě nových potřeb kontrolního systému.

Další studii představili autoři Azamfirei a kol. [66], kteří zkoumali možnosti zlepšení kontrolních procesů zavedením in-line robotické kontroly kvality pro dosažení tzv. „zero defect manufacturing“ [66]. Ve své studii vycházeli z rozsáhlé rešerše literatury doplněné o několik případových studií provedených v úzké spolupráci s výrobními podniky. Studie se zaměřuje na výzkum plně automatizované robotické inspekce.

Tato práce si neklade za cíl zkoumat plně robotickou automatizaci, nýbrž hledat prostor pro zajištění digitalizované podpory s pomocí rozšířené reality manuální kontroly kvality ve strojírenství v případech, kdy plná automatizace kontrolního procesu není z hlediska charakteru výroby nebo výrobku možná nebo vhodná.

Přes tyto odlišnosti v cíli výzkumu je možné ve studiích [66] nalézt řadu podobných charakteristik. Některá zobecněná východiska, předpoklady nebo zjištění je možné využít a navázat na ně v dalším výzkumu i v nových přístupech ke kontrole kvality.

Na základě rešerše literatury Azamfirei identifikuje potřebu zlepšování procesů kontroly kvality a navrhuje víceúrovňový koncept kontroly kvality vhodný pro digitální transformaci tohoto oboru [66]. Předpokladem pro tuto koncepci jsou kvalitní vstupní i výstupní data, která mají být holistická, validní a dostupná online. Za těchto předpokladů může systém efektivně rozhodovat o shodě a překonávat výzvy z hlediska spolehlivosti, flexibility a autonomie. Na těchto požadavcích z hlediska vlastností používaných dat se shoduje i řada dalších autorů, například [67], [68], [9]. Například Babu chápe roli propojení databáze s dostupnými holistickými daty podobně jako Juran chápe ve svém modelu roli inspektora, který díky svým znalostem a zkušenostem přesněji odhaduje výskyt výrobní vady nebo odchylky od specifikace a vytváří tak strategii pro kontrolu kvality [58].

Uvedené předpoklady jsou základem také pro tuto práci, která rovněž vychází z nutnosti určité úrovně kvality vstupních i získaných dat.

Jedním z předpokladů pro další výzkum je tedy dostupnost následujících prvků:

1. Holistická data

Výrobní proces nevyhnutelně ovlivňuje geometrické vlastnosti výrobku i jeho funkčnosti. Různé modely řízení kontroly navrhuje integraci CAD/CAM/CAE modelů a online podporu výrobních operací. Dále je navrhováno zaznamenávat historické údaje o výkonnosti systému, aby se usnadnil proces rozhodování a zabránilo se opakování historických chyb. To pomůže vytvořit vyšší úroveň znalostí, která umožní sebeoptimalizaci kontrolního procesu a zajistí integraci mezi různými prvky kontroly kvality.

2. Inteligentní kontrolní systém

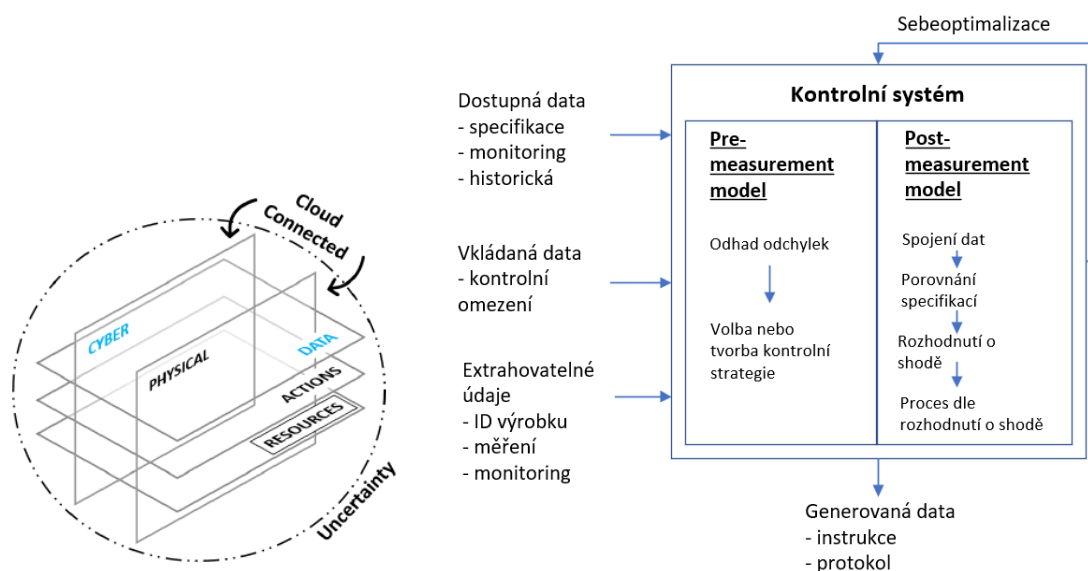
S rostoucím množstvím dostupných informací je důležitý strategický kontrolní proces, aby se zabránilo časově náročným postupům měření. Nedávné práce v této oblasti zavedly využití dolování a analýzy dat pro kontrolu kvality. Aby kontrolní systém plně využíval dostupné informace, měl by být vytvořen inteligentní model pro kontrolní proces.

3. Zdroje propojené cloudem

Přístupnost systému kontroly kvality všem zúčastněným subjektům v životním cyklu výrobku umožňuje nejen úpravy na základě nových potřeb, ale zároveň také vyšší transparentnost.

Tradiční metody kontroly kvality trpí různými omezeními v moderní malosériové výrobě typické pro malé a střední podniky. Aby systém kontroly kvality splňoval požadavky koncepce Průmyslu 4.0, je potřeba zvýšit flexibilitu systému a zvýšit spolehlivost procesu rozhodování o shodě. Mnoho výzkumů poukázalo na potřebu metodických změn při provádění kontroly kvality [9], [69], [58].

Za účelem maximálního využití dostupných dat vydefinovali autoři [66] inteligentní „pre-measurement“ a „post-measurement“ modely, které by měly být zahrnuty do strategického kontrolního systému. Strategie kontroly by měla brát v úvahu data zadaná konstruktérem nebo technologem a zároveň historické záznamy z kontroly. Tuto fázi Azamfirei a kol. vymezili jako fázi před měřením. Všechny zdroje dat podléhají nejistotě nebo předpokladům, které mohou negativně ovlivnit proces rozhodování o shodě. Proto je proces porovnávání naměřených výsledků se standardy definovanými konstruktérem zásadní pro kontrolní systém. Fázi po měření definují jako syntézu dat z měření, monitoringu a databáze. Úkolem této fáze je získání přesnějších, konzistentnějších a užitečných informací. Autoři také představili nový pohled na rámec kontroly kvality jako na sestavu pěti vrstev. V tomto modelu se zdroje, činnosti a data vzájemně ovlivňují ve fyzické a kybernetické podobě, kdy každá představuje jednu vrstvu. Koncept znázorňuje Obrázek 4-3.



Obrázek 4-3: Rámec kontrolního systému dle [66]

Z tohoto rámce vychází nové pojetí koncepce kontrolního procesu těchto autorů. Základem tohoto modelu je předpoklad, že používaná i získávaná data jsou holistická, validní a online. V tomto systému je tak možné efektivně rozhodovat o shodě a překonat tak výzvy v oblasti spolehlivosti, flexibility a autonomie. Navržený model kontrolního procesu má za úkol:

- Zvýšit flexibilitu kontrolního procesu a zlepšit komunikaci a výměnu znalostí mezi zdroji kontroly kvality.
- Zvýšit autonomii systému díky pokročilému systému plánování postupu kontroly a podpořit schopnost samoučení a sebeoptimalizace.
- Zkrátit dobu kontroly díky odhadu geometrických vad a historických měření.
- Zvýšit přehlednost díky neustálé aktualizaci společné databáze v reálném čase s využitím cloud computingu.

- Zvýšit přesnost a spolehlivost rozhodování o shodě na základě holistických dat s využitím inteligentního kontrolního systému.

Tento model tvoří následující prvky:

- Vstupní data, ve kterých konstruktér nebo technolog přidává kontrolní vazby související s výrobkem.
- Databáze nebo dostupná data, ve kterých jsou zahrnuty specifikace, tedy požadovaný výsledek výrobního systému, geometrické tolerance, CAD, CAM, CAE data, údaje o monitorování operací, které přidávají hodnotu, historická data o měření.
- Holistická data získaná z kontrolního systému.

Azamfirei doporučuje pro budoucí výzkum zaměřit pozornost na implementaci a ověřování navrženého rámce v dalších případových studiích v různých průmyslových odvětvích [66].

### 4.3 AR v kontrole kvality ve strojírenství

S novou průmyslovou revolucí se výrobní systémy vyvíjejí a stejně tak by se měly vyvíjet také kontrolní systémy. V oblasti kontroly kvality dochází ke značným metodickým změnám. Ke zvýšení flexibility pracovníka kontroly je třeba zvýšit dostupnost informací a propojit relevantní charakteristiky kvality tak, aby tvořily základ pro hodnocení kvality výrobku, například prostřednictvím CAD, CAM, CAE dat. Rostoucí dostupnost holistických dat jako jsou specifikace výrobků a procesů, historická data z měření a produktivita výroby by měly být využívány nejen k posouzení geometrických vlastností, ale také ke komplexnímu strategickému řízení výrobního a kontrolního procesu v uzavřené smyčce [67], [70], [63].

Nástup čtvrté průmyslové revoluce vedl k rozvoji nových průmyslových technologií a k transformaci průmyslového prostředí prostřednictvím integrace nových nástrojů a technik, které zvyšují efektivitu výroby, produkují zboží vyšší kvality a snižují náklady [71], [72], [73]. Technologický výzkum se zaměřuje na přizpůsobení kontroly kvality nové průmyslové revoluci nastavením rychlejších, přesnějších a spolehlivějších systémů v podpoře rozhodovacího procesu [9]. Maximální účinnost kontroly kvality nastane, když se měření provádí v místě, které je co nejbližší výrobnímu procesu [23].

Tato technologická transformace bude mít stále významnější vliv na povahu práce v průmyslovém prostředí, protože nové pracovní prostředí má přímý vliv na obsluhu vytvořením nových interakcí mezi lidmi a stroji, ale také mezi digitálním a fyzickým světem [74], [75], [76]. V tomto kontextu se pracovník stává kvalifikovaným smart operátorem, jehož fyzické, smyslové a kognitivní schopnosti mohou být rozšířeny a doplněny novými systémy, stroji a nástroji vybavenými pokročilými technologiemi [77] [78] [79].

AR, jak bylo uvedeno výše, patří mezi klíčové technologie Průmyslu 4.0 a je jednou z nejslibnějších technik pro zlepšení přenosu informací mezi digitálním a fyzickým světem nerušivým způsobem. Díky své schopnosti integrovat virtuální informace do vnímání reálného světa uživatelem může AR podpořit operátory přímo na jejich pracovišti. Operátory podporuje v reálném čase během manuálních operací a umožňuje jim snižovat riziko lidské chyby a závislost na paměti operátora, na tištěných pracovních postupech a na tištěné technické výkresové dokumentaci, které musí inspektor nebo technolog předem interpretovat [74] [80].

Přestože je AR považována za rozvíjející se technologii, její aplikace v průmyslové oblasti brání řada ergonomických a technických překážek, její přínosy jsou všeobecně uznávány [81], [82]. AR má schopnost zlepšit dovednosti operátorů tím, že poskytuje relevantní údaje v zorném poli uživatelů prostřednictvím různých technologií, mezi které patří statické obrazovky, projektor, HMD, HHD. AR tak může hrát důležitou roli v různých oblastech průmyslových aplikací pro podporu operátorů, například při následujících operacích:

- Montáž [83], [84], [85], [86], [87]
- Údržba [88], [89], [90], [91], [92]
- Školení [93], [94], [95], [96]
- Monitoring a kvalita [97]

AR je vhodnou metodou podpory inspektorů při provádění interních podnikových úkolů díky následujícím schopnostem: [98], [99], [100], [101], [81], [102], [103], [104]

- Sdílení a šíření odborných znalostí
- Poskytování zaškolení a podnětů ke zefektivnění jejich práce
- Snížení počtu chyb způsobených nedostatkem zkušeností, rozptýlením nebo jinými omezeními

AR může být přínosná při monitorování výrobních procesů v reálném čase a podpořit tak zlepšení kvality výrobků, odhalení poruch strojů, snížení nákladů a zkrácení času potřebného k provedení operace. Autoři poukazují na skutečnost, že zařízení AR vizualizace mohou být užitečná při sledování stavu strojů poskytováním relevantních informací uživatelům se systémem HMD. Olwal a kol. vyvinuli optický průhledový prostorový AR systém [105]. Integruje průhledný holografický optický prvek namontovaný na bezpečnostním skle stroje, který zobrazuje virtuální informace o datech z procesu obrábění v reálném čase.

Kontrola obvykle zahrnuje řadu kontrolních úkonů, které je třeba provést na skutečných kontrolovaných výrobcích. Zejména se jedná o odhalování konstrukčních odchylek mezi požadovaným plánovaným stavem výrobku a skutečným stavem vyrobeného dílu. Správné provádění této činnosti má proto zásadní význam ve výrobním procesu.

Kontrolní úkoly vyžadují z různých důvodů velkou míru koncentrace a představují pro inspektory vysokou mentální zátěž [106]. Pozornost operátora musí být dělena mezi fyzický díl a související technická data při odhalování potenciálních chyb. Tuto činnost obvykle provádějí operátoři manuálně s podporou tradiční papírové dokumentace. Přestože kontrolní činnost obvykle provádějí zkušení odborníci, konečné posouzení kontrolovaného dílu závisí na subjektivním posouzení inspektora, jeho schopnostech a zkušenostech.

V oblasti kontroly kvality byla v posledních letech vyvinuta řada systémů a nástrojů s podporou AR pro mnoho aplikací týkajících se inspekce. Dostupné práce se věnují například následujícím oblastem:

- monitorování a kontrola průmyslových robotů na dálku [107]
- podpora inspektorů kvality při schvalování vzorků výrobků [108]
- podpora montážních operací a následná kontrola smontovaných mechanických součástí [53]
- pomoc při údržbě a kontrole strojů zobrazením historických a aktuálních dat kontrolovaného stroje [109] nebo pracoviště [110]

V procesu svařování byla AR zkoumána jako nástroj pro podporu kontroly bodového svařování mechanických součástí. Kontrola probíhala pomocí tabletu namontovaného na svařovací pistoli pro vizualizaci užitečných pokynů k provádění operací s pomocí AR [111]. Pomocí AR projektorů byly promítány virtuální informace na kovové části automobilů, které zvýrazňovaly umístění bodového svařování [112].

Další využití technologií AR pro kontrolní činnost se týká například kontroly výztužných konstrukcí [113] a kontroly nesprávného umístění segmentů tunelových konstrukcí [114].

Kontrolní operace zahrnují mimo jiné zjišťování výrobních a montážních chyb a konstrukčních neshod mezi konečnými fyzickými výrobky a stavem předepsaným technickým a konstrukčním oddělením. Pro tento účel představili autoři [115] systém založený na rozšířené realitě, který má za úkol pomáhat operátorovi při kontrole kvality hotového výrobku. Při této kontrole jsou pořízeny snímky reálné scény, které jsou následně importovány do aplikace AR. Poté jsou na reálné snímky překryty CAD modely, které mají usnadnit kontrolní operaci. Nicméně kontrola odchylek ve 3D není možná, protože základní vstupní snímky poskytují jen dvourozměrná data.

Podobně [116] navrhovali řešení pro porovnání modelů CAD s fyzickými díly, pro reportování rozdílů mezi nimi a pro přenos těchto údajů do SW CAD. Systém měří souřadnice 3D bodů na fyzickém povrchu, ty jsou porovnávány se souřadnicemi příslušného 3D modelu s pomocí laserového zaměřovače v kombinaci se systémem stereokamer. Zjištěné rozdíly je možné vyznačit přidáním anotací ve virtuálním prostředí. Navrhované řešení je však omezeno jen na jednotlivé 3D body, není určeno pro komplexní inspekci.

Kahn a kol. přijali jiné řešení pro získávání 3D dat založené na přístupu analýzy po syntéze [117]. Podle tohoto přístupu jsou data poskytována spolu s daty získanými 2D kamerou s vyšším rozlišením, aby bylo možné odhalit rozdíly mezi reálným výrobkem a požadovaným standardem. Přestože se odchylky zobrazují v AR a překrývají se na obraz z kamery v reálném čase, nízká přesnost odhadu polohy hloubkové kamery vede ke špatným výsledkům. V navazující práci Khan navrhuje zlepšení, navržené řešení však není pro průmyslovou praxi příliš použitelné [118].

Pro zvýšení přesnosti při zachycení geometrie fyzického dílu vyvinul Wasenmüller a kol. systém kontroly odchylek s pomocí AR a RGB-D kamery [119]. Použití optického sledovacího systému k odhadu polohy kamery je však pro průmyslové použití nevhodné, protože nutně vyžaduje kalibrační fázi a specifické pracovní podmínky. Při detekci odchylek je tento systém relativně přesný. Na druhou stranu však neumožňuje efektivní vizualizaci rozšířené reality, vyžaduje specializované a drahé HW komponenty (hloubkové kamery, optické sledovací senzory a další). Tyto systémy nemohou být použité přímo na pracovišti, protože nejsou přijata pro tento účel zatím žádná přenosná zařízení. Pro použití této technologie je také potřeba kvalifikovaná obsluha.

Na uvedené nedostatky reagovali další autoři, kteří se je snažili překonávat. Prioritou bylo umožnit vizualizaci digitálních informací na obrazovce zařízení tak, aby uživatel mohl věnovat pozornost jak zobrazovaným virtuálním informacím, tak provádění kontrolní činnosti. Vhodným nástrojem je tedy například mobilní zařízení jako smartphone nebo tablet. Velkou výhodou je skutečnost, že uživatelé s jejich obsluhou mají bohaté zkušenosti. V tomto případě může být dosaženo dobré míry použitelnosti. Zároveň může být kontrolní systém používán i uživatelem bez odborných znalostí v oblasti technologie AR.

Lee a kol. vyvinul systém AR pro kontrolu potrubí a zvýšení bezpečnosti [120]. Poskytuje pracovníkům v dané lokalitě informace o definované konstrukci a aktuálním stavu. Na reálné díly jsou zobrazeny 3D modely a informace o stavu výrobku, jako je hodnota tlaku a teploty. Systém byl testován v laboratorních podmínkách se zkušenými pracovníky a potvrdil vysoký potenciál systému.

Podobnou studii provedl Olbrich a kol., který navrhl systém AR pro plánování a instalaci potrubí na velkých lodích [121]. Navržený systém umožňuje překrýt 3D modely přes částečně vyrobené potrubí pro vizuální kontrolu a identifikovat případné rozdíly a zároveň upravovat a přizpůsobovat virtuální potrubí. Využit byl sledovací systém na základě generování 3D referenční mapy reálného prostředí.

Z rešerše tedy vyplývá, že v předchozích pracích autoři vyvinuli mobilní systémy rozšířené reality se schopností vizualizovat 3D virtuální modely na obrazovkách zařízení. Nejsou však dostupné žádné další údaje o použitelnosti systémů na jiných dílech, ani žádné další ověřovací výsledky pro použití těchto řešení v průmyslovém prostředí.

Odlišné řešení k poskytování užitečných informací uživateli během kontrolní činnosti představil Ramakrishna a kol. [122]. Systém zobrazuje uživateli instrukce a návody, které mají obsluhu navádět prostřednictvím kontrolního postupu. K dílům v zorném poli jsou zobrazeny relevantní informace díky rozpoznávání QR kódů připojených k reálným objektům. Kontrolní proces je v tomto případě postaven na vizualizaci pokynů, neprovádí vizuální porovnání virtuálních modelů s reálnými produkty.

Podobně navrhovali systém založený na AR pro podporu kontrolních činností He a kol. [123]. Systém umožňuje zobrazit 3D modely na reálné objekty. Pokud není kontrolovaný díl dostupný v databázi, je možné objekt skenovat a získat tak orientační model. Uživatel může přidávat poznámky o zjištěných odchylkách. Nástroj využívá sledování bez markerů. Tato varianta může představovat omezení pro případy, kdy se vyrobené díly výrazně odlišují od navrženého modelu. Nejsou dostupné žádné studie s koncovými uživateli, které by testovaly použitelnost modelu v průmyslových aplikacích. Jeho výkonnost a omezení v průmyslových podmínkách nejsou proto známy.

S rostoucí složitostí kontrolovaného výrobku se zvyšuje obtížnost kontrolní operace, která může vést ke snížení efektivity inspektora, který tak může s větší pravděpodobností udělat chybu [124]. Správné provedení komplexních svařovacích operací má významný vliv na správnou funkčnost a vlastnosti produktu a případná chyba musí být odhalena před uvedením výrobku ke koncovému zákazníkovi. V takovém případě je zásadní také aspekt anotace a formalizace zjištěných chyb a následné sdílení informací s ostatními týmy nebo technickým oddělením.

Zajímavou studií pro tuto práci z hlediska aplikace AR v průmyslovém prostředí kontrolních procesů je výzkum Marina a kol. [125], kteří zkoumali aplikaci AR nástroje při kontrole montážní operace zařízení pro zpracování ropy a zemního plynu. Mimo jiné díky překrytí 3D virtuálních modelů v optimální podobě navržené technickým a konstrukčním oddělením s reálným kontrolovaným zařízením může inspektor snáze zjistit přítomnost konstrukčních odchylek a nahlásit je přímo do databáze prostřednictvím AR aplikace. Tímto způsobem si mohou navrhovaný nástroj osvojit jak odborníci, tak začátečníci v oblasti kontroly kvality výrobků. Nepotřebují přitom vysoké znalosti nebo schopnosti interpretovat manuály nebo technickou výkresovou dokumentaci.

Při návrhu metodiky a AR nástroje navazovali autoři na dříve vyvinuté a otestované experimenty a prototypy pro porozumění potřebám koncových uživatelů, podmínkám použití a funkcím, které je potřeba implementovat [125], [126], [127]. Autoři představili inovativní nástroj AR, který pomáhá pracovníkům přímo na pracovišti při kontrole průmyslových výrobků.

Díky překrývání virtuálních 3D modelů na příslušné fyzické díly mohou pracovníci kontroly snadno odhalit chyby při výrobě a montáži a následně přidávat poznámky přímo k virtuálním modelům a sdílet tyto informace s technickým oddělením. Jejich nástroj byl vyvinut s pomocí Google ARCore SDK. Tím je zajištěna kompatibilita s běžně používanými zařízeními jako jsou chytré telefony nebo tablety. Zároveň je tak možné využít techniky hybridního sledování. Navrhovaný systém využívá sledování pomocí markerů. Navržený nástroj AR byl posuzován na reálné experimentální studii provedené v reálných podmínkách zpracování ropy a zemního plynu. Studie byla provedena s koncovými uživateli, hodnocena byla především schopnost nástroje podporovat pracovníky prostřednictvím studie použitelnosti založené na objektivních a subjektivních metrikách a měření kognitivní pracovní zátěže.

Studie potvrdila, že uživatelé vnímali vysokou úroveň použitelnosti a zároveň nízkou kognitivní náročnost. Výsledky jsou obecně povzbudivé s ohledem na budoucí začlenění navrhovaného AR nástroje do průmyslového prostředí s cílem zvýšit efektivitu dovedností pracovníků během inspekčních činností.

Zároveň se jedná o první studii, která zkoumá přijetí technologie nástroje založeného na AR pro podporu kontrolních činností z hlediska vnímané mentální zátěže. Cílem autorů bylo zkoumat nejen otázku, zda se AR nástroj snadno používá a uspokojuje potřeby koncových uživatelů, ale také zkoumat jeho dopad z hlediska mentální zátěže na uživatele. Ukázku navrženého nástroje při reálné aplikaci zobrazuje Obrázek 4-4.



Obrázek 4-4: Ukázka AR nástroje pro kontrolu provedení montáže dle [125]

Studie prokázaly, že s pomocí AR může být snížena kognitivní zátěž rozdělení pozornosti vyvolané sledováním kontrolovaného dílu a souvisejících dat. Úkoly s rozdělenou pozorností vyžadují vysokou mentální zátěž a zvyšují obtížnost úkolu [106].

Rostoucí komplexnost výrobních prostředí a vyšší požadavky na kvalitu způsobují v průmyslové praxi nedostatek kvalifikované pracovní síly. Očekává se proto, že každý pracovník by měl pracovat stále výkonněji a znalosti by měly být předávány co nejefektivněji mezi zkušenými odborníky a začínajícími pracovníky. Stále rostoucí složitost výrobního



prostředí způsobuje zpoždění a nejistotu pracovníků na pracovišti při získávání důležitých informací. Jakékoliv zpoždění v přístupu k těmto informacím může bránit kritickým rozhodovacím procesům, které jsou nezbytné pro zajištění maximální efektivity a produktivity.

Přímé zobrazování dat na příslušný fyzický objekt umožňuje efektivnější provedení výrobních a kontrolních činností a lepší dostupnost výrobních informací. Pro dosažení vyšší efektivity a produktivity je nezbytný spolehlivý a interaktivní nástroj pro přenos informací. Ve výrobním prostředí se stále častěji používají informace v papírové podobě jako například návody a postupy výrobních operací nebo manuály ke strojům. Na dílnách jsou stále relativně běžné ručně psané poznámky zaznamenávající průběžné poznatky. Nestandardní povaha těchto poznámek ztěžuje jejich správné pochopení budoucími pracovníky.

Po zkoumání těchto systémů AR je zřejmé, že proces tvorby obsahu AR obvykle vyžaduje 4 kroky:

1. zkoumání fyzického prostoru
2. vytvoření digitálního obsahu
3. mapování digitálního obsahu ve fyzickém prostředí
4. testování a kalibrace informací

Autoři navrhují další směr vývoje v zapojení většího počtu uživatelů do interakce tak, aby i konstruktéři, technologové nebo manažeři měli přístup ke sdíleným znalostem a mohli v reálném čase spolupracovat na získaných datech.

Jak vyplynulo z dostupné literatury, řada studií se zaměřila na aplikace AR technologií vyvinutých pro rozvoj monitorovací a kontrolní činnosti, které mají schopnost zobrazovat virtuální data přímo do reálného prostředí. Přenosná zařízení poskytují volnost pohybu na rozdíl od digitálních projektorů, které musejí být pevně umístěny a mají tak omezené oblasti použití. Na druhou stranu jsou přenosná zařízení spojena se špatnou ergonomií, která může ovlivňovat míru soustředění, může vést k rozptýlení nebo dezorientaci.

#### 4.4 Automatizovaná kontrola svarů s podporou AI

Moderní technologie je schopná kontrolovat kvalitu svarů také plně automatizovaným systémem s pomocí umělé inteligence. Touto problematikou se zabývají například studie [28] nebo [128]. Princip spočívá ve využití metody založené na konvolučních neuronových sítích (CNN), které pomocí RGB kamer kontrolují svařovací vady. Navrhované metody se skládají ze dvou kroků, ze snímaného obrazu se nejprve extrahuje svařovaná oblast, která má být zkontrolována a poté je určeno, zda tato oblast obsahuje vady.

Vzhledem k vlastnostem svařování vznikají často různé vady. Určité vady jako odchylka délky nebo velikosti svarového spoje od předepsané specifikace může být měřena například pomocí bezkontaktního snímače vzdálenosti, příkladem je laserový snímač. Jiné vady jako jsou póry nebo trhliny povrchu nemohou být tímto snímačem kontrolovány. Tyto vady se projevují různými vzory vizuální textury na povrchu svaru. Mohou být proto rozpoznány s pomocí principů machine vision. Machine vision proces pro detekci defektů na povrchu materiálu obecně probíhá ve dvou krocích, extrakce prvků a detekce defektů. Při extrakci prvků se obvykle extrahují prvky pomocí obecných technik zpracování obrazu, jako je vyhlazování,

morfologie, detekce hran. K detekci vad se tradičně používají metody analýzy vzoru vady a nastavení prahových hodnot na vadných snímcích. CNN je schopna naučit se stanovit rozhodující hranici a konvoluční filtr je optimalizován pro detekci defektů [28].

Park a kol. představili metodiku odhalení vad na svařovaném povrchu pomocí CNN. K dosažení tohoto cíle muselo být shromážděno 32 000 snímků vzorků z výrobní linky. Všechny tyto vzorky musely být ručně označeny za vadné nebo nevadné. Díky tomuto velkému množství dat jsou CNN schopné naučit se různé typy vad svařování a zajistit spolehlivost výsledků. Jedním z problémů při stabilním trénování CNN s takovým počtem vzorků je nevyváženost dat. Snímků bez závad se obecně shromažďuje více než se závadami. Může proto vést k nevyváženosti trénovaných vzorků a k neobjektivnímu učení [128].

Prototypovým vývojem automatizace kontroly kvality svaru pomocí neuronových sítí se zabývá například také tým odborníků ve Škoda Auto. Daný výzkum vychází ze skutečností, že zatímco pro velkou část automatizovaných kontrolních úkolů (čtení QR kódu, ověření přítomnosti etikety, barvy nebo kontroly otvorů) je možné vycházet ze standardních nástrojů zpracování obrazu (detekce barvy, hran, jasu nebo měření vzdálenosti), pro kontrolu svarů je potřeba využít metody založené na hlubokém učení jako je například lokalizace, detekce, klasifikace objektů nebo segmentace obrazu. Pro inovativní automatizované hodnocení kvality svaru používají k lokalizaci svaru neuronovou síť natrénovanou na velkém množství obrazového materiálu. V následující fázi samotného hodnocení kvality svaru na základě rozpoznávání, vyhodnocení a identifikaci typu vad materiálové struktury svaru používají kombinaci segmentace obrazu a detekce abnormálních útvarů. Zásadní je klasifikace dostatečně velkého počtu snímků obsahujících texturou abnormální svary. Pouze s dostupným velkým množstvím těchto vstupních dat je možné databázi pomocí algoritmu natrénovat k rozlišení vadného a kvalitního svaru. Vizualní podklady pro prototyp byly přímo na výrobní lince shromažďovány několik měsíců. Tyto podklady byly následně manuálně zpracovány a klasifikovány pro učení neuronové sítě. Výpočetní výkon pro práci s neuronovými sítěmi vyžaduje specializované cenově náročné průmyslové počítače. Vyvíjený prototyp byl testován s použitím klasických ethernetových sítí, bezdrátových WiFi sítí a s použitím Edge Computing. Testovaný prototyp je tvořen robotickou buňkou, ve které robot manipulací s plechy nastavuje kontrolované svary do zorného pole snímající kamery. Buňka je pomocí 5G sítě napojena na výpočetní počítač a díky nejmodernějším algoritmům hlubokého učení probíhá zpracování obrazu za účelem vyhodnocení kontroly kvality svaru. Kromě kamer a řídicího počítače byly používány čárové lasery pro určení hloubkové vzdálenosti, světla pro zajištění stabilních světelných podmínek, digitální spínače pro řízení laserů a světla, zdroje pro světla a racková skříň [129].

Metoda automatizované detekce vad ve svaru založená na CNN tedy představuje přístup založený na datech, který shromažďuje a učí se velké množství vzorků. Tato metoda se dokáže naučit vizuální charakteristiku i drobných vad. Problematiku kontroly vad svaru vidí CNN jako problém klasifikace obrazu. Nejprve jsou shromážděny vzorky obrazů pro trénování sítě a shromážděné obrazy jsou klasifikovány podle typu vad. Metoda založená na CNN má výhodu v odolnosti vůči změnám osvětlení a vykazuje vysokou výkonnost. Na druhou stranu vyžaduje tato metoda velké množství trénovacích vzorků, vysoký výpočetní výkon a časově náročné klasifikace a vyladění mnoha parametrů.

## 5 Shrnutí řešeršní části

V současné době je v průmyslových prostředích patrný tlak vyrábět díly stále rychleji a v lepší kvalitě, která se musí neustále zlepšovat. Obecně získávají kontrolní procesy stále vyšší význam. Musí být zajištěno, že tyto procesy budou prováděny během co nejkratší doby a efektivněji. Neodhalené vady na výrobku může vést ke značným časovým a finančním ztrátám. Momentálně hraje v kontrolních procesech hlavní roli lidský faktor. Odpovědnost se klade převážně na experty, kteří jsou specializovaní na kontrolní aktivity. V této souvislosti může vést rozptýlení, únava nebo nedostatečná praxe k chybám, které ohrožují efektivitu činnosti [108].

Procesy kontroly kvality jsou zásadní součástí většiny průmyslových výrobních systémů. Zpravidla se jedná o opakované, přesné a komplexní úkoly, které zahrnují sekvenci kroků, které musejí být provedeny správně různými inspektory nebo operátory. K podpoření operace kontroly jsou často používána média jako video nahrávky, fotky nebo diagramy. Tradiční kontrolní metody často využívají instrukce v papírové nebo digitální podobě, které pomáhají operátorům v rozhodování. Operátor musí dělit pozornost mezi dostupné instrukce a kontrolovaný objekt, což operaci zpomaluje a může vést k vyšší chybovosti. Autoři hodnotí využití možností informačních systémů a konkrétně AR jako součásti konceptu Průmyslu 4.0 jako technologickou příležitost, která má potenciál zvýšit efektivitu procesu a snížit výskyt chyb tím, že podpoří operátorovu pozornost na prováděnou aktivitu poskytnutím vizuální podpory [81], [130], [131]. Díky využití AR se může operátor soustředit na úkol, který právě provádí, zatímco získává potřebnou vizuální zpětnou vazbu. Zobrazením relevantních informací mohou AR nástroje podpořit pracovníky při méně běžných úkolech nebo relativně komplexních operacích [132].

Rozšířená realita umožňuje zobrazení digitálních informací na reálnou situaci. Tím představuje potenciál pro procesy kontroly kvality například poskytnutím instrukcí nebo dalších souvisejících dat [133]. Zároveň může vést ke snížení nákladů, chyb a času provedení kontroly [133], [134], [135], [136], [137]. Jedním z úkolů této práce je ověřit, zda tato technologie může pomoci snížit mentální zátěž vnímanou uživateli při koncentraci na kontrolní proces a omezit tak nákladné chyby způsobené únavou, nepozorností, rozptýlením nebo stresem. Tyto chyby mají tendenci se vyskytovat v hlavních pracovních časech díky nadprůměrné zátěži na uživatele a mohou pro podniky představovat vysoké náklady finanční, časové a materiálové. Zároveň mohou mít negativní vliv na reputaci a dodavatelsko-odběratelské vztahy podniku.

Rozšířená realita prošla v poslední dekádě výrazným vývojem, během kterého dosáhla dostatečné úrovně rozvoje k využití v průmyslových aplikacích. Technologii AR v průmyslových aplikacích se věnuje stále větší množství dostupných publikací. Je to známka toho, že tato technologie získává zájem v průmyslových procesech [98] [45], [138].

Z dostupné literatury bylo zjištěno, že pro výzkum kontroly kvality s rozšířenou realitou existují prototypy v ranné fázi vývoje. Tyto aplikace jsou převážně testovány pouze v laboratorních podmínkách. Přes řadu potenciálních přínosů jsou nástroje rozšířené reality, které by byly připravené pro aplikaci, na trhu relativně nedostupné a reálné přínosy v průmyslové výrobě nejsou dosud prokázány [138], [139], [45], [140].

V této disertační práci bude navržena obecná metodika podpory AR při kontrolních procesech svařovaných výrobků. Kontrolní část této metodiky bude experimentálně ověřena

na výzkumu s koncovými uživateli a s podporou pilotního AR HHD řešení bude zkoumán vliv na probandy z hlediska produktivity, kvality provedení úkolu a mentální zátěže. K tomuto účelu budou provedeny řízené terénní experimenty na kontrolním stanovišti. Srovnány budou konvenční kontrolní postupy v situaci nulové automatizace a navržený kontrolní postup založený na AR v případě částečné automatizace, kdy za proces rozhodování odpovídá lidský operátor a digitálním systémem je pouze systematicky podporován. Varianta plné automatizace, kdy o procesu autonomně rozhoduje stroj, v této práci nebude uvažována. Plně automatizovaná kontrola kvality je pokročilá možnost využívající například algoritmy umělé inteligence, konkrétně například konvolučních neuronových sítí. Při procesu učení konkrétně neuronových sítí musí být do databáze vloženo několik tisíc nebo desítek tisíc vstupních snímků. Ke každému musí být manuálně klasifikováno, zda se jedná o chybný nebo bezchybný případ. Na základě těchto vstupních informací se databáze s pomocí pokročilých algoritmů hlubokého učení natrénuje a naučí se sama rozhodovat o kvalitě. Podrobněji popisuje tento princip kapitola 4.4. Pro tento výzkum není tato varianta plné automatizace uvažována.

Z rešerše vyplynulo, že v dostupné literatuře nebyl nalezen žádný výzkum, který by se zabýval vymezenou zkoumanou problematikou. Nebyla dosud navržena obecná komplexní metodika kontroly svařence s podporou rozšířené reality pro typy výrob, kde plná automatizace není vhodná a je preferována částečná automatizace. Nebyl rovněž identifikován žádný výzkum, který by testoval proces průmyslové kontroly svařence z hlediska efektivity výkonu uživatele, kvality provedení kontrolního úkolu a zároveň dopadu na mentální zátěž. Tato mezera ve výzkumu představuje motivaci pro provedení této práce a příspěví k rozvoji využití AR technologie v průmyslových aplikacích.

Pro podporu uživatelů byla zvolena technologie AR, která má již široké využití v mnoha oblastech, jako je herní průmysl, marketing, vzdělávání, i v některých oborech průmyslu. Tato práce se zabývá využitím této již známé technologie AR v relativně novém kontextu, tedy jako podpůrného řešení v metodice kontrolního procesu svařence. V tomto kontextu kontrolního procesu svařence bude sledován vliv, jaký má zapojení této technologie do metodiky kontrolního procesu na uživatele a efektivitu jeho práce. Konkrétně bude sledováno, zda má kontrolní metodika rozšířená o podporu AR vliv na objektivní výkonnost uživatele, která bude zkoumána z pohledu rychlosti dokončení kontrolního úkolu. Dále bude sledován vliv na kvalitu provedení kontrolního úkolu, a sice z hlediska pozorované míry chybovosti uživatele během kontroly. Zároveň bude zkoumán dopad na mentální zátěž vnímanou uživateli v průběhu provádění kontrolního úkolu.

V moderní průmyslové výrobě je vytvářen tlak na dokončování všech úkolů v co nejkratším čase, s maximální flexibilitou a v co nejvyšší kvalitě. Případný dopad navržené metodiky na výkon uživatele by proto měl vliv na efektivitu celého výrobního a kontrolního procesu.

Mentální zátěž, kterou uživatel během kontrolního úkolu vnímá, má dopad na úroveň jeho produktivity a konzistenci jeho výkonu, je proto důležitou součástí výzkumu. Teorie kognitivní zátěže se zabývá prováděním komplexních kognitivních úkolů a procesů, které vznikají při vysokém množství vzájemně působících informací, které je potřeba současně zpracovat. Kognitivní zátěž odkazuje na zdroje, které pracovní paměť využívá v určitém časovém úseku. Pro tento výzkum je nejrelevantnější pohled na kognitivní zátěž jako na mentální úsilí jedince během pracovní operace nebo během interakce člověka se strojem nebo zařízením. Kognitivní zátěž je obtížné sledovat, neboť souvisí s vnitřními procesy operátora při zpracování informací.

Výzkumníci proto vyvinuli různé způsoby měření vnímané mentální zátěže. K jejímu hodnocení se používají subjektivní hodnotící škály. Mezi ně patří NASA Task Load Index nebo devítibodová symetrická kategoriální škála hodnocení mentálního úsilí. NASA-TLX je metoda, která byla v posledních 20 letech použita ve více než 550 studiích a její spolehlivost byla prokázána. Byla pro tuto práci vybrána, protože ji lze použít pro širokou škálu aplikačních prostředí a typů činností. Tato metoda je podrobně rozepsaná v kapitole 9.4.

Propojením obecných modelů ostatních autorů byl s ohledem na cíle práce vytvořen návrh metodiky kontrolního procesu s AR. Experimentální studie následně porovnává tradiční přístupy založené na tištěné výkresové dokumentaci a navrženou metodiku s AR podporou. K provedení experimentální studie byl navržen a vyvinut AR nástroj, který má za úkol provést koncového uživatele interaktivně kontrolním procesem a zobrazit mu veškerá relevantní data do virtuální scény v jeho zorném poli. Tím je snížena nutnost dělit pozornost mezi kontrolovanou scénu a výkresovou dokumentaci a zjednodušena interpretace požadovaných specifikací.

Na základě prostudované literatury a výše uvedených rešerší je poskytnut ucelený pohled na zkoumanou problematiku. Díky těmto znalostem byly zformulovány následující teze:

- Výrobní podniky jsou pod tlakem zvyšovat svou produktivitu, zajistit bezchybnou kvalitu, vysokou flexibilitu a zároveň minimální náklady, aby si udržely tržní pozici [11], [58].
- Metody kontroly kvality jsou využívány k detekci defektů před předáním zákazníkovi [48].
- Nárůst komplexnosti a variability výroby vyžaduje odpovídající přizpůsobení výrobních procesů, což vede k potřebě častých změn při kontrole kvality [8].
- V kontextu Průmyslu 4.0 musí být procesy kontroly kvality rychlé, přesné, spolehlivé a holistické [9].
- Ke zvýšení flexibility inspektorů je třeba zvýšit dostupnost informací a propojit relevantní charakteristiky kvality tak, aby tvořily základ pro hodnocení kvality výrobku [9], [67], [63], [70].
- Technologická transformace má významný vliv na povahu práce v průmyslovém prostředí vytvářením nových interakcí mezi lidmi a stroji, a také mezi digitálním a fyzickým světem [75], [77], [76].
- S rostoucí komplexností výrobních systémů a vyráběné produkce jsou na inspektory kladeny vysoké nároky z hlediska odborné kvalifikace a dlouhodobé koncentrace [31], [32], [33].
- S výrazným rozvojem HW i SW nástrojů během posledních let se AR technologie stává dostupnější [81].
- V průmyslovém prostředí roste míra automatizace, plná automatizace však není vhodná nebo proveditelná pro všechny typy výrobních systémů [29], [30].
- Rozšířená realita má schopnost podpořit uživatele při práci zobrazením relevantních virtuálních dat do jeho zorného pole [81], [82].

Z provedené teoretické rešerše, tezí a cílů disertační práce byly pro tento výzkum definovány následující hypotézy:

**H1: „S použitím navrženého AR přístupu dojde ke zkrácení doby dokončení kontroly svařence ve srovnání s použitím konvenčních přístupů založených na tištěných podkladech.“**

**H2: "S použitím AR přístupu dojde ke snížení míry chybovosti kontroly ve srovnání s použitím konvenčních přístupů založených na tištěných podkladech."**

**H3: "S použitím navrženého AR přístupu dojde ke snížení mentální zátěže vnímané při kontrole svařence ve srovnání s použitím konvenčních přístupů založených na tištěných podkladech."**

První hypotéza H1 vymezuje vztah pro výkonnost uživatelů s podporou konvenčního přístupu provedení kontroly svařenců a navrženého AR přístupu z pohledu času dokončení úkolu. Sleduje, zda s inovativním AR přístupem jsou uživatelé schopni dokončit kontrolní úkol v kratším čase.

Druhá hypotéza H2 porovnává rovněž konvenční a navržený AR přístup, tentokrát z pohledu kvality provedení úkolu, kterou sleduje z hlediska míry chybovosti pozorované během kontrolního úkolu.

Třetí hypotéza H3 se věnuje mentální zátěži, kterou uživatelé během kontrolního úkolu vnímají, a porovnává tuto zátěž v závislosti na použitém přístupu. Sleduje, zda je mezi použitým přístupem ke kontrole možné vysledovat rozdíl ve vnímané zátěži.

## 6 Konceptuální návrh obecné metodiky kontrolního procesu s podporou AR

Na základě poznatků z provedené teoretické rešerše byla v návaznosti na podobné vědecké studie, koncepce, metodiky, výzkumy a inovativní přístupy čtvrté průmyslové revoluce navržena obecná metodika kontroly svařenců v průmyslových procesech s podporou AR. Tato metodika byla navržena nejprve v hrubé teoretické podobě vycházející z podobných přístupů ostatních autorů. Během návrhu výzkumu a průběhu experimentu byla tato metodika adaptována do konečné podoby komplexního metodického konceptu kontrolního procesu s podporou AR.

Jedním z obecně nejrozšířenějších a nejuznávanějších pohledů na kontrolní proces je Juranův model, který představuje ve čtvrté kapitole Obrázek 4-1 [50]. Juran proces kontroly kvality shrnuje jako sekvenci činností, které zpravidla během kontrolního procesu musejí proběhnout. Zjednodušeně je možné tento proces popsat jako systém, který začíná interpretací předepsaných specifikací, pokračuje měřením a porovnáním výsledků měření s interpretací specifikací. Na základě tohoto porovnání je učiněno rozhodnutí o shodě. Podle výsledku tohoto posouzení shody jsou následně shodné kusy posunuty do další fáze výroby, zatímco vadné kusy jsou vráceny nebo zlikvidovány. Na závěr procesu jsou získaná data zaznamenána a jako systém uzavřené smyčky mohou tato výstupní data ovlivnit vstupní specifikace. Z Juranova modelu bylo čerpáno především pro určení základních obecných činností, které musejí při kontrole proběhnout.

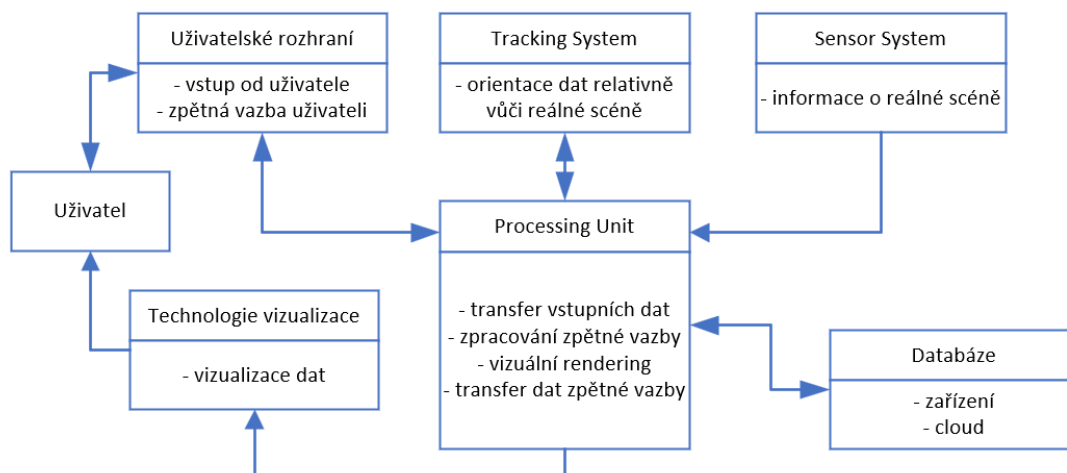
Další obecná metodika, ze které bylo vycházeno, je model kontrolního procesu dle Pendrilla, který představil ve čtvrté kapitole Obrázek 4-2 [62]. Tento model znázorňuje kontrolu jako systém skládající se z kontrolovaného objektu, měřicího nástroje nebo úsudku kontrolora, z operátora nebo inspektora, který s kontrolovaným objektem a měřicím nástrojem manipuluje a je zodpovědný za rozhodnutí o shodě výrobku. Kontrola přitom probíhá určitou měřicí metodou a v určitém prostředí. Z Pendrillovy struktury kontrolního procesu jsou uvažovány hlavní zdroje obecného kontrolního procesu.

Dále je navazováno na koncepty kontrolního systému autorů Azamfirei a kol., které představil ve čtvrté kapitole Obrázek 4-3 [66]. Autoři se specializují na robotickou in-line kontrolu kvality, tedy na vyšší stupeň automatizace. Tento svůj navržený rámec zasazují do kontextu Průmyslu 4.0. Hlavní zdroje zahrnují kontrolovaný díl, inspektora a měřicí nástroj, inteligentní kontrolní systém a databázi propojenou cloudem. Inteligentní kontrolní systém je zde interpretován jako spojení fáze „pre-measurement“ a „post-measurement“. Fáze před měřením zahrnuje odhad odchylky na základě specifikací, sledování dat, simulovaných dat a historicky naměřených údajů a výběr nebo tvorbu kontrolní strategie na základě provedeného odhadu odchylky a charakteristik kontroly. Fáze po dokončení měření obsahuje sloučení získaných dat, porovnání s definovanými požadavky a normami, rozhodnutí o shodě a zpracování dílu na základě výsledku rozhodnutí.

Ze zkoumaných kontrolních modelů a metodik bylo následně čerpáno při návrhu metodiky kontrolního procesu s podporou AR. Z Juranova a Pendrillova konceptu bylo čerpáno především při definování základních struktur, zdrojů a vazeb mezi nimi. Koncepce Azamfirei a kol. naopak pracuje v kontrolním modelu s vysokou mírou automatizace. Z tohoto modelu byly proto čerpány prvky a charakteristiky, které je možné zasadit do navrhované metodiky, která s podporou AR představuje nižší úroveň částečné automatizace formou podpory

uživatele při kontrole. Pro návrh metodického rámce vytvořeného syntézou relevantních charakteristik dostupných teoretických modelů z podobných výzkumů byly aspekty možné podpory AR. Tato metodika tak byla v příslušných oblastech rozšířena o prvek AR, který má v těchto oblastech podporovat uživatele při příslušných akcích.

Na základě doporučení Egger a kol. [81] byl navržen rámec vazeb v AR podpoře pro metodiku kontroly. Hlavní prvky této AR podpory jsou technologie vizualizace, senzorový systém, tracking systém, procesní jednotka a uživatelské rozhraní [81] [141]. Tento navržený rámec vazeb zobrazuje Obrázek 6-1.

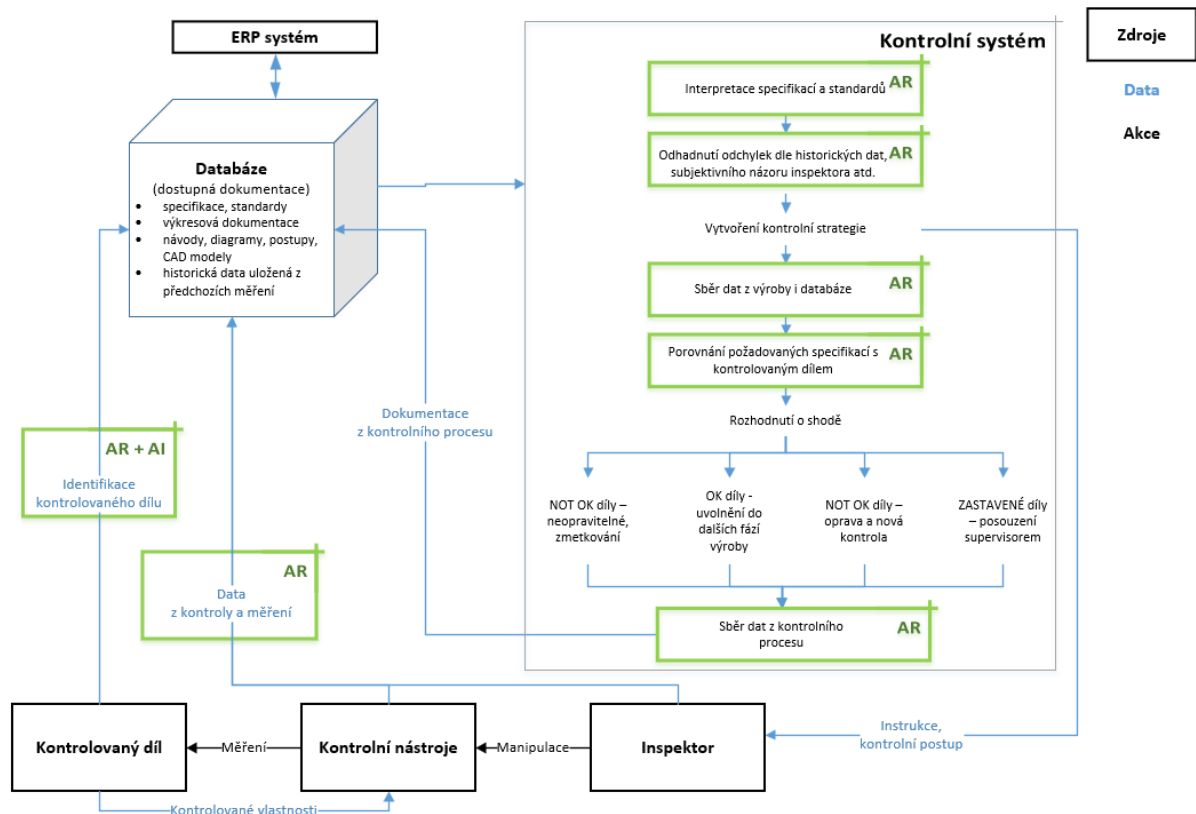


Obrázek 6-1: Vazby mezi prvky AR metodického rámce [81]

Technologie vizualizace promítá digitální informace v kontextu reálného prostředí. V případě tohoto výzkumu je zvolena varianta HDD. Senzorový systém získává informace z prostředí. Hlavním vstupem pro tento výzkum je kamera HDD. Tracking system AR umožňuje přesné umístění digitálních objektů ve fyzickém světě. Jedná se o vyspělou technologii, avšak nečistoty, mechanické poškození nebo světelné podmínky mohou tracking komplikovat. V tomto výzkumu bude použit tzv. „marker-less“ systém, který nevyžaduje dodatečně přidané uměle vytvořené markery. Uživatelské rozhraní AR umožňuje obousměrnou komunikaci ze systému směrem k uživateli i od uživatele do systému. Procesní jednotka je zodpovědná za softwarový chod AR systému. Kromě toho propojuje systém s dalšími zdroji dat, která lze získávat nebo poskytovat v reálném čase.

Navržený metodický rámec (Obrázek 6-2) představuje AR podporu pro komplexní systém řízení kvality. Základem této navržené metodiky jsou tři fyzické zdroje, a sice kontrolovaný díl, kontrolní nástroje a inspektor. Tyto fyzické zdroje jsou provázány s inteligentním kontrolním systémem, databází a ERP systémem.





Obrázek 6-2: Návrh metodiky kontrolního procesu s podporou AR [zdroj autor]

Představený systém řízení kvality začíná identifikací výrobku. Pro identifikaci, detekci a rozpoznání dílů je možné použít dvě základní varianty, tzv. marker-based a marker-less. Marker-based varianta je založená na uměle vytvořeném markeru dodaném fyzicky do reálné scény. S pomocí tohoto markeru se poté orientuje AR modul, slouží k vyhledání relevantního obsahu určeného k vizualizaci a relativně vůči jeho pozici se AR scéna ukotvuje v reálné scéně. Jeho precizní umístění vůči kontrolovanému výrobku a dobrá čitelnost jsou proto zásadní pro správnou funkci AR scény. Pro tuto metodiku je doporučena druhá varianta, tzv. marker-less. Jedná se o inovativní metodu, při které není potřeba doplnit do snímané scény žádný dodatečný marker. Sledovaný díl v tomto případě funguje sám jako cílový marker, který slouží AR modulu při orientaci v prostoru a rozmístění vizualizace v prostoru. Rozšíření Vuforia využívá možnosti pokročilých algoritmů hlubokého učení pro vytrénování databáze na základě vstupního CAD modelu. S pomocí této vytrénované databáze potom může AR modul s vysokou přesností detekovat a rozpoznat díl, a zároveň vůči jeho pozici velmi přesně umístit AR scénu a vizualizace do reálné scény. Pokud tedy například vizualizace překrývá ideální 3D CAD model na reálný objekt, orientuje se podle rysů a prvků na skutečném výrobku a poloha vizualizací vůči reálné scéně proto může zajistit velmi vysokou přesnost, a to i v případě, že kontrolovaný díl není statický. Z uvedených důvodů je v grafickém znázornění návrhu metodiky uvažována při identifikaci výrobku podpora AR spolu s AI. Jedná se o metodu, která má velký praktický potenciál pro využití v průmyslových aplikacích. Díky skutečnosti, že nevyžaduje dodatečný marker může být jednoduše zapojena do reálných procesů, není nutné kontrolovaný díl zasazovat například do standardizovaného přípravku nebo pracoviště, které bude zajišťovat jeho pozici vůči markeru, a přesto je zároveň schopná zajistit vysokou míru přesnosti.

Vzhledem k tomu, že je metoda object tracking (marker-less) relativně novou technologií, není zatím na rozdíl od image tracking (marker-based) vyvinutá natolik, aby bylo možné provést tzv. „multiobject tracking“. V experimentu je však žádoucí provést testování této technologie object tracking. Tato metoda proto bude použita pro detekci a tracking objektů v rámci jednotlivě oddělených scén. Identifikaci a výběr dílu, a potažmo příslušné scény, provede uživatel v tomto experimentu manuálně. Tímto způsobem bude možné testovat vlastnosti metody object tracking v reálných průmyslových podmínkách při experimentu s koncovými uživateli a zároveň testovat větší množství výrobků. Tato oblast je jedním z doporučení pro budoucí výzkum. Po dalším vývoji této technologie, který by umožnil multiobject tracking, by bylo přínosné provedení experimentálního ověření vlivu této techniky.

Po identifikaci, rozpoznání výrobku a jeho pozice v reálné scéně jsou extrahována všechna relevantní data z propojených databází, která budou vizualizovaná do AR scény na reálný objekt. Mezi tato data patří například vizualizace 3D CAD modelů, 3D vizualizace ideálního rozmístění svarů a svařených komponent, kontrolní plán, kontrolní checklist a další podklady a specifikace, které pomohou provést uživatele kontrolním procesem. Kromě toho mohou být z této databáze získána historická data z předchozích kontrol, může se jednat například o poslední zachycené chyby na daném výrobku. Dále zde mohou být k dispozici obecné standardy, specifikace a normy, které mohou sloužit při posuzování výrobku a rozhodování o shodě s cíli kvality nebo vyhodnocení zjištěných odchylek.

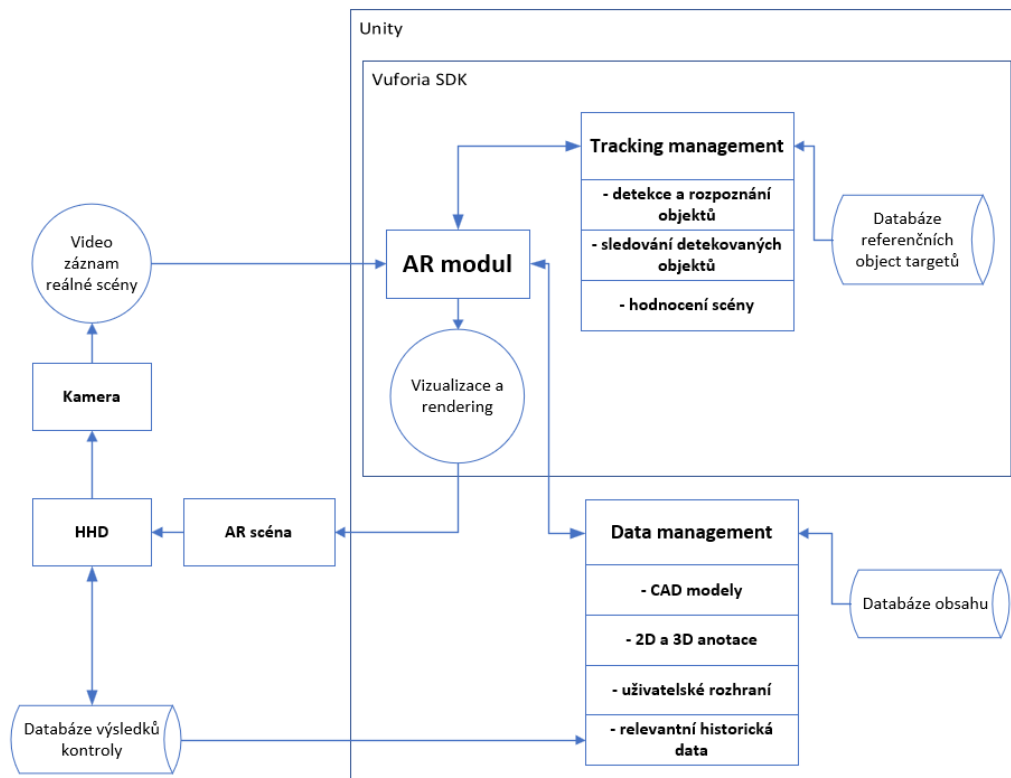
Tato získaná dokumentace je vstupním zdrojem pro samotný inteligentní kontrolní systém. Na začátku tohoto systému uživatel interpretuje předepsané specifikace a požadované standardy pro identifikovaný díl a snaží se odhadnout potenciální výskyt odchylek na základě svých vlastních subjektivních zkušeností a historicky zaznamenaných dat z předchozích kontrol. Při těchto činnostech jsou uživatelé podpořeni AR. Díky 3D vizualizaci požadovaného ideálního stavu do reálné scény na kontrolovaný výrobek může uživatel rychle porovnat požadované a reálné vlastnosti zkoumaného objektu. Zároveň upozorněním na dříve zachycené vady a odchylky může uživatel zaměřit vyšší pozornost na problémové oblasti. Tyto podklady pomáhají vytvořit kontrolní strategii a pokračovat k samotné kontrole dílu a porovnávání požadovaných specifikací s jeho reálným stavem.

Během těchto úkolů je uživatel interaktivně prováděn jednotlivými kroky kontroly s podporou AR. Díky 2D a 3D anotacím a interaktivnímu kontrolnímu checklistu může uživatel posuzovat kontrolované vlastnosti bez nutnosti dělení pozornosti mezi klasické tištěné podklady a výrobek. Jak bylo uvedeno výše, cílem této metodiky je nižší úroveň automatizace, ve které zůstává odpovědnost za rozhodnutí o shodě dílu s cíli kvality na uživateli.

Rozhodnutí inspektora o stavu kontrolovaného dílu určuje další kroky procesu. V případě, že je díl vyhovující, je uvolněn do dalších fází výroby. Inspektor je tak schopen prostřednictvím AR podpory kontrolovanou operaci v provázané databázi a v ERP systému označit jako dokončenou. Pokud díl není vyhovující, ale je vyhodnocen jako opravitelný, je vrácen na předchozí pracoviště a údaje o nalezených odchylkách jsou uloženy do databáze pro příští kontroly. Pokud je díl nevyhovující a zároveň neopravitelný, je vyřazen z procesu a prostřednictvím AR vazby do databáze a ERP systému je spuštěn proces zmetkování a uložení dat o zachycených vadách. V situaci, kdy inspektor není schopen samostatně posoudit kontrolovaný díl a rozhodnout o shodě s cíli kvality, je kontrola pozastavena a s pomocí AR

mohou být odeslány snímky nebo záznam kontrolované scény ke vzdálenému posouzení supervisorů. Může tak být snížena doba čekání a zvýšena efektivita procesu rozhodování.

Obrázek 6-3 zobrazuje přehled struktury navrhované AR podpory kontrolního systému. Logicky navazuje na schémata, které představily Obrázek 6-1 a Obrázek 6-2.



Obrázek 6-3: Struktura navržené AR podpory [zdroj autor]

Základem je AR modul, který koordinuje ostatní zdroje a zajišťuje AR vizualizaci na reálnou scénu. AR modul aktivuje kameru mobilního zařízení (HHD), ze kterého získává video záznam reálné scény. Tento video záznam slouží jako vstup pro tracking management, který je zajišťován funkcemi Vuforia SDK. Po získání video přenosu reálné scény detekuje a rozpoznává tento modul sledovaný objekt porovnáním s databází referenčních objektů. Tento modul poté sleduje detekovaný objekt, vyhodnocuje sledovanou scénu a odhaduje relativní pozice snímajícího zařízení a kontrolovaného objektu v reálné scéně.

Pro rozpoznání cílový objekt získává a zpracovává AR modul relevantní obsah z databáze obsahu. Tento obsah zahrnuje například vizualizace 3D CAD modelů, 2D a 3D anotace, uživatelské rozhraní nebo historická data z předchozích kontrol. AR modul poté vizualizuje získaná data a uživatelské rozhraní do AR scény. Výsledky kontroly s podporou této AR scény jsou z HHD odeslány do propojené databáze pro další zpracování.

Experimentální ověření celé navržené metodiky řízení kvality s podporou AR přesahuje rámec tohoto výzkumu. V experimentální části bude s koncovými uživateli ověřována část navrženého kontrolního systému s podporou AR. Toto experimentální testování bude statisticky vyhodnoceno s cílem potvrzení vlivu AR podpory na výkonnost probanda při kontrole svařenců v reálných průmyslových podmínkách. Komplexní dlouhodobé ověření

celého navrženého metodického rámce pro kontrolu kvality je jedním z doporučení pro budoucí směr výzkumu.

V této kapitole byla představena navržená metodika kontroly s podporou AR. Jedná se o obecný konceptuální rámec kontrolního systému, který je doplněn o inovativní prvky rozšířené reality. V dalších krocích výzkumu bude proveden experiment, který bude testovat část této metodiky v rámci rozsáhlé uživatelské studie. Pro provedení tohoto experimentu bude navržen a vyvinut AR software v souladu s vlastnostmi požadovanými testovanou metodikou. Vývoj a vlastnosti tohoto AR softwaru jsou podrobněji představeny v následující kapitole. V dalším textu potom bude vymezena metodika výzkumu, která definuje, jakým způsobem bude navržená část metodiky kontroly s podporou AR testována na uživatelském výzkumu.

## 7 Pilotní AR software pro experimentální studii

V předchozí kapitole byl představen návrh obecného metodického přístupu ke kontrole svařenců v průmyslové výrobě s podporou AR. Experimentálně bude ověřena část tohoto metodického rámce zaměřená na samotnou kontrolu s koncovými uživateli, která je v metodice zařazená pod inteligentní kontrolní systém. Pro účely této experimentální studie byl navržen a vyvinut software, který s využitím rozšířené reality podporuje uživatele při kontrole svařených výrobků. Stručný popis návrhu a vývoje tohoto nástroje je hlavní náplní této kapitoly.

Jedním z prvních kroků při návrhu AR software byl sběr zkušeností z oboru kontroly kvality svařených výrobků z průmyslové praxe. Na základě zkušeností z praxe byly zkoumány charakteristiky a přístupy ke kontrolním procesům a jejich podpoře.

Po prozkoumání praktických vlastností kontrolních operací v průmyslové praxi byla provedena rešerše vhodných nástrojů pro samotný návrh a vývoj technologického řešení s podporou AR. Během této části rešerše byla pozornost věnována především herním enginům, s jejichž pomocí je možné navrhovat AR aplikace s interaktivním uživatelským prostředím. Dále byla rešerše zaměřena na metody rozpoznávání sledovaných objektů. Pro ukládání dat byly zkoumány možnosti provázání navrhovaného AR řešení s vhodnou databází. Součástí této rešerše byly také možnosti využití CAD softwarů a grafických programů pro návrh potřebných modelů a tvorbu vizualizací a uživatelského prostředí. V neposlední řadě byla provedena rešerše dostupných hardware zařízení a jejich možností při využití v experimentu.

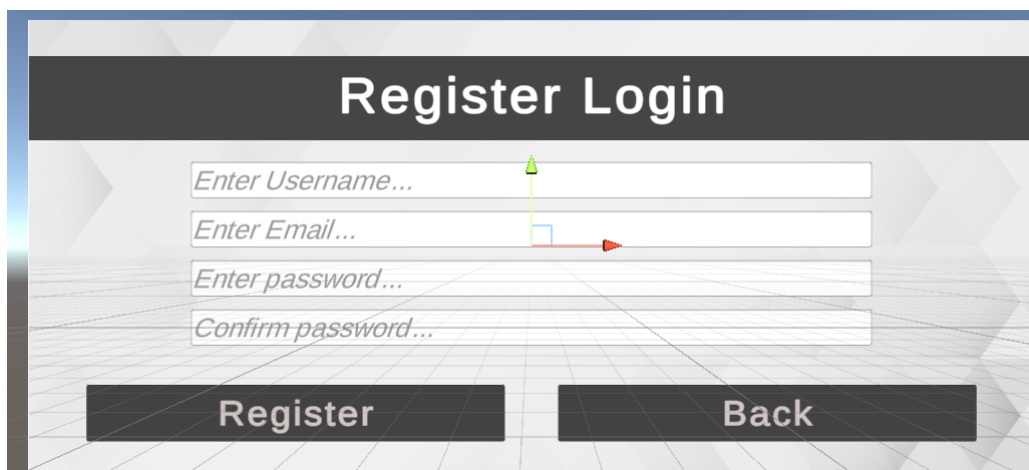
### 7.1 Propojená databáze

Navržená metodika předpokládá efektivní správu dat a komunikaci mezi uživateli. Pro tuto funkci byla zvolena Firebase Google Database. Jedná se o výkonný cloudový databázový systém, který poskytuje propojení s Unity 3D a nabízí řadu funkcí pro ukládání, synchronizaci a správu dat. Firebase umožňuje synchronizovat data v reálném čase, okamžité aktualizace napříč zařízeními a uživateli a podporuje tak interaktivitu propojených aplikací. Firebase poskytuje cloudovou databázi, která umožňuje ukládání a správu dat na serverech ve vzdáleném datovém centru. Datový přenos mezi aplikací a Firebase probíhá pomocí síťových protokolů (například HTTP nebo WebSockets) prostřednictvím internetového připojení zařízení. Když aplikace vytvořená v Unity potřebuje poslat nebo získat data z Firebase databáze, komunikuje s touto databází pomocí tzv. REST API (Representational State Transfer Application Programming Interface). REST API je architektura rozhraní pro komunikaci mezi klientem (v tomto případě aplikací) a serverem (Firebase). Díky této komunikaci může aplikace snadno ukládat a získávat data z Firebase databáze a provádět synchronizaci s cloudem, což zlepšuje uživatelskou zkušenost a umožňuje různé funkcionality, jako je sdílení dat mezi uživateli a ukládání výsledků v reálném čase.



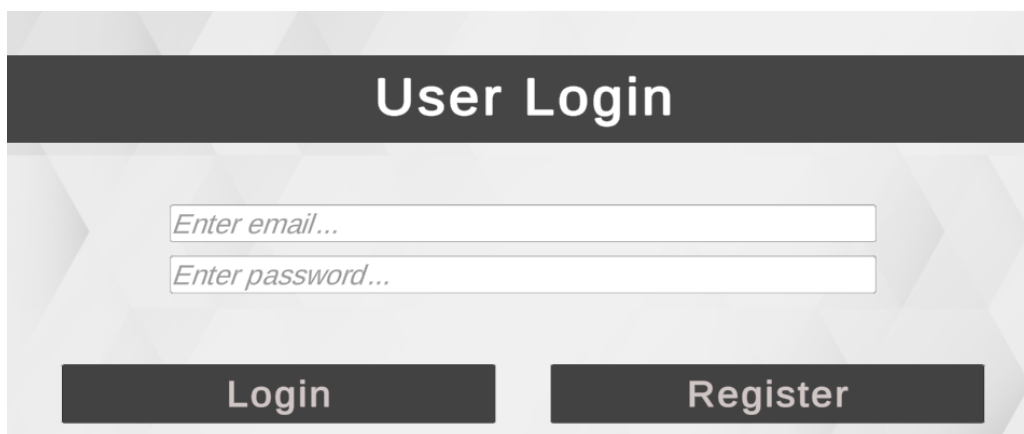
Obrázek 7-1: AR SW – Úvodní scéna [zdroj autor]

Obrázek 7-1 zobrazuje úvodní scénu zobrazenou při spuštění softwaru. V první fázi vývoje AR softwaru bylo vytvořeno propojení s databází Firebase Google.



Obrázek 7-2: AR SW – Scéna registrace uživatele [zdroj autor]

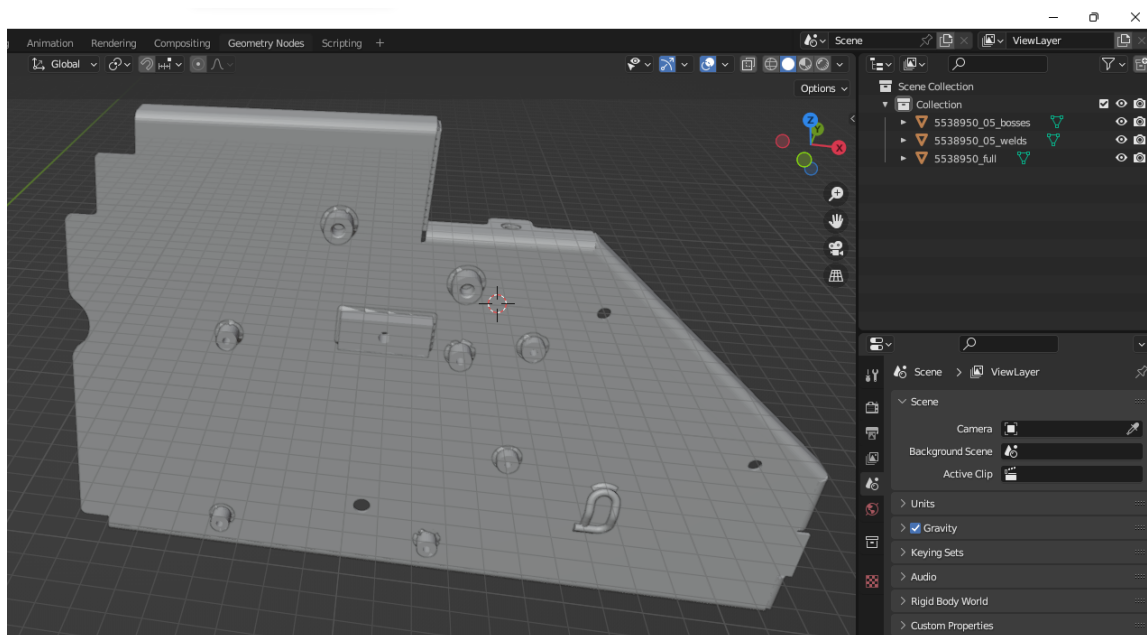
Díky tomu mohla být nejprve nastavena funkce registrace a ověření uživatele. Ukázku úvodních přihlašovacích oken zobrazuje Obrázek 7-2 a Obrázek 7-3. Následně byly propojeny jednotlivé scény s databází tak, aby se získaná data odesílala a ukládala do databáze.



Obrázek 7-3: AR SW – Přihlášení uživatele [zdroj autor]

## 7.2 Příprava CAD modelů

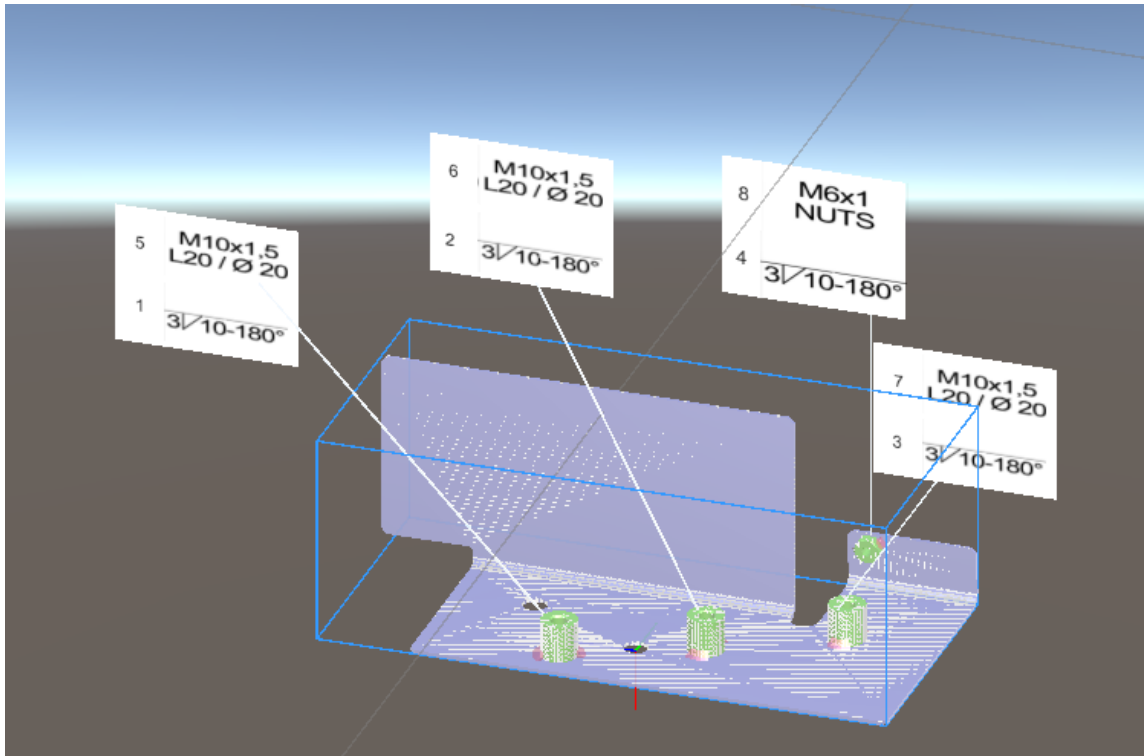
Pro práci s 3D CAD modely byly použity softwary SolidEdge a Blender. SolidEdge je profesionální výkonný softwarový nástroj určený pro CAD modelování a inženýrský design. S jeho pomocí byly vytvořeny detailní 3D modely vybraných dílů. Modely vytvořené v SolidEdge byly následně upravovány v programu Blender. Jedná se o open-source software určený pro tvorbu, animace a vizualizace 3D modelů. Byl využitý především pro úpravu vizualizací 3D modelů pro potřeby experimentu a konvertování modelů do formátů ideálních pro jejich další zpracování. Obrázek 7-4 zobrazuje ukázkou práce s 3D modelem v softwaru Blender.



Obrázek 7-4: AR SW – Úprava CAD modelu v Blenderu [zdroj autor]

## 7.3 Příprava 2D grafiky

Pro tvorbu a úpravu 2D grafiky a prvků vizualizace a uživatelského rozhraní byly zvoleny programy GIMP a Adobe Illustrator. GIMP (GNU Image Manipulation Program) je open-source program pro tvorbu a úpravu 2D grafiky. Adobe Illustrator je profesionální software pro tvorbu vektorové grafiky. Jeho výkonné nástroje a rozsáhlá sada funkcí umožňují tvorbu vektorových ilustrací a grafických prvků. Na následujícím obrázku je možné vidět ukázkou vizualizace propojení 2D infografiky a 3D CAD modelu (Obrázek 7-5).



Obrázek 7-5: AR SW – 2D grafika vytvořená v Adobe Illustrator [zdroj autor]

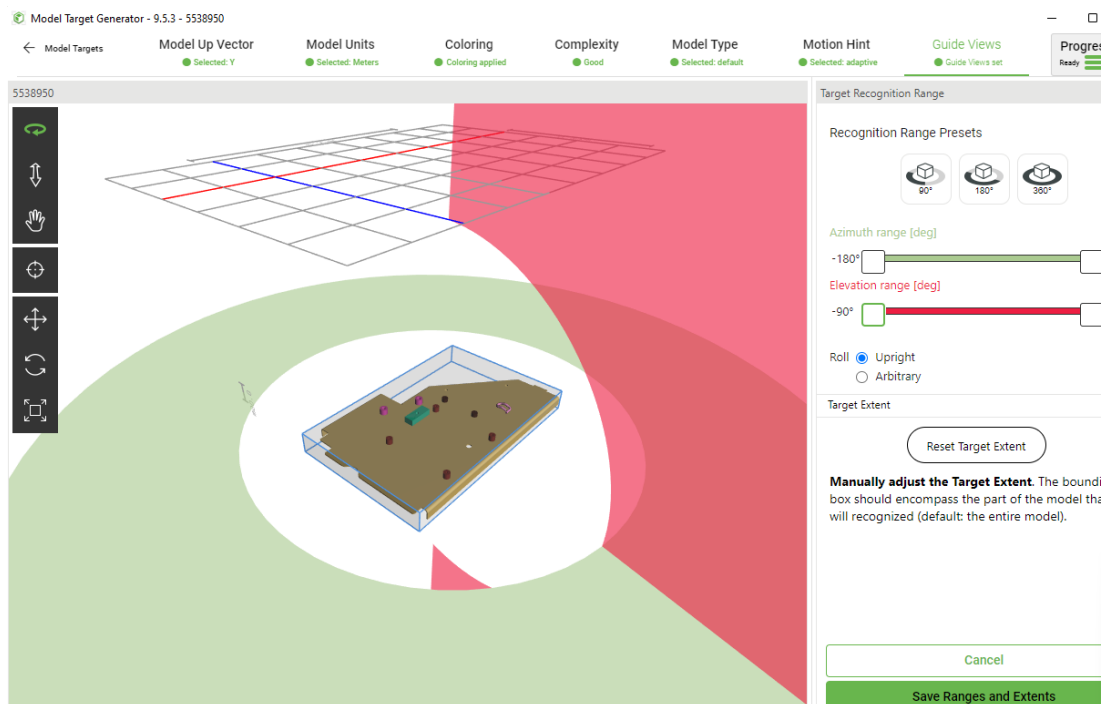
## 7.4 Vuforia Engine

Z dostupných softwarových možností byla zvolena kombinace herního enginu Unity 3D a Vuforia Engine. Vuforia byla zvolena jako AR specializované rozšíření pro Unity 3D. Pracuje s vizuálním rozpoznáváním a sledováním markerů a objektů v reálném čase. Vuforia umožňuje identifikovat objekty, reagovat na ně pomocí virtuálních prvků a vytvářet tak interaktivní a realistické AR scény.

V této studii je zkoumána metoda object recognition, díky které je možné rozpoznávat objekt bez uměle přidaného markeru. Samotný sledovaný objekt potom funguje jako marker, který Vuforia detekuje a rozpoznává, sleduje ho v prostoru a ukotvuje s jeho pomocí naprogramovanou vizualizaci do reálné scény.

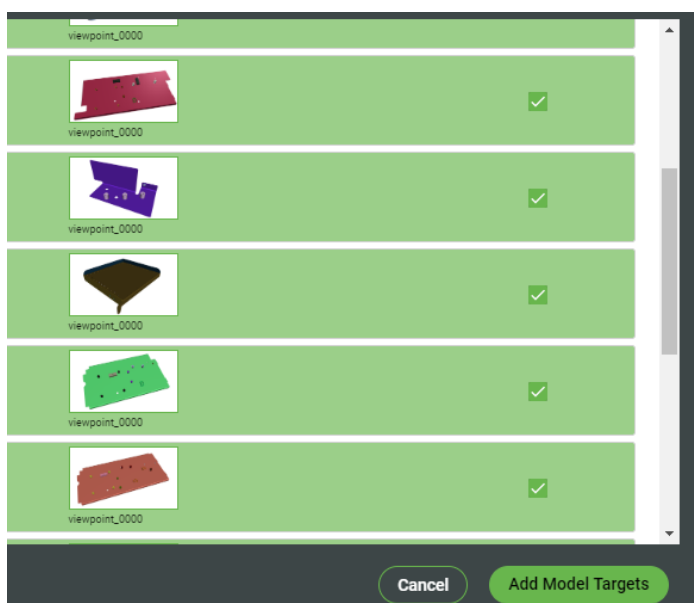
Pro správné fungování této metody byla vytvořena databáze vybraných dílů ve Vuforii. V prostředí Model Target Generator, rozšíření Vuforie pro práci s 3D modely, byly připravené CAD modely nakonfigurovány pro správné fungování při AR vizualizacích. Ukázkou z této konfigurace zobrazuje Obrázek 7-6.





Obrázek 7-6: AR SW – Konfigurace modelu v MTG Vuforia [zdroj autor]

Po dokončení konfigurace všech dílů mohlo být spuštěno trénování databáze. Byla použita metoda „Advanced Training“, během které se provádí detailní analýza importovaného modelu a jeho jednotlivých dílů. K rozpoznávání a vyhodnocování geometrických rysů a vzorců v modelu jsou použity algoritmy umělé inteligence. Na základě těchto analýz je vytvořen model s vylepšenými rozpoznávacími cíli, který je odolnější vůči změnám osvětlení, perspektivy a jiným vnějším vlivům. Díky použití umělé inteligence v procesu Advanced Training může být rozpoznávání objektů v AR prostředí přesnější a spolehlivější. Tato funkce je užitečná zejména při rozpoznávání složitých 3D modelů s více díly nebo při potřebě vysoké přesnosti rozpoznávání. Ukázkou tvorby databáze v prostředí Vuforia zobrazuje následující Obrázek 7-7.



Obrázek 7-7: AR SW – Tvorba databáze ve Vuforii [zdroj autor]

## 7.5 Unity 3D Game Engine

Pro samotný vývoj AR aplikace byl zvolen software Unity 3D. Unity 3D je integrované vývojové prostředí, které nabízí široký výběr funkcí a nástrojů pro tvorbu simulací a aplikací. Mezi jeho výhody patří uživatelsky příjemné rozhraní a rozsáhlá podpora různých platform.

Po propojení s databází, přípravě 2D grafiky a vytvoření databáze 3D modelů byla vytvořena navržená AR aplikace v prostředí Unity.

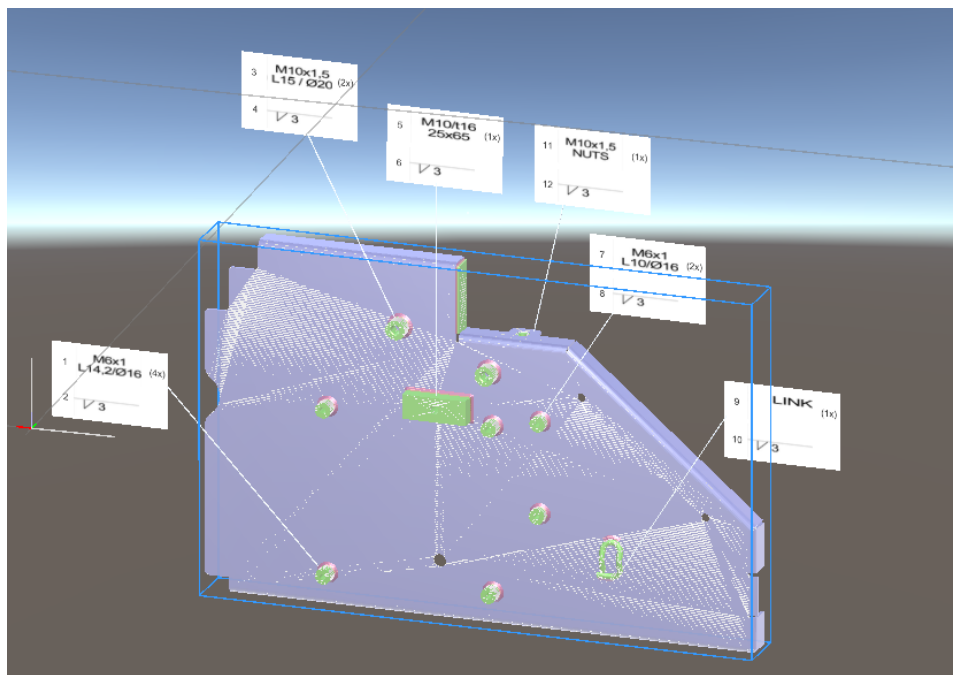
Po úvodním ověření uživatele byla vytvořena úvodní scéna s náhledy na díly z kontrolní sady. Pohled na tuto scénu zobrazuje následující Obrázek 7-8. Jak bylo vysvětleno v kapitole 6, byl tento mezikrok pro manuální výběr příslušné scény ke kontrole vložen do tohoto experimentu z důvodu technologické nemožnosti rozpoznávání více cílových objektů najednou. Přesto byla pro tento experiment upřednostněna tato metoda object recognition před image recognition, neboť se jedná o inovativní novou technologii, která má potenciál pro využití v průmyslových aplikacích, a je proto přínosné z teoretického i praktického hlediska experimentálně ověřit tuto technologii.



Obrázek 7-8: AR SW – Scéna s výběrem z dílů [zdroj autor]

Omezení aktuálně možného rozpoznávání jen jednoho object targetu najednou je řešeno oddělenými scénami. Pro každý z kontrolovaných dílů, byla tedy vytvořena samostatná scéna. Každá z těchto scén byla provázána s cloudovou databází Vuforia a s příslušným modelem v této databázi. Díky této vazbě mohl být do scény umístěn model target, který s vysokou přesností umožňuje rozpoznávání objektů a rozmístění AR vizualizace v reálné scéně. Přes tento model target byla následně umístěna infografika, která má uživateli pomoci rychle se orientovat v požadovaných vlastnostech svařence, a 3D model obsahující vizualizaci ideálního stavu výrobku včetně rozmístění svarů. Po rozpoznání objektu se model target zarovná s reálným objektem a vizualizace ideálního 3D CAD modelu se s vysokou přesností překryje v reálné scéně přes sledovaný objekt. Díky tomu může uživatel rychle porovnat ideální stav s reálným stavem výrobku a díky rozmístění infografiky k příslušným pozicím na objektu rychle kontrolovat požadované parametry. Do scény jsou zároveň doplněna interaktivní tlačítka, která umožňují uživateli obě tyto vizualizace dle potřeby skrývat a opět zobrazovat.

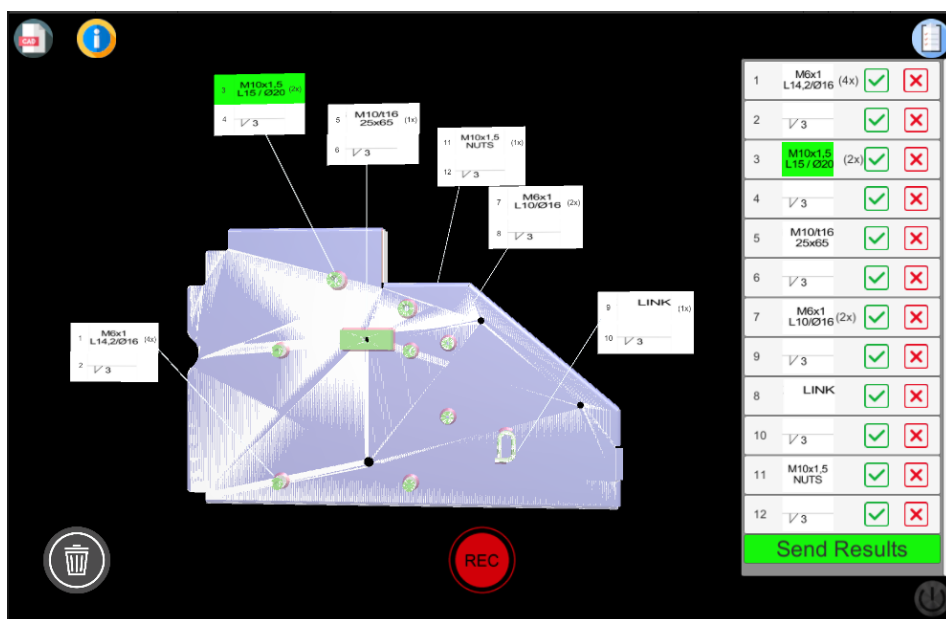
Následující Obrázek 7-9 zobrazuje překrytí Model Targetu, infografiky a vizualizace ideálního stavu 3D CAD modelu.



Obrázek 7-9: AR SW – Detekce produktu v Unity [zdroj autor]

Pro zaznamenání provedené kontroly byl vytvořen interaktivní checklist provázaný s infografikou rozmístěnou nad modelem. Dle vyhodnocení uživatele každé sledované charakteristiky se po zaškrtnutí checklistu barevně označí a prováží obě příslušná pole. Tím je usnadněna orientace uživatele na komplexnějších dílech a eliminováno riziko vynechání kontroly některé charakteristiky, záměny nebo opětovné kontroly již zkontrolovaných vlastností. Dle potřeby má uživatel opět možnost checklist skrývat a opětovně zobrazovat pomocí interaktivního tlačítka.

Vytvořený checklist je provázaný s databází Firebase. Po dokončení kontroly je tedy výsledek odeslán okamžitě do příslušné databáze. Ukázkou kontrolní scény včetně checklistu zobrazuje Obrázek 7-10.



Obrázek 7-10: AR SW – Kontrolní scéna v Unity včetně checklistu [zdroj autor]

Výsledná aplikace byla vytvářena pro zařízení s operačním systémem Android a sestavena ve formátu \*.apk. Může tak být nainstalována na libovolné přenosné zařízení.

V této kapitole byl stručně představen navržený inovativní AR software vytvořený pro testování části navržené metodiky, proces jeho návrhu a vývoje. Byl tedy dokončen návrh obecné metodiky kontroly s podporou AR i vývoj pilotního AR softwaru. V následující kapitole bude představena metodika výzkumu.

## 8 Metodika výzkumu

Po definování návrhu obecného metodického rámce s podporou AR a vývoji pilotního AR softwaru byla provedena rozsáhlý experiment s uživateli. V této kapitole bude tento experiment popsán a představena metodika výzkumu.

Úkolem experimentu je otestovat v reálných podmínkách kontroly kvality svařence v průmyslovém procesu část navržené obecné metodiky kontroly s podporou AR. Teoretickým přínosem tohoto výzkumu je ověření, zda daná obecná metodika pro kontrolu s podporou AR má potenciál zvýšit efektivitu provádění kontroly koncovými uživateli, snížit chybovost jejich práce a zároveň nezvyšovat, nebo naopak snižovat mentální zátěž vnímanou uživateli. Praktickým přínosem je přiblížení technologie AR specializovaným oblastem kontroly v průmyslových procesech, u kterých není plná automatizace vhodná nebo možná.

### 8.1 Vymezení výzkumu

Cílem této části je popsat přístup, který byl zvolen pro zodpovězení výzkumných otázek definovaných v kapitole 1.2 a naplnění cílů této práce shrnutých v kapitole 1.

Smyslem tohoto výzkumu je rozvíjet validní a hodnotné poznatky, a to jak z praktického, tak z obecně teoretického hlediska. Volba metodického přístupu se odvíjela od pragmatického pojetí, které vychází z názoru, že je zapotřebí více výzkumu reálných průmyslových problémů v prostředí společné spolupráce mezi akademickým a průmyslovým světem. Výzkum představený v této práci byl iniciován průmyslovou potřebou spojenou s mezerou ve výzkumu a byl prováděn v úzké spolupráci s výrobní firmou. Aby se zmenšila mezera mezi výzkumem kvality, rozšířené reality a průmyslovou praxí, je cílem této práce zvýšit porozumění tomu, jak lze i částečnou formu automatizace, konkrétně s podporou rozšířené reality a AR vizualizací, využít pro průmyslovou kontrolu kvality svařenců, a dosáhnout tak pružné moderní výroby s minimální nebo nulovou chybovostí.

V rámci teoretické části výzkumu byla provedena rešerše obecných modelů a metodiky kontrolních procesů v průmyslovém prostředí s ohledem na koncepci Průmyslu 4.0. Z ní vyplynulo, že se v tomto ohledu řada autorů shoduje na nutnosti metodických změn procesu kontroly kvality v průmyslovém prostředí, které by mohly přispět k řešení některých omezení v průmyslové praxi. Mezi tato omezení patří pružnost, rychlost a spolehlivost rozhodovacích procesů. K provedení metodických změn mohou sloužit moderní rozvíjející se technologie, využití ICT, modely AI a efektivní práce s daty.

V předcházejících fázích výzkumu byla identifikována mezera ve výzkumu mezi AR a jejím úspěšným nasazením v průmyslových aplikacích. Hlavní snahou bylo hledat souvislost mezi zapojením AR do kontrolní metodiky a efektivním pracovním výkonem uživatelů.

V dalších krocích byla pozornost věnována konceptualizaci teoretického AR rámce pro kontrolní proces. Následně byl proveden experiment s uživateli, který bude představen v této kapitole. Na závěr budou naměřená a sesbíraná data statisticky vyhodnocena a zobecněna pro potřeby dalšího budoucího výzkumu.

### 8.2 Metodika testování

Pro otestování vlivu navržené metodiky s podporou AR byl definován experiment s uživateli. Tento experiment probíhal v úzké spolupráci mezi akademickým a výrobním

prostředím průmyslového podniku. Jednalo se o terénní výzkum, který probíhal v kontrolovaných podmínkách a věnoval se kontrole svařenců.

Pro zvýšení robustnosti této studie, snížení odchylek a nežádoucích zkreslení, byla nejprve provedena pilotní studie s malou skupinou 5 probandů. Pilotní studie se omezovala na kontrolu pouze jednoho výrobku. K hodnocení interakce s AR softwarem a k upřesnění směrů dalšího výzkumu a návrhu pokročilého softwaru pro rozsáhlou experimentální studii byl použit standardizovaný SUS dotazník a rozhovory s probandy. Jako probandi byli vybráni dobrovolníci pracující jako kontrolori kvality svařenců, kteří mají alespoň 1 rok praxe na pozici kontrolora kvality. Pilotní skupinu tvořily 2 ženy a 3 muži. Ženy byly ve věku 50 a 32 let a muži ve věku 27, 33 a 42 let. Použita byla přenosná zařízení, smartphone (Samsung Galaxy S20 FE 5G, 6,5" AMOLED 2400 × 1080 (120Hz)) a tablet (Samsung Galaxy Tab S8 (11" 5G), 2.99GHz, 2,4 GHz, 1,7 GHz, rozlišení 2560 x 1600). Žádný z probandů neměl s ovládáním aplikace AR větší problémy. Účastníci pilotní studie hodnotili použitelnost SW AR pozitivně, což potvrdily i výsledky dotazníků SUS a osobních rozhovorů provedených na konci studie. Výsledný průměr hodnocení SUS byl 78 bodů s průměrnou odchylkou 3,7 bodu. Toto skóre odpovídá hodnocení „velmi dobré“ na SUS škále použitelnosti. Uživatelé ocenili dobrou použitelnost a praktickou funkčnost při efektivní podpoře svých kontrolních činností. Konkrétně oceňují možnost použití jednoduché srovnávací metody pro prvotní posouzení dílu, vizuální zobrazení svarů, které je tradičně nutné hledat na několika výkresových listech a v několika pohledech a řezech, a v neposlední řadě průběžné vizuální označování již kontrolovaných oblastí, čímž se snižuje riziko přehlédnutí některých předepsaných svarů. Uživatelé se pozitivně vyjádřili k optimální velikosti vybraného dílu pro manipulaci a provádění této formy kontroly. Mezi návrhy na zlepšení patřila například potřeba zvýšit kontrast a upravit průhlednost některých grafických prvků. Uživatelé kladně hodnotili možnost použití chytrého telefonu, který při zachování dobré čitelnosti a přehlednosti umožňoval volnou manipulaci jednou rukou s měřicími nástroji nebo kontrolovaným výrobkem. Cílem bylo otestovat správnou funkčnost pilotního AR softwaru, zjistit, jak uživatelé hodnotí její použitelnost, srozumitelnost, výhody, nevýhody a limity. Poznatky z pilotní studie byly zohledněny v dalším vývoji AR softwaru a v návrhu rozsáhlé experimentální studie, která poté následovala.

Hlavního experimentu se účastnilo celkem 40 probandů z průmyslové praxe, kteří byli rozděleni do dvou skupin po 20 účastnících v závislosti na míře zkušeností, které mají s kontrolou svařenců. Určení počtu účastníků se odvíjelo od doporučení v článcích věnujících se tématu volby velikosti skupiny.

Skupina 1 (S1) se skládala z 20 pracovníků, kteří mají zkušenosti s kontrolou svařenců. Byla tvořena 15 muži a 5 ženami. Jejich průměrný věk byl 40,4 let se směrodatnou odchylkou 10,3, minimální věk byl 22 a maximální 54. Všichni pracovníci uvedli, že mají alespoň 1 rok praxi ve strojírenství.

Skupina 2 (S2) byla složena z 20 pracovníků, kteří nemají zkušenosti s kontrolou svařenců. Zároveň ale všichni mají zkušenost z průmyslové výroby delší než 1 rok. Tuto skupinu tvořilo 13 mužů a 7 žen. Jejich průměrný věk byl 41,8, se směrodatnou odchylkou 8,46, kdy minimální věk byl 29 a maximální 61 let.

Všichni účastníci uvedli, že mají zkušenosti s chytrými telefony nebo tablety. Celkem 5 z nich uvedlo, že alespoň jednou použili AR (všichni z S1) a 2 z nich uvedli, že alespoň jednou použili VR (oba z S1).

Tato studie pracuje se dvěma faktory, první je metodika pro podporu kontroly kvality (s podporou AR nebo tištěné dokumentace) a druhý je míra zkušeností uživatelů.

V AR variantě byly instrukce zobrazovány variantou HHD, tedy prostřednictvím vizualizací na přenosných zařízeních. Konkrétně byl k tomuto účelu použit tablet Samsung Galaxy Tab S8 (11" 5G), 2.99GHz, 2,4 GHz, 1,7 GHz, rozlišení 2560 x 1600.

Celkem bylo ke kontrole připraveno 10 typů výrobků. Všechny tyto díly jsou vyráběny pravidelně, v rozsahu malosériové výroby. Každých několik měsíců na nich může být provedena technická změna a životní cyklus je maximálně 5 let, po kterých budou nahrazeny novou sérií. Plná automatizace kontroly je velmi finančně i procesně náročný proces, a proto v jejich případě není vhodná. Relativně výhodnější variantou v tomto případě zůstává kontrola lidským operátorem. Taková kontrola nicméně vyžaduje na inspektorovi poměrně vysokou úroveň odbornosti při interpretaci technických a konstrukčních požadavků a určitou míru zkušeností při tvorbě rozhodnutí, posuzování a porovnávání kontrolovaného objektu s předepsanými standardy.

Vybrané výrobky byly rozděleny do dvou sad. Jedna sada obsahovala 5 typů výrobků po 5 kusech. Celkem se tedy každá sada skládala z 25 kusů ke kontrole. Tyto produkty byly zvoleny tak, aby rozměrově umožnily poměrně dobrou manipulaci při kontrolních úkolech. Vzhledem k charakteru kontrolních operací není kladen tak vysoký důraz na volnost obou rukou, jako například při procesech montáže, kdy je potřeba mít volný pohyb obou rukou a HHD je proto více limitující. Při kontrolních úkolech je větší poměr pozorovacích úkolů na úkor manipulace s díly. Kontrolované výrobky byly zvoleny tak, aby s nimi byla poměrně jednoduchá manipulace na kontrolní desce a nebylo k jejich přesunu nutno využívat jeřáb nebo jiná pomocná zařízení. Jednalo se o díly, které se rozměrově pohybovaly mezi 300–800 mm, jejich hmotnost byla mezi 2–7 kg. Svařence se skládaly z 5-17 komponent.

V rámci experimentu byla na dílech prováděna vizuální kontrola svařence. To znamená, že bylo kontrolováno především, zda:

- Všechny komponenty jsou zvolené správně a žádná nechybí,
- Všechny komponenty jsou umístěny na správných pozicích,
- Všechny svary jsou rozmístěny na správných pozicích ve správném počtu, velikosti, se správnou délkou a mezerami, a ve správné kvalitě.

Základní tvar každého dílu tvoří plechový výpalek s ohyby z ohraňovacího lisu. Na tento základní plech jsou poté navařovány komponenty jako navařovací matice nebo čepy různých délek a průměrů s různými otvory nebo závitů. Kromě těchto komponent mohou být k tomuto základnímu plechu svařeny další plechové tvarové výpalky nebo tvarové ohyby. Díly pro obě sady byly zvoleny tak, aby představovaly stejnou náročnost pro kontrolora. Kromě toho, že jsou v obou sadách díly designově velmi podobné, byly zvoleny tak, aby každá sada vyžadovala v součtu stejný počet bodů ke kontrole.

Na základě rozhovorů s vedoucími pracovníky oddělení kvality se u těchto dílů jedná o poměrně komplexní kontrolní úkoly. Při jejich kontrole je často potřeba procházet několik úrovní výkresové dokumentace a kusovníkových vazeb, orientovat se ve více listech velmi podobných výkresů a správně interpretovat pomocné výkresové detaily a řezy. Některé díly se sobě navzájem velmi podobají a ve výrobní procesu je běžné, že se během směny často střídají malé dávky několika typů takto velmi podobných výrobků. Proto dochází k chybě, kdy svařeč například zvolí čep s nesprávnou délkou, opomene navařovací matici nebo ji navaří na

nesprávnou pozici. Stává se, že svářeč zvolí nesprávné rozložení svarů, které neodpovídá výkresové dokumentaci nebo některý svar opomene úplně. Zpravidla se podobný typ chyby neobjeví v celé výrobní dávce, ale dojde k němu z nepozornosti pouze na části dílů z dávky. Pro inspektory je proto poměrně náročné takový typ chyby spolehlivě odhalit, udržet maximální pozornost v průběhu kontroly celé dávky a zároveň provést kontrolu v co nejkratším čase tak, aby nebyl přerušovaný hodnotový tok výrobního procesu.

V souladu s pozorováními a analýzou záznamů interně zachycených vad, byly do kontrolní sady náhodně rozmístěny následující chyby:

- Chybějící navařovací komponenta
- Komponenta navařena na nesprávné pozici
- Matice navařená z opačné strany
- Chybějící svar
- Nesprávně rozložené svary

V celé sadě 25 výrobků bylo 20 kusů zcela správně (80 %) a na 5 kusech (20 %) se vyskytla jedna z výše uvedených chyb. Stejný poměr náhodného rozložení chyb se vyskytoval také na druhé kontrolní sadě výrobků.

Všichni tito probandi provedli kontrolní experiment ve dvou scénářích. V jednom z nich kontrolovali kontrolní sadu s pomocí navrženého AR přístupu a vyvinutého AR softwaru, v druhém kontrolovali druhou kontrolní sadu s pomocí tradičního přístupu založeného na papírových podkladech.

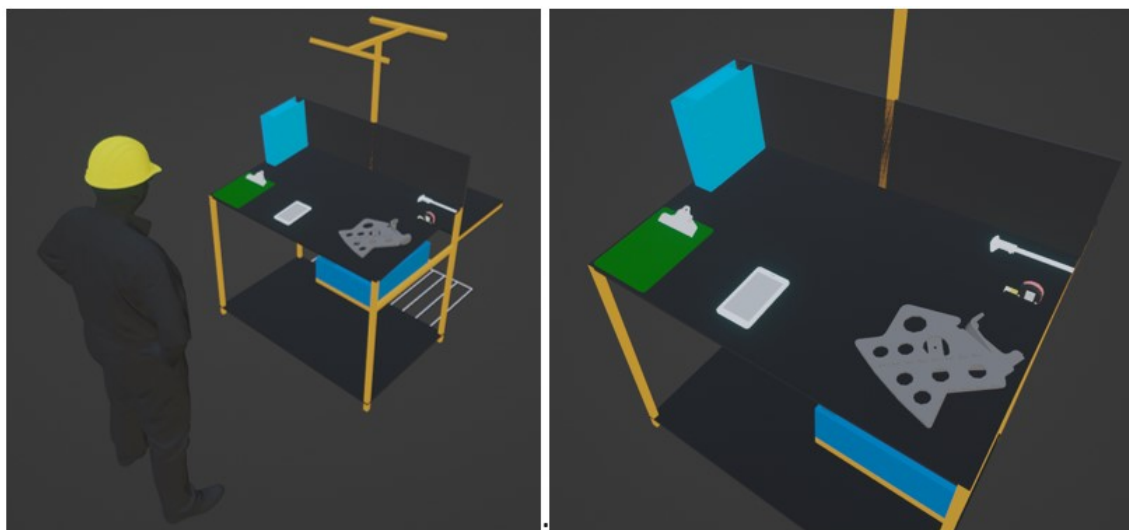
### 8.3 Konvenční metodika kontroly

První varianta testovaná v experimentu byl konvenční přístup ke kontrole svařenců. V tomto přístupu byl inspektor odkázaný pouze na tištěné podklady ke kontrole a prováděl kontrolu v situaci nulové automatizace. Po předání výrobku inspektorovi začal inspektor nejprve proces identifikace. Sloužila mu k tomu papírová průvodní dokumentace. Po identifikaci výrobku provedl s pomocí technické dokumentace a kontrolních plánů kontrolu kvality daného výrobku. Nejprve bylo potřeba interpretovat předepsané specifikace a charakteristiky kvality předepsané konstruktéry nebo technology. Po interpretaci těchto požadavků byla porovnána kvalita dílu s předepsanými standardy z technické dokumentace a posouzena shoda či odchylka. V případě shody byl díl uvolněn pro další operace. Pokud byla zjištěna odchylka, byl vrácený na opravu. Výsledky tohoto procesu byly zaznamenány do tištěného checklistu. Obecné uspořádání pracoviště pro tento přístup ke kontrole zobrazuje Obrázek 8-1.

V této variantě byly instrukce a informace zprostředkovány uživatelům tradičním způsobem tištěné výkresové dokumentace a kontrolních plánů. Kontrolní plány a obecně kontrolní procesy, které jsou běžně pro díly použité v experimentu využívány, nejsou pro nezkušené kontrolory vhodné. V tomto výzkumu je problematika přístupů ke kontrole s podporou AR sledována mimo jiné z hlediska zkušeností pracovníků s daným procesem. Proto byli součástí experimentu probandi se zkušenostmi s kontrolou svařenců, i bez zkušeností s kontrolou svařenců a pravidelným čtením výkresové dokumentace svařovaných výrobků. Namísto běžných podkladů pro kontrolu byly proto vytvořeny upravené kontrolní plány pro potřeby experimentu pro díly v kontrolní sadě, které jsou vhodné i pro méně zkušené probandy. Tyto plány byly testovány na pilotní skupině probandů, kteří nemají

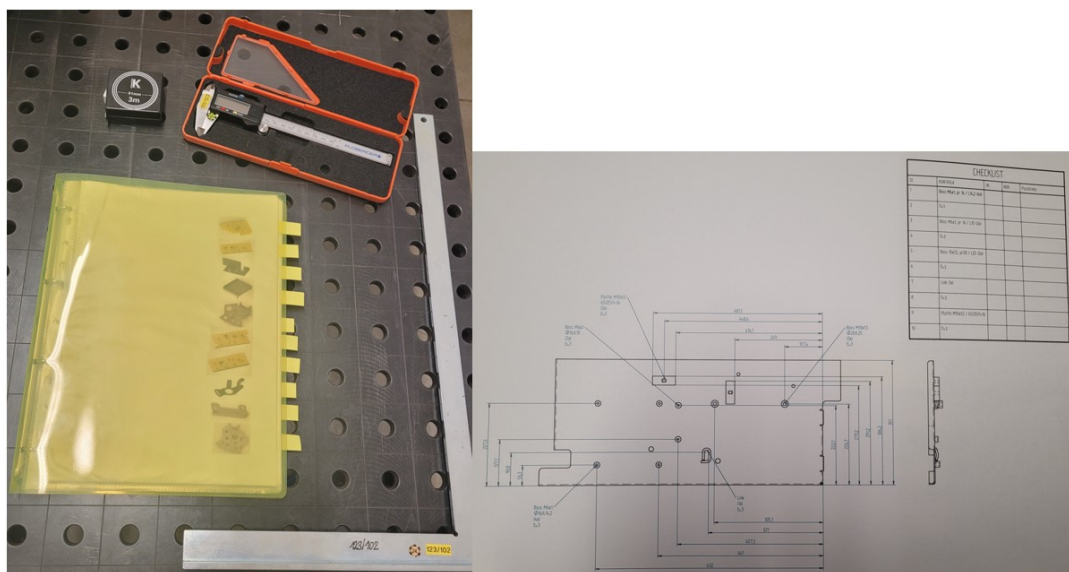


rozsáhlé zkušenosti se čtením výkresové dokumentace pro svařence. Při rozhovorech pro testování všichni potvrdili, že vizuální podoba kontrolního plánu byla přehledná a dostatečná, a nezaznamenali potíže při orientaci v plánu.



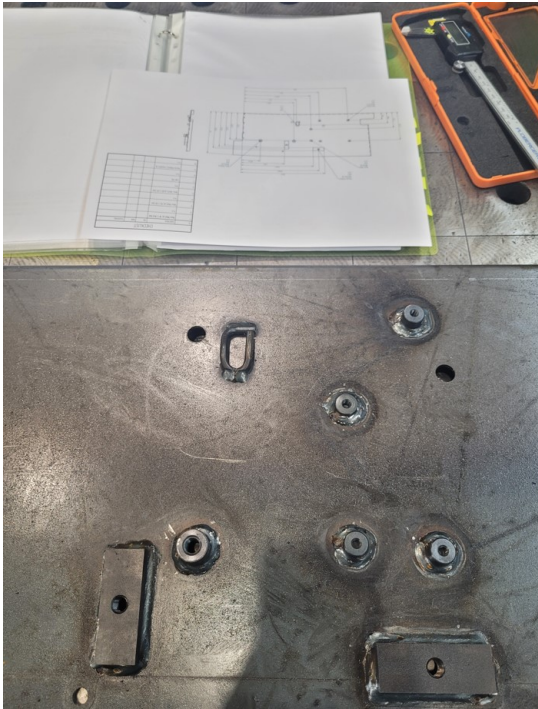
Obrázek 8-1: Uspořádání pracoviště při konvenčním přístupu ke kontrole [zdroj autor]

Z takto vytvořených kontrolních plánů byla vytvořena sada dokumentace pro kontrolu výrobku v experimentu, která byla hlavním podkladem pro provedení konvenční metodiky kontroly kvality. Příprava pracoviště je zobrazena na následujících obrázcích (Obrázek 8-2 a Obrázek 8-3).



Obrázek 8-2: Pracoviště připravené pro konvenční přístup kontroly [zdroj autor]

Díky takto připraveným podkladům probíhal během experimentu proces kontroly bez výraznějších prostojů a časových ztrát. S pomocí připravené výkresové dokumentace byli uživatelé schopni v relativně krátkém čase identifikovat díl, dohledat příslušné tištěné podklady a začít s interpretací těchto podkladů. Tato interpretace byla poté porovnána se skutečnou kvalitou zjištěnou na reálném kusu.



Obrázek 8-3: Průběh kontroly konvenčním přístupem [zdroj autor]

#### 8.4 Navržená AR podpora kontroly

Druhou variantou byl navržený AR kontrolní přístup. V tomto případě byl proband od začátku prováděn procesem s podporou vyvinutého AR softwaru. Po spuštění kontrolní scény byl zahájen video záznam reálné scény, který byl vstupem pro AR modul použitého softwaru, a s pomocí funkcionalit SDK Vuforia Engine zpracovával AR scénu. Díky rozšíření Vuforia funguje sledovaný objekt jako target bez nutnosti přidávat dodatečný uměle vytvořený marker. Poté, co modul detekce a rekognice rozpoznal kontrolovaný objekt, rozmístil s pomocí modulu trackingu do reálné scény naprogramovanou 3D vizualizaci a uživatelské rozhraní vytvořené v Unity 3D. Toto prostředí uživatele interaktivně provádí kontrolním plánem, promítá na reálný díl ideální CAD model pro snadné porovnání základních vlastností, zobrazuje interpretaci charakteristik v prostoru na kontrolovaném kusu. Rozhodnutí o shodě je závislé na posouzení inspektora, který shodu či odchylku od cílů kvality zaznamená do checklistu. Ten interaktivně označuje již zkontrolované vlastnosti do AR scény ukotvené nad kontrolovaným reálným výrobkem. Po dokončení kontroly jsou výsledky checklistu odeslány do databáze Firebase, v případě zachycení odchylky od požadované kvality je k checklistu před odesláním vložena anotace popisující tuto odchylku. Ukázkou AR přístupu zobrazuje Obrázek 8-4.

Obě skupiny S1 i S2 prováděli při experimentu kontrolu s použitím popsaného konvenčního přístupu i navrženého AR přístupu. Celkem bylo při experimentu kontrolováno 50 dílů, které zahrnovali 10 typů výrobků. Pro každý testovaný přístup byla použita jedna kontrolní sada po 25 výrobcích. Obě kontrolní sady zahrnovaly výrobky složitostí, designem i rozměrově srovnatelné. Obsahovaly stejné množství dílů se stejným poměrem chyb. Skupina S1 kontrolovala nejprve jednu sadu s podporou AR přístupu, poté druhou sadu v kontextu konvenčního přístupu. Skupina S2 kontrolovala nejprve jednu sadu s podporou konvenčního přístupu a následně druhou sadu s pomocí navrženého AR přístupu. Všichni probandi tak

nakonec kontrolovali všechny díly jedním nebo druhým kontrolním přístupem. Jednotlivé díly přicházeli probandům ke kontrole randomizovaně.



Obrázek 8-4: Kontrola s podporou AR [zdroj autor]

Na úvod každé fáze experimentu proběhlo krátké zaškolení. Účastník byl nejprve krátce seznámen s průběhem procesu a s fungováním AR aplikace nebo se strukturou papírové kontrolní dokumentace. Následně dostal uživatel čas na otestování funkcí AR softwaru. Probandům bylo vysvětleno, jak bude experiment probíhat a dostali instrukce provádět kontrolu v co nejkratším čase a zároveň co nejprecizněji s co nejmenším množstvím chyb. Tato fáze trvala 5-10 minut.

Následně proběhla hlavní fáze experimentu, tedy inspekce obou kontrolních sad. Probandům přicházeli díly randomizovaně. Výsledky z AR aplikace byly průběžně rovnou odesílány do databáze Firebase, papírové výsledky byly shromážděny na konci celého procesu. V průběhu kontroly byl sledován čas a sbírána zpětná vazba a komentáře od probandů. Po dokončení kontroly prvních 25 dílů, byli probandi požádáni o vyplnění NASA TLX dotazníku pro ohodnocení mentální zátěže, kterou během tohoto procesu vnímali. Poté pokračovali s kontrolou druhé sady 25 dílů. Po skončení této části vyplnili opět NASA TLX. Kromě toho vyplnili probandi dotazník SUS, kde hodnotí použitelnost navrženého přístupu a anonymizovaný dotazník, kde uvádějí informace o svém věku, pohlaví, pracovních zkušenostech, jejich vztahu k IT a technologiím, zkušenostech s AR a VR. Následně proběhl rozhovor s každým probandem za účelem zjistit jejich názor na provedený experiment, na to, kterou metodu by v každodenní práci upřednostnili, jak hodnotí srozumitelnost a potenciál jednotlivých přístupů, a jaké spatřují výhody, nevýhody a limity jednotlivých přístupů.

## 8.5 Data získaná z experimentu

U uživatelů byl sledován celkový čas dokončení kontroly celé sady s podporou přístupu AR a druhé sady s využitím konvenčního popsaného přístupu. V naměřených časech byly uvažovány vždy pouze časy od zahájené kontroly kusu po dokončení kontroly. Čas potřebný k manipulaci mezi jednotlivými kontrolami do celkového času zahrnutý nebyl.

Vedle času dokončení úkolu byla u uživatelů sledována také míra chybovosti. Na kontrolovaných dílech byly náhodně umístěny chyby, které měli probandi za úkol odhalit. V obou sadách bylo rozmístěno stejné množství a typy chyb. Pro každého probanda v případě obou kontrolních scénářů byl zaznamenán počet chyb, které udělal při kontrole dílů. Ve většině případů se jednalo o chybu, kdy proband přehlédl vadu na dílu. V jednom případě se vyskytla chyba, kdy proband označil správný díl za chybný.

Vedle celkového času dokončení úkolu a míry chybovosti byla statisticky vyhodnocena míra mentální zátěže, kterou uživatelé během experimentu vnímali. K hodnocení této zátěže byla využita standardizovaná metoda NASA TLX (Task Load Index). Konkrétně byla využita varianta RTLX (Raw Task Load Index). Jedná se o zjednodušenou verzi původního nástroje NASA TLX, která si zachovává důležité aspekty hodnocení mentální zátěže, ale je pro probandy snazší k vyplnění. Zaměřuje se na dotazníkové hodnocení šesti hlavních oblastí, jsou to mentální zátěž, fyzická zátěž, časová zátěž, úsilí, výkon a frustrace. Každá z těchto oblastí je hodnocena na škále od 0 do 100, vyšší hodnota představuje vyšší zátěž v dané oblasti [142]. Tento dotazník hodnocení mentální zátěže hodnotili probandi po dokončení každé ze dvou fází.

V neposlední řadě uživatelé hodnotili také použitelnost navrženého řešení. K tomuto hodnocení sloužil dotazník SUS (System Usability Scale). Jedná se o standardizovanou metodu hodnocení použitelnosti řešení. V tomto experimentu byla tato metoda použita k získání zpětné vazby od probandů ohledně použitelnosti navrženého AR přístupu.

## 8.6 Kvalita výzkumu

Určení kvality provedeného výzkumu je důležitý, ale obtížný úkol, zejména pokud jsou výstupy založeny na kvalitativních a kvantitativních výsledcích. Kvalita výzkumu se měří nejčastěji z hlediska variability a reliability.

Validita je chápána jako koncept ověřování výsledků. Je vyjádřena jako vztah mezi skutečností a výsledkem výzkumu [143]. Obecným kritériem pro kvalitu výzkumu je důvěryhodnost. Ověřovací kroky by měly probíhat ve všech krocích prováděných během výzkumného procesu.

Základní klasifikace validity rozlišuje mezi interní a externí validitou. Interní validita stanovuje kauzální vztah, kdy určité předpoklady vedou k dalším výsledkům. Provedení experimentů a případových studií umožňuje získat hlubší porozumění sledovaných jevů a zvýšit interní validitu.

Externí validita se týká zobecnitelnosti výsledků výzkumu a míry zohlednitelnosti výsledků v jiném prostředí, než je prostředí studie. Pro překonání této slabiny experimentálních studií navrhuje autoři využití logiky replikace ve studiích s více experimenty.

Reliabilita představuje jistotu, že proces šetření a výsledky výzkumu jsou opakovatelné. Jedná se jev, který vypovídá o tom, nakolik je výsledek testu ovlivněn náhodnou chybou [143].

Kvalita výzkumu je důležitým faktorem pro dosažení spolehlivých a relevantních výsledků. Kvalita výzkumu zajišťuje spolehlivost a platnost získaných dat a závěrů. Její důležitost se projevuje ve všech fázích výzkumu, od stanovení cílů až po interpretaci výsledků.

## 9 Použité vědecké metody

Kapitola použité vědecké metody v krátkosti představuje vědecké přístupy a metody, které jsou v práci použity.

### 9.1 Empirické metody

Empirické metody představují klíčový prvek vědeckého výzkumu a umožňují systematický a objektivní přístup ke zkoumání jevů a získávání dat. Tato kategorie vědeckých metod zahrnuje několik důležitých přístupů, včetně pozorování, měření a experimentu. Empirické metody jsou založené na zkušenostních principech, které jsou výsledkem již používaných a vyzkoušených postupů.

#### 9.1.1 Pozorování

Pozorování je jednou z nejzákladnějších empirických metod vědeckého výzkumu. Spočívá v systematickém sběru informací a dat prostřednictvím pozorného sledování jevů nebo procesů. Pozorování je cílevědomé, plánovité a systematické sledování určitých skutečností. Je to metoda, kdy jsou informace získávány bezprostředním smyslovým vnímáním. Jedná se o nejuniverzálnější metodu, která poskytuje prvotní informace o sledovaném jevu nebo objektu a je většinou základem každého výzkumu [144].

Pozorování je výběrovým vnímáním, kdy se vymezuje předmět pozorování s ohledem na výzkumné cíle. Opakováním pozorování lze dosáhnout větší korektnosti metody a minimalizace náhodné složky ve formalizovaném stavu.

#### 9.1.2 Měření

Měření je proces kvantifikace jevů nebo atributů za účelem získání konkrétních dat. To zahrnuje použití nástrojů, technik a metrik k zachycení kvantitativních informací. Měření umožňuje přesně a objektivně zaznamenat různé aspekty zkoumaných jevů.

#### 9.1.3 Experiment

Experiment je jednou z nejvýraznějších empirických metod vědeckého výzkumu, která umožňuje testovat hypotézy a zjišťovat kauzální vztahy mezi proměnnými. V experimentu jsou záměrně manipulovány jedna nebo více nezávislých proměnných a je sledováno, jaký vliv má tato manipulace na závislé proměnné. Experimenty umožňují kontrolovat vnější vlivy a poskytují možnost prověřit příčinné souvislosti. Experiment je pozorováním za kontrolovaných či řízených podmínek [144].

### 9.2 Obecně teoretické metody

Obecně teoretické vědní metody nevycházejí primárně z empirických zkušeností nebo z měření, ale jsou všeobecně přijímány jako univerzální teoretické postupy vědecké práce. Představují základní součást vědeckého zkoumání, která umožňuje rozvíjet a testovat konceptuální rámce, hypotézy a teorie. Tato kategorie metod zahrnuje několik důležitých přístupů, mezi které patří analýza-syntéza a indukce-dedukce.

### 9.2.1 Analýza – syntéza

Analýza-syntéza je teoretická metoda, která se zaměřuje na rozklad komplexních problémů nebo jevů na jednodušší části a následnou syntézu těchto částí k vytvoření nových teoretických konceptů nebo řešení. Během analýzy jsou detailně zkoumány složité jevy nebo koncepty, jsou rozkládány na jednotlivé komponenty a analyzovány jejich vztahy. Syntéza následně spojuje tyto komponenty a umožňuje vytvořit nové teoretické rámcové struktury nebo hypotézy [145].

### 9.2.2 Indukce – dedukce

Indukce a dedukce jsou dvě hlavní formy logického myšlení používané v teoretickém výzkumu. Indukce začíná pozorováním konkrétních příkladů nebo dat a z nich vyvozuje obecné závěry. Tímto způsobem mohou být formulovány teorie nebo hypotézy na základě opakujících se pozorování. Indukce představuje postup od zvláštního k obecnému. Jedná se o zkoumání jednotlivé události, jevu nebo faktu, na jehož základě je potom vyvozován obecný závěr. Indukce znamená odvozování všeobecných tvrzení z empirického materiálu na základě mnoha poznatků o jednotlivostech. Indukce umožňuje formulaci obecnějšího závěru platných pro zkoumaný objekt nebo jev.

Naopak dedukce začíná od obecných závěrů nebo teorií a odvozuje z nich konkrétní předpovědi, které lze testovat v praxi. Deduktivní přístup se často používá k ověření existujících teorií nebo k formulaci konkrétních předpovědí pro empirické studie. Dedukce jako postup od obecného ke zvláštnímu je metoda, kdy je vyvozováno z obecného jednotlivé. Představuje takový myšlenkový proces, kdy se z premis použitím určitých pravidel a postupů dospěje k novému tvrzení. Jedná se o způsob myšlení, při němž se z obecných závěrů a tvrzení vyvodí nový, méně obecný závěr.

Indukce je podobně jako analýza a syntéza těsně spojena s dedukcí. Indukcí lze dospět na základě zkoumání jednotlivých (zejména empirických) jevů k teoretickým zobecněním, teoretické závěry lze naopak dedukcí v praxi ověřovat [145].

### 9.2.3 Generalizace

Jedná se o metodu zobecnění, kdy je informace o jednotlivém jevu nebo objektu vztažena na celou skupinu jevů nebo objektů. Podstatou je přisouzení vlastnosti zjištěné u užší skupiny skupině širší. Z poznání daného jednotlivého jevu či objektu, který je znám, je vyvozováno chování více jevů či objektů [145].

### 9.2.4 Komparace

Jedná se o tzv. metodu srovnání, která je jednou z nejpoužívanějších vědeckých metod práce. Umožňuje stanovit shody a rozdíly jevů či objektů. Při srovnávání se zjišťují shodné nebo rozdílné stránky různých předmětů, ukazatelů nebo jevů [145].

## 9.3 Statistické metody

Statistické metody jsou klíčovými nástroji ve vědeckém výzkumu, které umožňují analyzovat, interpretovat a vyvozovat závěry na základě dat. Tato kategorie metod zahrnuje širokou škálu technik pro analýzu kvantitativních dat.



### 9.3.1 Studentův t-test

Studentův t-test je statistická metoda, která se používá k porovnání průměrů dvou nebo více skupin dat a určení, zda jsou tyto rozdíly statisticky významné. Studentův t-test je nejčastěji používaným parametrickým testem – používá se pro testování rozdílu 2 středních hodnot  $m$ . Podle statistické významnosti testovaného rozdílu středních hodnot (nejčastěji mezi pokusnou a kontrolní skupinou) je usuzována účinnost aplikovaného pokusného zásahu ve sledovaném experimentu [146].

### 9.3.2 Wilcoxonův test

Wilcoxonův test, často nazývaný Mann-Whitneyho test, je neparametrický test, který se používá k porovnání dvou nezávislých skupin dat, když data nejsou normálně rozdělena nebo nevykazují rovnoměrné rozptyly. Používá se pro hodnocení párových pokusů, kdy sledovaná veličina neodpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení. Porovnává 2 měření provedená u jednoho výběrového souboru. Testuje hypotézu rovnosti distribučních funkcí na základě ověření symetrického rozložení sledované náhodné veličiny [146].

### 9.3.3 Shapiro-Wilkův test

Shapiro-Wilkův test je statistický test používaný pro testování normality datového souboru. Jeho cílem je zjistit, zda daný soubor dat pochází z normálního rozdělení, což je jedním z důležitých předpokladů pro použití některých parametrických statistických testů.

Test byl vyvinut v roce 1965 statistiky Samem Shapiroem a Martinem Wilkem. Princip testu spočívá v porovnání teoretického normálního rozdělení s empirickým rozdělením dat. Pokud data nejsou normálně rozdělená, test vrací nízkou hodnotu  $p$ , což dává dostatek důkazů pro zamítnutí nulové hypotézy o normálním rozdělení a přijetí alternativní hypotézy, že data nejsou normálně rozdělená. Shapiro-Wilkův test je často používán jako předběžný test před aplikací parametrických statistických testů, jako je t-test nebo analýza rozptylu (ANOVA). Pokud jsou data normálně rozdělená, mohou se použít tyto parametrické testy. Pokud však data nejsou normálně rozdělená, je vhodné použít neparametrické alternativy těchto testů [147].

### 9.3.4 Dvoucestná ANOVA

Dvoucestná analýza rozptylu (ANOVA) je statistická metoda používaná k porovnání více než dvou skupin a zkoumání vlivu dvou nebo více faktorů na závislou proměnnou. Tato metoda je pokročilou verzí jednocestné ANOVA, která je určena pouze pro porovnání dvou skupin.

Ve dvoucestné ANOVA jsou data rozdělena do více skupin, které jsou dále kategorizovány do dvou nebo více kategorií, tzv. faktorů. Každý faktor má své vlastní úrovně, a každý účastník experimentu může být zařazen do jedné kombinace faktorů. Cílem dvoucestné ANOVA je zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi skupinami na základě těchto faktorů a zda faktory navzájem interagují.

Předpoklady dvoucestné ANOVA jsou podobné jako u jednocestné ANOVA. Patří sem normalita datových souborů, homoskedasticita (tj. shoda rozptylů mezi skupinami) a nezávislost pozorování [148].

### 9.3.5 Tukeyho test

Tukeyho test, známý také jako Tukeyho HSD (Honestly Significant Difference) test, je statistická metoda používaná k identifikaci rozdílů mezi skupinami ve vícefaktorové analýze rozptylu (ANOVA). Jeho hlavním cílem je určit, které skupiny jsou od sebe statisticky významně odlišné ve smyslu jejich středních hodnot. Tato metoda je široce využívána v experimentálním výzkumu, kde je potřeba srovnat výsledky mezi několika skupinami. Tukeyho test poskytuje konkrétní hodnoty rozdílů mezi skupinami a určuje, zda jsou tyto rozdíly statisticky významné na základě stanovené hladiny významnosti (například  $\alpha = 0,05$ ). Tato metoda je užitečným nástrojem pro detailní post-hoc analýzu výsledků ANOVA [149].

### 9.3.6 Leveneův test

Leveneův test je statistická metoda používaná k testování homogenity rozptylů mezi různými skupinami dat. Jeho hlavním cílem je zjistit, zda jsou rozptyly mezi skupinami statisticky signifikantní. Leveneův test je často využíván před použitím analýzy rozptylu (ANOVA), aby se ověřilo, zda je splněn předpoklad homogenity rozptylů. Pokud Leveneův test naznačuje, že rozptyly nejsou homogenní, může to mít významný dopad na interpretaci výsledků ANOVA. Tato metoda je důležitým nástrojem pro statistickou validaci a zajišťuje, že analýza ANOVA je prováděna na správných datech [150].

### 9.3.7 Friedmanův test

Friedmanův test je neparametrická alternativa k opakovaným měřením ANOVA, která se používá k hodnocení statistických rozdílů mezi více skupinami, kdy data nemají normální rozdělení nebo jsou závislá. Tato metoda se používá, v případě jedné nezávislé proměnné a jedné závislé proměnné naměřené ve více opakováních nebo pod různými podmínkami. Friedmanův test analyzuje, zda existují statisticky významné rozdíly mezi skupinami. Pokud Friedmanův test ukáže statistický význam, následuje post-hoc analýza pro identifikaci konkrétních skupin, které jsou od sebe odlišné. Tato metoda je užitečná v případech, kdy nelze použít parametrické metody kvůli nesplnění předpokladů o rozdělení dat [151].

## 9.4 NASA TLX

NASA TLX je multidimenzionální stupnice určená k získání odhadů pracovní zátěže od jednoho nebo více operátorů během provádění úkolu nebo bezprostředně po něm. Jedná se o nástroj, který je poměrně snadno použitelný a spolehlivě citlivý na důležité faktory. Jeho použití se za posledních 20 let rozšířilo daleko za hranice původního použití v oboru letectví. Umožňuje odvodit celkové skóre pracovní zátěže na základě váženého průměru hodnocení šesti dílčích stupnic [152].

Pracovní zátěž je pojem, který představuje náklady na splnění požadavků úkolu pro lidského operátora. V ideálním případě by lidé mohli plnit vše, co se od nich očekává rychle, přesně a spolehlivě. Náklady na udržení výkonnosti mohou být pro člověka nepříjemně vysoké (například únava, stres, nemoci, nehody), je proto důležité zkoumat oblasti týkající se pracovní zátěže obsluhy.

NASA Task Load Index se skládá ze šesti dílčích stupnic, které představují do jisté míry nezávislé skupiny proměnných: mentální, fyzické a časové nároky, frustrace, úsilí a výkon. První tři stupnice se týkají nároků kladených na subjekt. Ostatní se zaměřují na interakci



subjektu s úkolem. Vychází se z předpokladu, že určitá kombinace těchto dimenzí pravděpodobně představuje pracovní zátěž, kterou zažívá většina lidí vykonávajících většinu úkolů. NASA TLX tedy kombinuje dílčí hodnocení, kterým je přidělena váha podle jejich důležitosti pro subjekt při plnění úkolu.

Tento proces se skládá ze dvou částí, hodnocení a váhy. Hodnocení pro každou ze šesti dílčích škál je stanoveno subjekty po dokončení úkolu. Každé škále je přiřazeno číselné hodnocení v rozmezí od 0 do 100, tedy od nejméně po nejvíce zatěžující. Váhy jsou určeny tím, že subjekty vyberou z dvojice možností tu, která je pro ně z hlediska pracovní zátěže nejvýznamnější. Váhy se pohybují v rozmezí od 0 do 5, tedy od nejméně relevantní po nejvíce relevantní. Hodnocení a váhy jsou poté zkombinovány a je vypočten vážený průměr pro celkové hodnocení pracovní zátěže [152].

## 9.5 SUS

SUS, neboli System Usability Scale, patří mezi nepoužívanější standardizované dotazníky pro hodnocení vnímané použitelnosti [153]. Náhled dotazníku zobrazuje Obrázek 9-1.

SUS obsahuje 10 položek se smíšeným tónem, kde lichá čísla mají pozitivní tón, zatímco sudá mají negativní tón. Zahrnují pětibodovou Likertovu škálu ukotvenou v koncových bodech s hodnocením „rozhodně souhlasím“ pro 5 a „rozhodně nesouhlasím“ pro 1. Tyto hodnoty jsou sečteny a pomocí násobících koeficientů převedeny na celkové skóre v rozmezí od 0 po 100. Toto rozpětí je rozdělené na různé stupně použitelnosti, které jsou označeny velkým písmenem od F (naprosto nevyhovující) po A+ (naprosto vyhovující).

		Strongly disagree						Strongly agree
1. Rád bych systém používal opakovaně.	1. I think that I would like to use this ballot frequently.							
2. Systém je zbytečně složitý.	2. I found the ballot unnecessarily complex.							
3. Systém se snadno používá.	3. I thought the ballot was easy to use.							
4. Potřeboval bych pomoc člověka z technické podpory, abych mohl systém používat.	4. I think that I would need the support of a poll official to be able to use this system.							
5. Různé funkce systém jsou do něj dobře začleněny.	5. I found the various parts of this ballot were well integrated.							
6. Systém je příliš nekonzistentní.	6. I thought there was too much inconsistency in this ballot.							
7. Řekl bych, že většina lidí se se systémem naučí pracovat rychle.	7. I would imagine that most people would learn to use this ballot very quickly.							
8. Systém je příliš neohrabaný.	8. I found the ballot very awkward to use.							
9. Při práci se systémem se cítím jistě.	9. I felt very confident using the ballot.							
10. Musel jsem se hodně naučit, než jsem se systémem dokázal pracovat.	10. I needed to learn a lot of things before I could get going with this ballot.							

Obrázek 9-1: SUS – náhled dotazníku dle [153]

## 9.6 Stanovení velikosti výzkumného souboru

Před zahájením experimentu bylo nezbytné provést výpočet velikosti vzorku s cílem zajistit dostatečnou statistickou sílu a spolehlivost výsledků. Velikost vzorku je klíčovým faktorem při plánování experimentů, protože ovlivňuje přesnost odhadu a schopnost odhalit skutečné rozdíly mezi skupinami nebo jevy. Cílem výpočtu velikosti vzorku je zajistit, aby vzorek byl dostatečně reprezentativní a aby bylo možné dosáhnout statisticky významných výsledků.

Pro výpočet velikosti vzorku byl použit specifický vzorec odpovídající zamýšlenému statistickému testu a cílům experimentu. Vzorec byl získán z odborné literatury a reflektoval požadovanou hladinu významnosti, očekávanou velikost efektu a sílu testu. Tyto informace byly získány z rešerše podobných výzkumů a pilotní studie a sloužily jako výchozí hodnoty pro výpočet velikosti vzorku.

Výsledkem výpočtu velikosti vzorku byla doporučená početní velikost vzorku, která by zajistila dostatečnou sílu testu a přesnost výsledků. Tato doporučená velikost vzorku byla následně implementována při sběru dat a zajišťovala dostatečný počet účastníků, aby byly výsledky statisticky vypovídající.

Výpočet velikosti vzorku před zahájením experimentu je důležitým krokem, který pomáhá zajistit správné plánování a provedení experimentu. Správně dimenzovaný vzorek poskytuje spolehlivý základ pro statistické testy a výsledky, které jsou relevantní a interpretativní v kontextu zkoumaného jevu či hypotézy.

K určení velikosti skupiny byl využit následující vztah: [154]

$$N = Z_{\alpha/2}^2 s^2 / d^2$$

Kde

N ... velikost vzorku

s ... směrodatná odchylka určená z předchozích studií, pilotní studie a rešerše literatury

d ... přesnost odhadu

$Z_{\alpha/2}$  ... 1,96 pro  $\alpha$  0,05

S použitím výsledků předchozího výzkumu a pilotní studie byla s pomocí tohoto výpočtu stanovena minimální velikost výzkumného souboru jako 16.

Tohoto experimentu se účastnilo celkem 40 probandů, respektive dvě skupiny po 20. Velikost výzkumného souboru tak byla dostatečně velká pro testování nebo zamítání hypotéz.

## 9.7 Testování hypotéz

Při testování hypotéz mohou nastat čtyři možnosti, které popisuje následující Obrázek 9-2:

		Závěr testu	
		$H_0$ platí	$H_0$ neplatí
Skutečnost	$H_0$ platí	správný	chyba I.druhu
	$H_0$ neplatí	chyba II.druhu	správný

Obrázek 9-2: Testování hypotéz [155]

Existují tedy dvě možnosti chyby:

- chyba I. druhu – nulová hypotéza platí, ale zamítne se;
- chyba II. druhu – nulová hypotéza neplatí, ale přijme se

Pravděpodobnost chyby I. druhu je podmíněná pravděpodobnost zamítnutí nulové hypotézy za předpokladu, že platí. Označuje se  $p$ . Pravděpodobnost chyby II. druhu je podmíněná pravděpodobnost nezamítnutí nulové hypotézy za předpokladu, že neplatí. Označuje se  $p_0$ .

Pro tyto pravděpodobnosti tedy platí:

$$P(\text{chyba I. druhu} \mid H_0 \text{ platí}) = p$$

$$P(\text{chyba II. druhu} \mid H_1 \text{ neplatí}) = p_0$$

Z druhého pohledu je možné tyto podmíněné pravděpodobnosti interpretovat jako spolehlivost testu (tedy pravděpodobnost, že nenastane chyba I. druhu) a síla testu (pravděpodobnost, že nenastane chyba II. druhu).

$$P(\text{nenastane chyba I. druhu} \mid H_0 \text{ platí}) = 1 - p = \text{''spolehlivost testu''}$$

$$P(\text{nenastane chyba II. druhu} \mid H_1 \text{ neplatí}) = 1 - p_0 = \text{''síla testu''}$$

Cílem testování nulové hypotézy je maximalizace spolehlivosti a síly testu, tedy omezení úrovně pravděpodobnosti chyb I. a II. druhu.

## 10 Výsledky a statistické vyhodnocení experimentu

V předchozí kapitole byla představena metodika experimentu, jehož cílem je ověření části kontrolního systému navržené obecné metodiky kontroly kvality svařenců v průmyslových procesech s podporou AR. Probandi byli v průběhu tohoto experimentu pozorováni a výsledky byly zaznamenány pro následné statistické vyhodnocení. Statistické vyhodnocení naměřených dat experimentu je cílem této kapitoly.

Během experimentu byl sledován celkový čas dokončení kontroly sady s podporou AR a druhé sady s využitím konvenčního popsání přístupu. U probandů byla vedle času dokončení úkolu sledována také míra chybovosti. Dále byla vyhodnocována míra mentální zátěže vnímané probandy a hodnocení použitelnosti navrženého AR řešení. Podrobněji byly vlastnosti sbíraných dat popsány v kapitole 8.5.

Následující Obrázek 10-1 zobrazuje ukázkou souboru dat získaných z experimentu. Uživatel je zde identifikován pomocí ID, zařazen do skupiny S1 (pracovníci se zkušenostmi s kontrolou svařenců) nebo S2 (probandi bez zkušeností s kontrolou svařenců) podle míry zkušeností, dále je zahrnuta informace o jeho pohlaví a věku. Ve sloupci 5 až 7 jsou obsaženy celkové časy dokončení kontroly sady s podporou navrženého AR přístupu a s podporou popsání konvenčního přístupu. Konvenční přístup je představen ze dvou úhlů pohledu, a sice jako čistý čas provedení pouze samotné kontroly dílu a čas celý zahrnující navíc také čas nutný pro práci a manipulaci s papírovou dokumentací. Zkratka TCT reprezentuje „Task Completion Time“. Čas dokončení úkolu je udáván v sekundách. V posledních dvou sloupcích je zobrazen celkový počet chyb provedených při kontrole sady s podporou AR přístupu a s podporou konvenčního přístupu. Celý soubor dat obsahuje Příloha 1.

ID	zkušenosti	pohlaví	věk	TCT AR (s)	TCT PAP čistý (s)	TCT PAP celý (s)	chyby AR	chyby PAP
1	S1	m	39	876	1185	1351	0	0
2	S1	m	35	922	1286	1492	0	0
3	S1	m	39	961	1304	1493	0	0
4	S1	ž	36	972	1351	1517	0	1
5	S1	ž	52	1018	1237	1422	1	2
6	S1	m	30	945	1222	1410	0	0
7	S1	m	34	920	1224	1416	0	0
8	S1	m	22	968	1238	1413	1	1
9	S1	ž	51	862	1153	1324	0	0
10	S1	m	29	884	1251	1456	0	0

Obrázek 10-1: Ukázkou TCT a míry chybovosti v experimentu [zdroj autor]

Obrázek 10-2 zobrazuje ukázkou dat získaných z hodnocení NASA TLX dotazníků. Pro každého probanda je k dispozici 6 hodnot pro AR přístup a 6 hodnot pro tradiční přístup. Zároveň je z těchto 6 hodnot vypočtena celková hodnota vnímané mentální zátěže. Kompletní sadu dat zobrazuje Příloha 2. V příloze 3 jsou poté zobrazena všechna data z výsledků SUS.

#### AR PŘÍSTUP

ID	zkušenosti	Mentální zátěž	Fyzická zátěž	Časová zátěž	Výkon	Úsilí	Frustrace	NASA TLX AR TOT
1	S1	5	10	10	5	5	5	40
2	S1	15	15	5	5	5	5	50
3	S1	5	15	10	10	5	5	50
4	S1	15	20	10	10	10	10	75
5	S1	20	5	15	10	15	15	80
6	S1	10	5	5	5	5	5	35
7	S1	5	5	10	5	5	5	35
8	S1	10	5	15	10	10	10	60
9	S1	5	5	5	5	5	5	30
10	S1	15	5	10	5	5	5	45

Obrázek 10-2: Ukázka naměřené mentální zátěže z experimentu [zdroj autor]

## 10.1 Celkový čas dokončení kontroly

V této části textu jsou statisticky vyhodnocena data celkového času dokončení kontrolního úkolu probandem. V první řadě je pro data ověřen předpoklad normálního rozdělení dat s pomocí Shapiro-Wilkova testu. Na základě tohoto výsledku je provedena následná analýza variability. Pro provedení této analýzy byla zvolena analýza variance dvoucestná ANOVA. Jedná se o statistickou metodu používanou k porovnání vlivu dvou nebo více faktorů na závislou proměnnou. Nezávislé proměnné jsou v tomto případě míra zkušeností a způsob podpory při kontrole. Závislá proměnná je celkový čas dokončení úkolu. Po analýze ANOVA byl proveden Tukeyho post hoc test a analýza residuí.

### 10.1.1 Testování normálního rozdělení dat – TCT

V této studii byla provedena analýza normálního rozdělení dat pomocí Shapiro-Wilkova testu. Tento test patří mezi nejpoužívanější testy normality dat a slouží k ověření, zda data pocházejí z normálního rozdělení. Jeho výhodou je, že je citlivá i na menší vzorky dat.

Shapiro-Wilkův test zkoumá následující nulovou a alternativní hypotézu:

H0: Data mají normální rozdělení.

H1: Data nemají normální rozdělení.

Shapiro-Wilkův test využívá statistiky W, která je vypočtena na základě pozorovaných dat, a porovnává se s kritickou hodnotou. Výsledkem testu je  $p$ -hodnota, která udává pravděpodobnost, že jsou data normálně rozdělena. Samotný výpočet Shapiro-Wilkova testu je založen na kovarianční matici mezi pořadovými statistikami hodnot dat a koeficientech regrese. Následně porovnává hodnoty statistiky W s kritickými hodnotami z tabulek, které jsou závislé na počtu pozorování a zvolené signifikanci. Pokud je hodnota W blízka 1, naznačuje to, že data jsou blízko normálního rozdělení a nulová hodnota není zamítnuta. Naopak, pokud

je hodnota  $W$  daleko od 1 naznačuje to odchylku od normálního rozdělení a nulová hypotéza je zamítnuta. Pokud je  $p$  – hodnota větší než zvolená hladina významnosti, znamená to, že není dostatek důkazů k zamítnutí nulové hypotézy a předpokládá se normální rozdělení dat. V opačném případě, kdy je hodnota  $p$  nižší než zvolená hladina významnosti, je možné zamítnout nulovou hypotézu a potvrdit hypotézu alternativní, tedy předpoklad, že data nemají normální rozdělení. Zvolená hladina významnosti pro tuto studii je  $\alpha=0,05$ .

Vedle statistického výpočtu pomocí Shapiro-Wilkova testu byla normalita rozdělení dat ověřena také graficky s pomocí křivky normálního rozdělení a Q-Q plotu.

Křivka normálního rozdělení poskytuje vizuální interpretaci normálního rozdělení naměřených dat z experimentu. Tato křivka je vytvořena na základě odhadů průměru a rozptylu ze samotných naměřených dat. Nepředstavuje tak ideální křivku normálního rozdělení, ale aproximaci normálního rozdělení pro konkrétní naměřené hodnoty. Čím více se tvarově blíží ideálnímu tvaru Gaussovy křivky, tím větší je podobnost s ideálním normálním rozdělením.

Q-Q graf, neboli Quantile-Quantile plot, je grafická metoda, který slouží k porovnávání kvantilů naměřených dat s kvantily z ideálního normálního rozdělení. Na ose  $x$  je umístěno teoretické ideální rozdělení, zatímco na ose  $y$  jsou umístěny odpovídající kvantily naměřených dat. Díky této podobě grafu je možné vizuálně porovnávat relativní umístění kvantilů naměřených dat vzhledem k očekávaným kvantilům ideálního rozdělení a poskytuje tak grafickou informaci o tom, jak dobře se naměřená data přibližují k očekávanému rozdělení. Pokud jsou body na grafu přibližně umístěny na přímce, naznačuje to, že data mají podobné kvantily jako ideální rozdělení. Čím více jsou body rozmístěné okolo přímky, naznačuje to odchylky od ideálního rozdělení.

Kombinace uvedených statistických metod, tedy výpočtového Shapiro-Wilkova testu, a grafické interpretace dat pomocí křivky normálního rozdělení a Q-Q grafu poskytuje komplexní přístup k posuzování normality rozdělení dat. Tímto způsobem je možné získat komplexní a důkladnou představu o tom, zda jsou data normálně rozdělena nebo se od ideálního normálního rozdělení odchylují.

V následujícím textu je uveden přehled výsledků testů ověření normálního rozdělení naměřených dat z experimentu. Rozdělení dat je testováno nejprve pouze z pohledu použitého přístupu pro podporu uživatele při kontrole svařence, a následně z pohledu obou sledovaných faktorů, tedy použitého přístupu a zároveň míry zkušeností uživatelů. V závislosti na úrovni zkušeností uživatelů byli probandi rozděleni do dvou skupin, které byly označeny S1 a S2. Skupina S1 zahrnuje probandy, kteří mají zkušenosti s kontrolou svařenců a pravidelným čtením svařovací výkresové dokumentace. Skupinu S2 tvoří probandi, kteří nemají zkušenosti s kontrolou svařenců. V prvním kroku jsou tedy posouzena naměřená data celkového času dokončení úkolu pro všech 40 probandů nejprve s podporou AR přístupu a následně v případě tradiční tištěné dokumentace. Následují testy celkem 4 datových sad zahrnující vždy náměry 20 probandů. Konkrétně tedy tyto testy zkoumali výsledky času dokončení úkolu skupiny S1 s podporou AR, skupiny S2 s podporou AR, skupiny S1 s podporou papírových podkladů a S2 s podporou papírových podkladů.

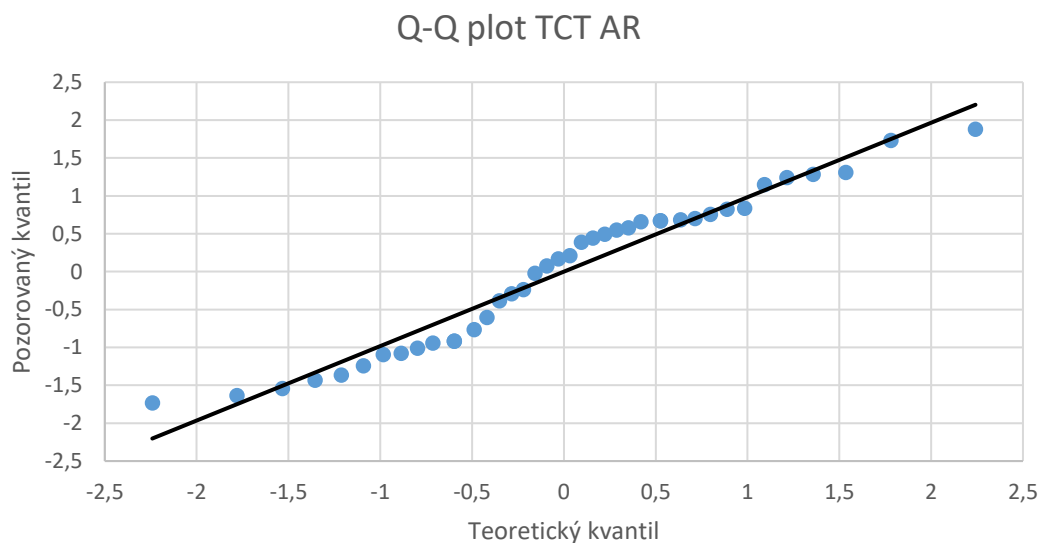
Tímto způsobem byl získán komplexní přehled o normálním rozložení naměřených dat z různých pohledů, což umožňuje následně důkladně analyzovat tato naměřená data a interpretovat výsledky experimentu.

### TCT s podporou AR

V této části textu jsou shrnuty testy normálního rozdělení celkového času dokončení úkolu všech uživatelů bez ohledu na jejich zkušenosti s kontrolou svařenců s podporou navrženého AR přístupu.

Pro tuto sadu dat byla vypočtena hodnota  $W = 0,944$ . Tato hodnota byla porovnána s kritickou hodnotu  $W_{krit} = 0,940$ , která odpovídá velikosti vzorku  $n = 40$  a zvolené hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Platí tedy vztah, že  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Není proto dostatek důkazů pro zamítnutí nulové hypotézy, která potvrzuje, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.

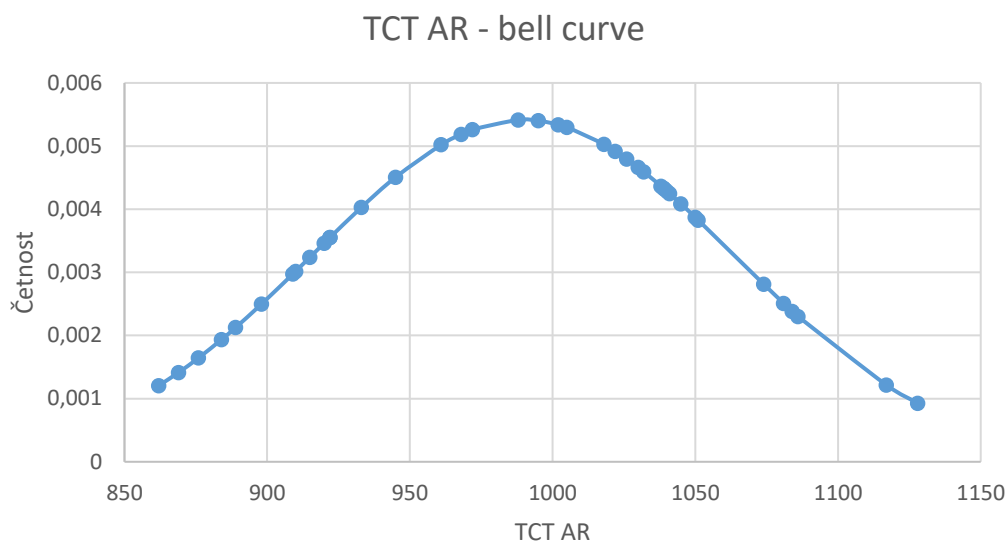
Následující Obrázek 10-3 popisuje Q-Q plot porovnávající celkový čas dokončení úkolu všech probandů s podporou AR přístupu. Porovnává kvantily naměřených dat s kvantily z ideálního normálního rozdělení. Na ose x je umístěno teoretické ideální rozdělení, zatímco na ose y jsou umístěny odpovídající pozorované kvantily naměřených dat. Z grafu je patrné, že body na grafu jsou rozmístěny relativně blízko přímky. Tento jev naznačuje, že se naměřená data blíží normálnímu rozdělení. Čím blíže jsou body k přímce, tím více se jejich kvantily blíží kvantilům ideálního rozdělení.



Obrázek 10-3: Q-Q plot TCT AR [zdroj autor]

Obrázek 10-4 zobrazuje graf s křivkou normálního rozdělení, anglicky nazývanou jako bell curve. Křivka normálního rozdělení zobrazuje pravděpodobnostní hustotu rozdělení dat. Na ose x je umístěna hodnota celkového času dokončení úkolu, zatímco na ose y je umístěna pravděpodobnost odpovídající této hodnotě. Tato křivka umožňuje vizuálně posoudit, jak jsou data rozložena kolem střední hodnoty a jak se šíří kolem této hodnoty. Z grafu je patrné, že tvar křivky odpovídá přibližně tvaru zvonu, který je typický pro Gaussovo rozdělení. Tento jev naznačuje, že rozložení dat má podobnost s ideálním normálním rozdělením. Čím více se tvar křivky podobá zvonu, tím více se data blíží normálnímu rozdělení.

Na základě všech představených testů je možné konstatovat, že naměřená data celkového času dokončení úkolu s podporou AR přístupu potvrzují předpoklad normálního rozdělení.



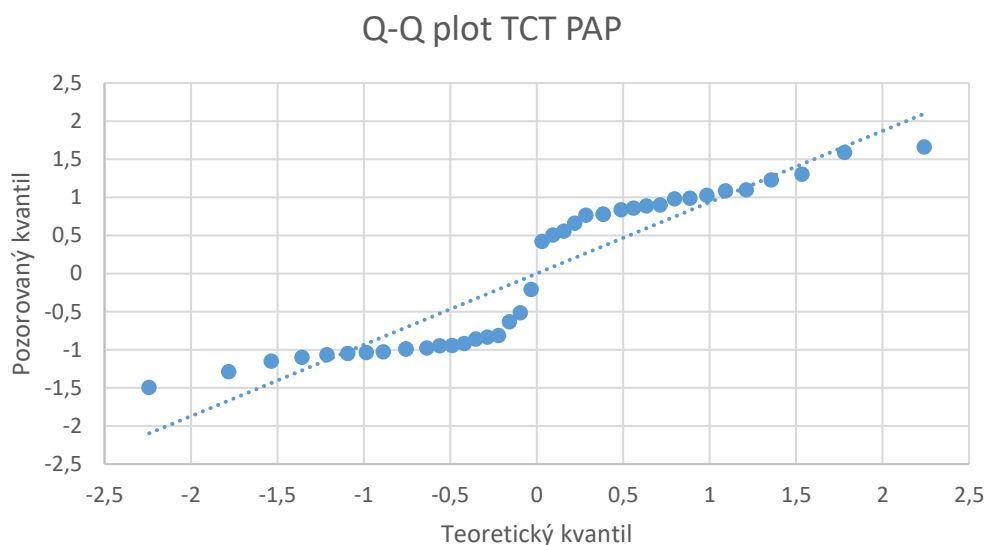
Obrázek 10-4: TCT AR – bell curve [zdroj autor]

### TCT s podporou papírových podkladů

Tato kapitola je věnována testům normality pro celkový čas dokončení úkolu všemi probandy s podporou tradičního přístupu založeného na papírových podkladech.

Vypočtená hodnota pro tato data byla  $W = 0,852$ . Tato hodnota byla porovnána s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,940$ , která odpovídá velikosti vzorku  $n = 40$  a zvolené hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . V tomto případě tedy platí vztah, že  $W < W_{krit}$  a  $p < 0,05$ . Nulová hypotéza je proto zamítnuta a je přijata hypotéza alternativní, která tvrdí, že naměřená data na zvolené hladině významnosti *nemají* normální rozdělení.

Větší odchylka dat od ideálního normálního rozdělení je patrná také z následujících grafů.



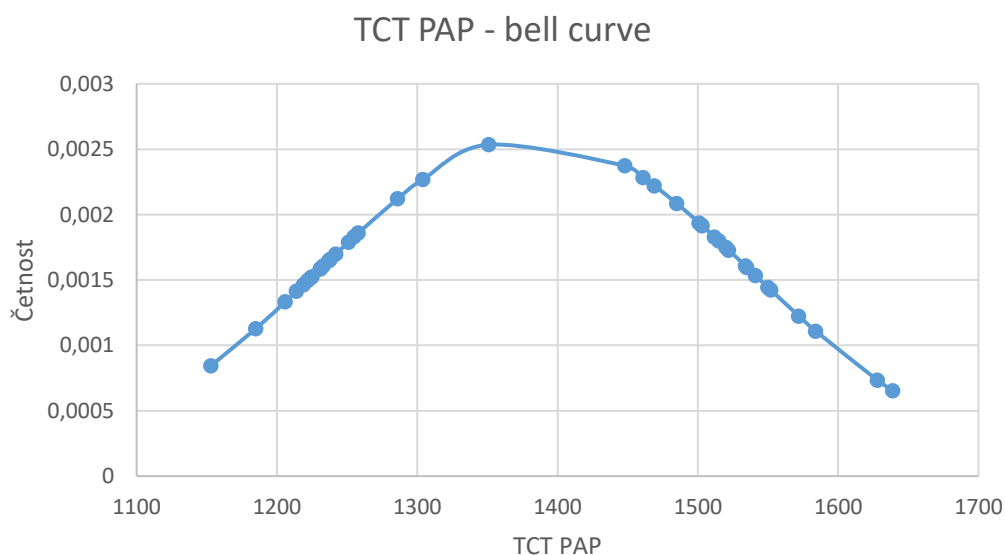
Obrázek 10-5: Q-Q plot TCT PAP [zdroj autor]



Na Q-Q grafu (Obrázek 10-5) jsou body rozptýlené dále od ideální přímky, což naznačuje odchylku od normálního rozdělení. Tento graf tedy ukazuje, že tato data se odchylojí od ideálního normálního rozdělení.

Tvar křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-6) vykazuje také mírně odlišný tvar od ideálního tvaru zvonu a naznačuje tak, že naměřená data se odchylojí od ideálního normálního rozdělení.

Tento výsledek je důležitý pro další volbu statistických metod, neboť normalita rozdělení dat je často předpokladem pro použití parametrických statistických testů. Zamítnutí nulové hypotézy naznačuje, že pro tento přístup k sadě naměřených dat není vhodné provádět testy, které předpokládají normální rozdělení dat. Alternativou jsou neparametrické testy, které nevyžadují splnění předpokladu normality dat.



Obrázek 10-6: TCT PAP – bell curve [zdroj autor]

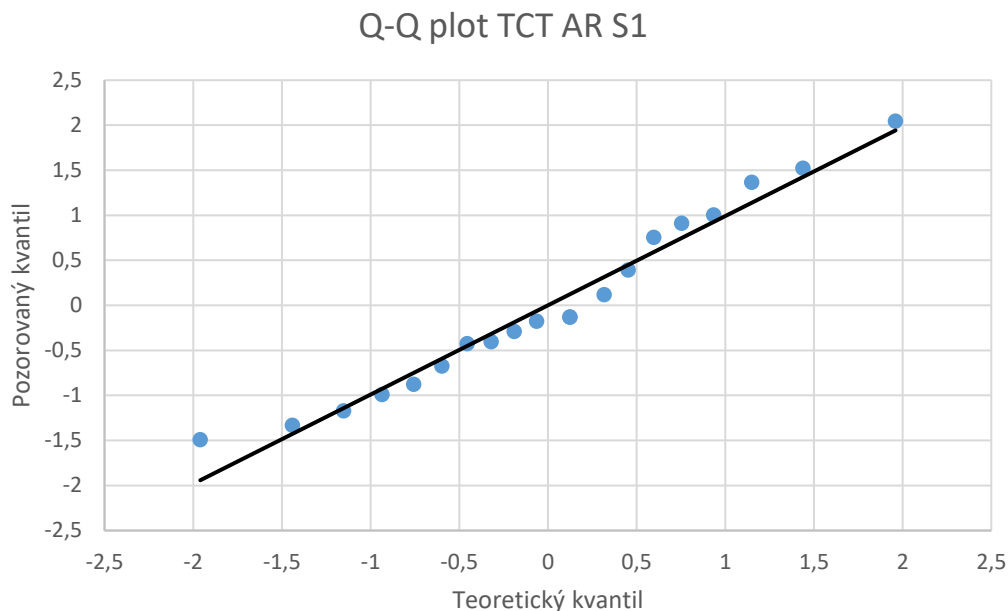
### TCT AR pro S1

Následující část textu popisuje data z pohledu obou sledovaných faktorů, to znamená z hlediska použitého přístupu k podpoře probanda při kontrole a zároveň z hlediska úrovně zkušeností dané skupiny probandů. Tato kapitola se věnuje naměřeným datům celkového času provedení úkolu kontroly svařenců s podporou navrženého AR přístupu pro skupinu S1, tedy skupinu zkušených inspektorů.

Pro tato data byla vypočtena hodnota  $W = 0,962$ . Tato hodnota  $W$  byla porovnána s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$ , která odpovídá velikosti vzorku  $n = 20$  a zvolené hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Platí tedy vztah, že  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Není proto dostatek důkazů pro zamítnutí nulové hypotézy, která potvrzuje, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.

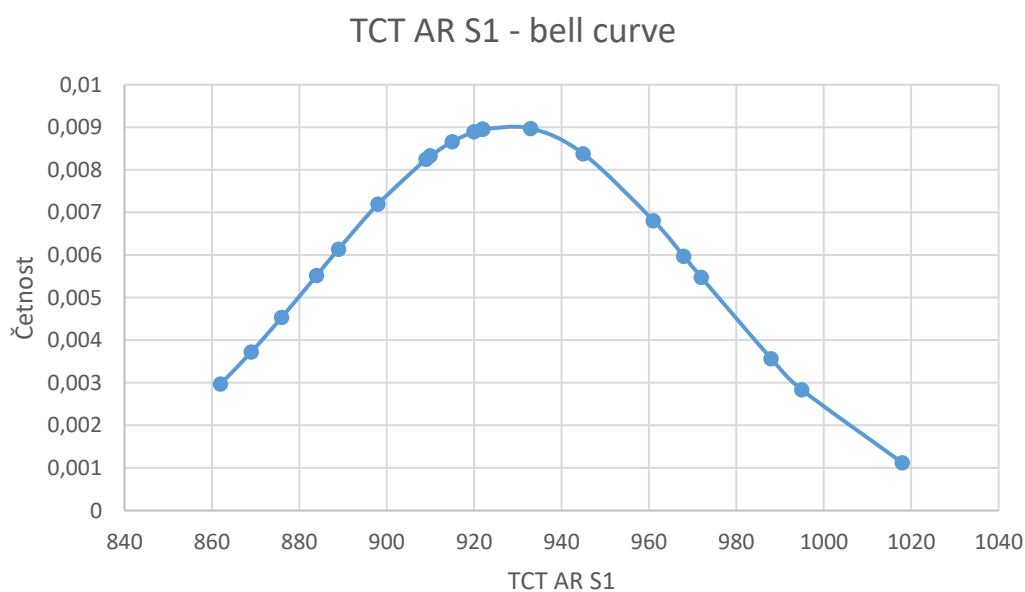
Normální rozdělení dat naznačují také oba následující grafy.

Q-Q plot celkového času dokončení kontroly s podporou AR přístupu pro skupinu zkušených probandů S1 (Obrázek 10-7) zobrazuje body, které se pohybují v blízkosti přímky ideálního normálního rozdělení.



Obrázek 10-7: Q-Q plot TCT AR S1 [zdroj autor]

Podobně také následující křivka normálního rozdělení (Obrázek 10-8) pro naměřená data vykazuje tvar podobný Gaussově křivce.



Obrázek 10-8: TCT AR S1 – bell curve [zdroj autor]

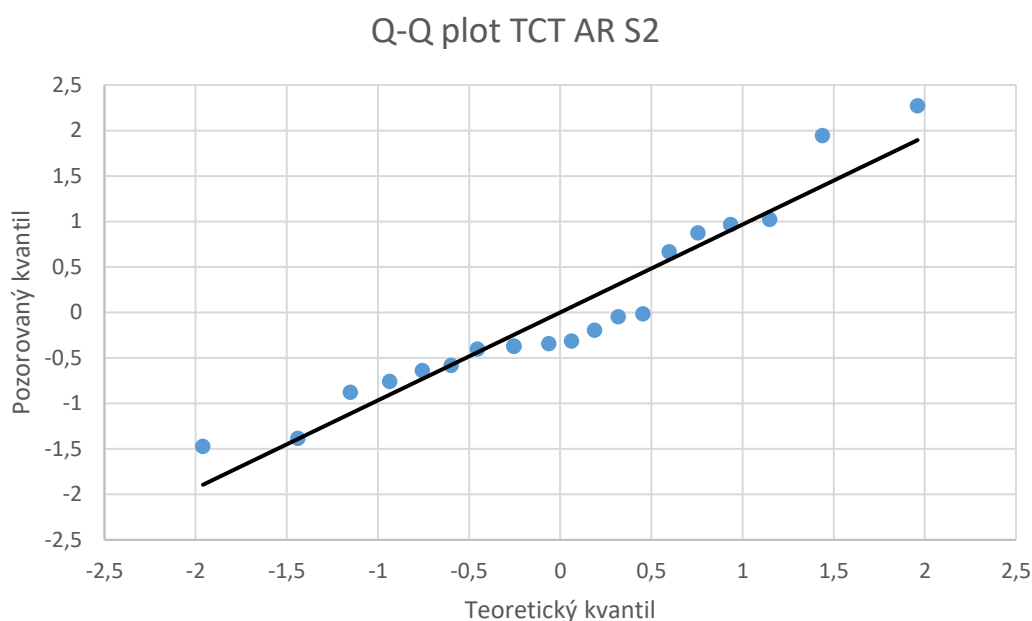
Je proto možné konstatovat, že pro tato naměřená data bylo na zvolené hladině významnosti 0,05 potvrzeno normální rozdělení dat.

### TCT AR pro S2

Stejným způsobem byla normalita dat ověřena s podporou navrženého AR přístupu pro skupinu nezkušených probandů označenou jako S2.

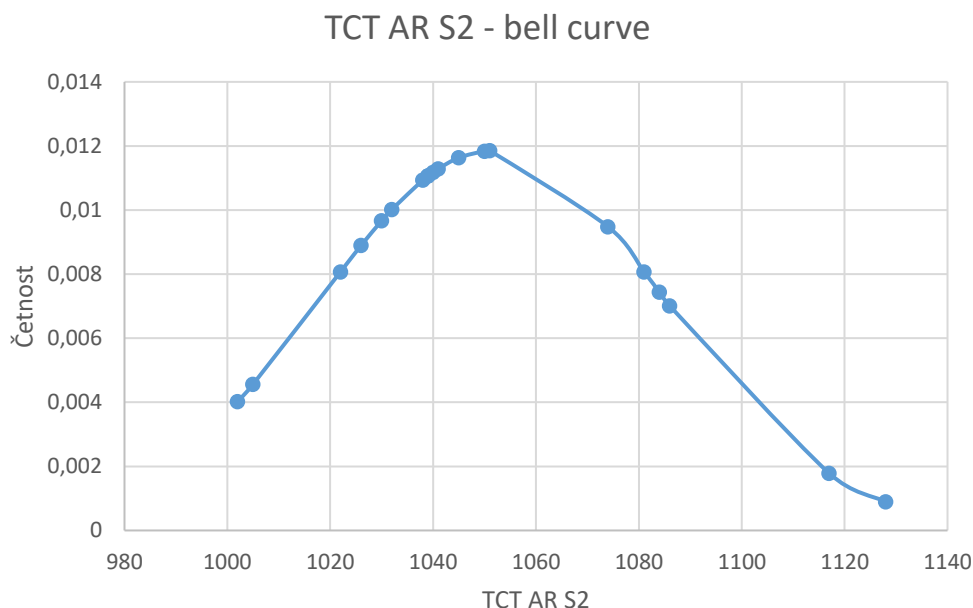
Pro tuto skupinu byla získána hodnota  $W = 0,920$ . V porovnání s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$  pro velikost  $n = 20$  a zvolenou hladinu významnosti  $\alpha=0,05$  tedy platí vztah  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Nulová hypotéza proto není zamítnuta a test potvrdil, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.

Graficky je tento výsledek potvrzen také následujícími grafy (Obrázek 10-9 a Obrázek 10-10). Q-Q plot zobrazuje výsledky blízko oblasti ideální křivky.



Obrázek 10-9: Q-Q plot TCT AR S2 [zdroj autor]

Křivka normálního rozdělení vytvořená z naměřených dat rovněž naznačuje tvar podobný ideálnímu zvonovitému tvaru Gaussovy křivky.



Obrázek 10-10: TCT AR S2 – bell curve [zdroj autor]

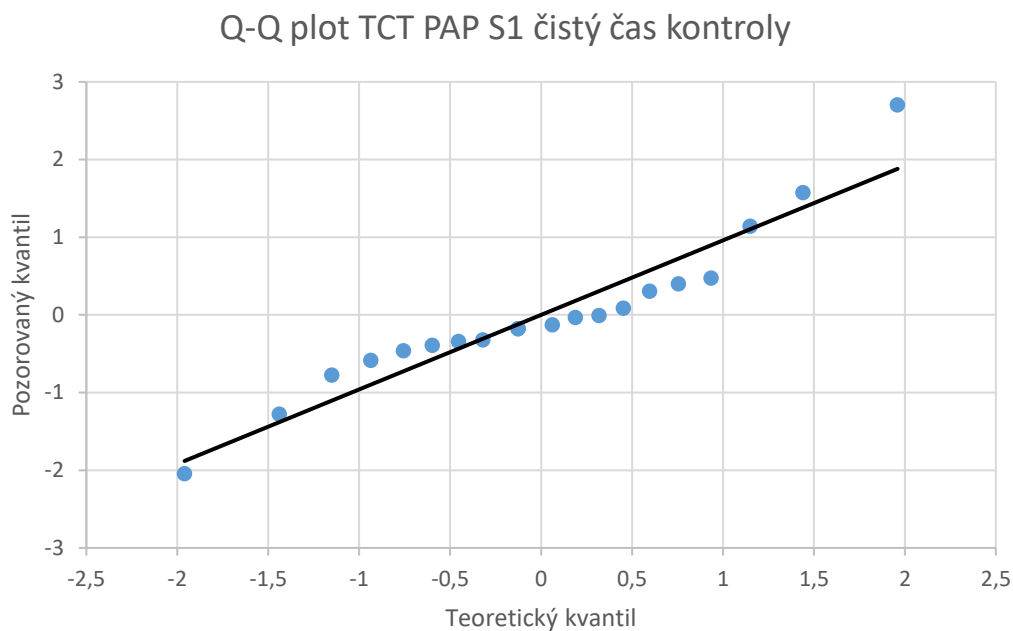
Na hladině významnosti 0,05 je tak možné potvrdit, že data z provedeného experimentu pro celkový čas dokončení kontroly s AR podporou pro skupinu S2 mají normální rozdělení.

### TCT PAP pro S1 – čistý čas kontroly

V následující části textu jsou popsány výsledky naměřených časů dokončení kontroly s podporou tradičních přístupů založených na papírových podkladech. K těmto datům je možné přistupovat ze dvou pohledů, a sice z pohledu celkového času provedení kontroly včetně přípravy výkresové dokumentace a z pohledu čistého času samotné kontroly. Normalita dat byla ověřena pro obě varianty těchto dat. Nicméně hlavní statistická analýza byla následně provedena pro čistý čas kontroly bez ztrátového času manipulace s podklady ke kontrole.

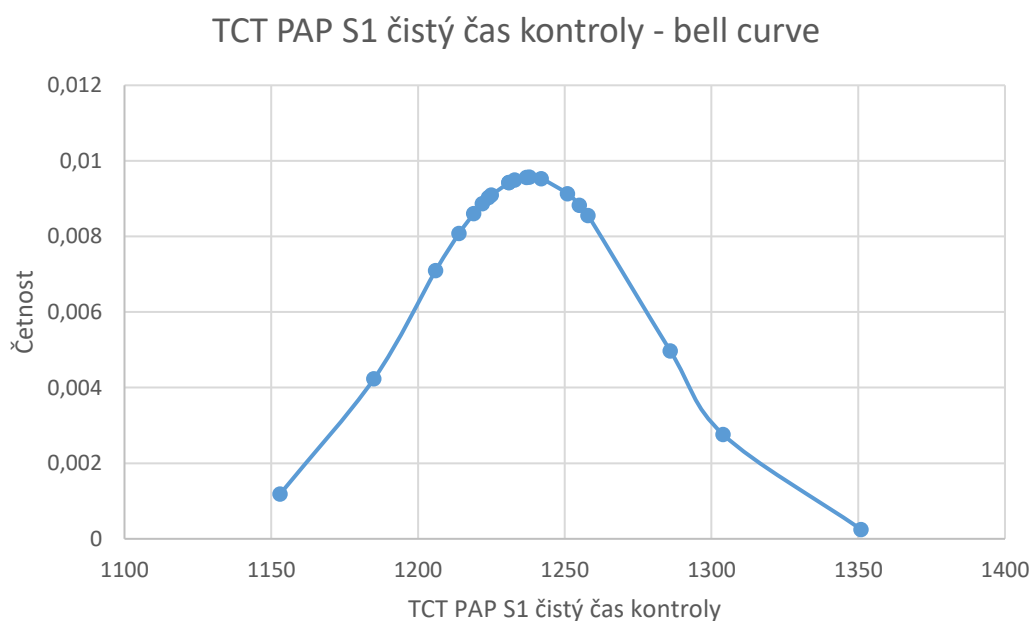
Tato kapitola je věnována testování normality dat čistého času provedení kontroly u skupiny S1.

Hodnota  $W$  byla pro tato data vypočtena  $W = 0,923$ . Kritická hodnota  $W_{krit} = 0,905$  pro velikost vzorku  $n = 20$  a zvolenou hladinu významnosti  $\alpha=0,05$  je tedy menší,  $W > W_{krit}$ , a hodnota  $p > 0,05$ . Nulová hypotéza není zamítnuta a je možné předpokládat, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.



Obrázek 10-11: Q-Q plot TCT PAP S1 čistý čas kontroly [zdroj autor]

Q-Q plot (Obrázek 10-11), stejně jako křivka normálního rozdělení (Obrázek 10-12) rovněž graficky potvrzují normální rozdělení dat.

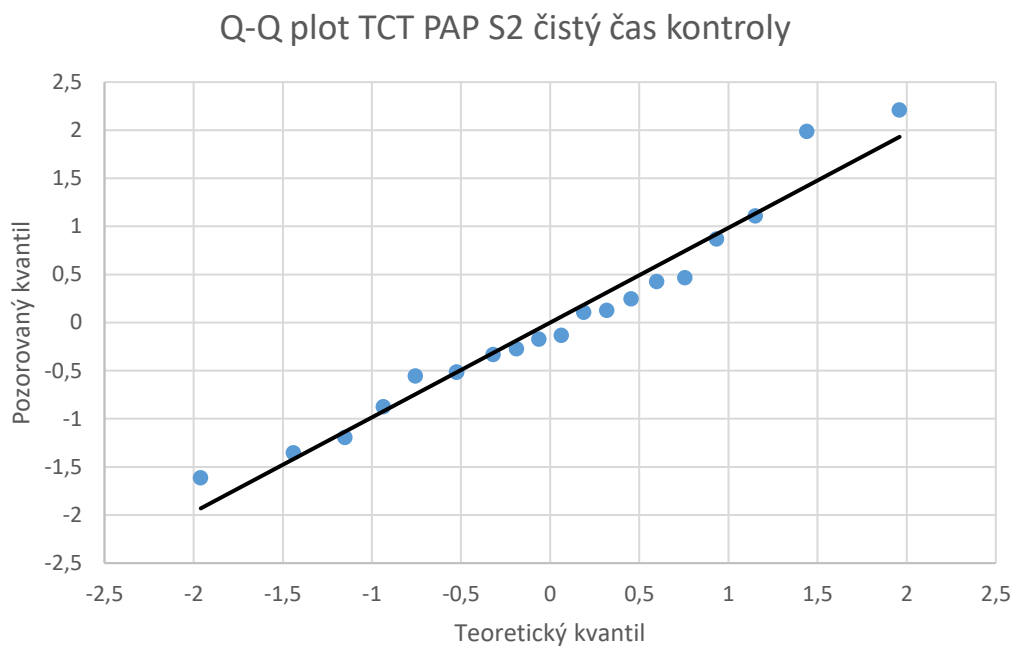


Obrázek 10-12: TCT PAP S1 čistý čas kontroly – bell curve [zdroj autor]

### TCT PAP pro S2 – čistý čas kontroly

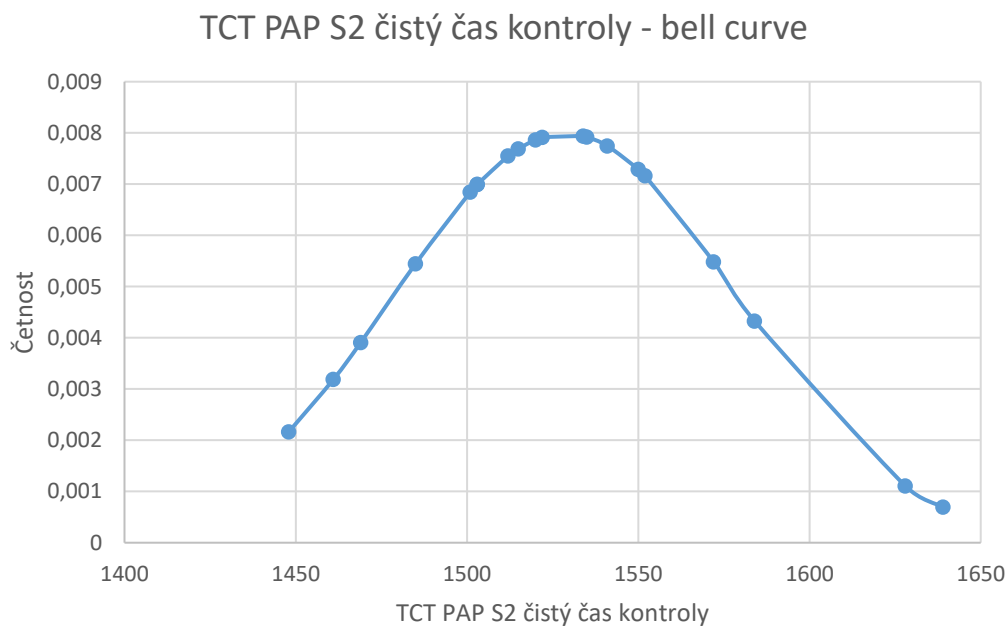
Stejný test pro naměřená data jako v předchozí kapitole byl proveden také pro skupinu S2. Pro čistý čas provedení kontroly s podporou papírových podkladů v případě nezkušených probandů S2 byla hodnota  $W$  vypočtena  $W = 0,956$ . V porovnání s kritickou hodnotou

$W_{krit} = 0,905$  pro velikost vzorku  $n = 20$  a zvolenou hladinu významnosti  $\alpha=0,05$  platí vztah  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Nulová hypotéza tedy platí a je potvrzen předpoklad, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.



Obrázek 10-13: Q-Q plot TCT PAP S2 čistý čas kontroly [zdroj autor]

Normální rozdělení dat je stejně jako v předchozích případech potvrzeno také graficky (Obrázek 10-13 a Obrázek 10-14).



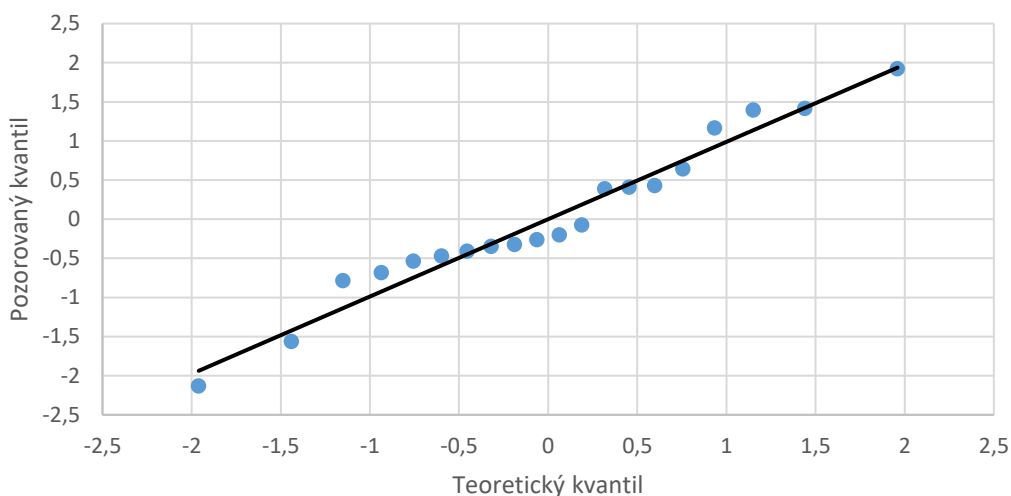
Obrázek 10-14: TCT PAP S2 čistý čas kontroly – bell curve [zdroj autor]

### TCT PAP pro S1 – celý čas kontroly

Pro kompletaci analýzy normálního rozdělení dat byly provedeny testy normality také pro časy provedení kontrolní operace s podporou tradičních metod z pohledu celkového času, který zahrnuje také čas strávený fází manipulace s papírovými podklady před zahájením samotné kontroly. V této části je pozorován čas provedení kontroly u skupiny S1.

Pro data naměřená u této skupiny byla vypočtena hodnota  $W = 0,966$ . V porovnání s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$  pro velikost vzorku  $n = 20$  a zvolenou hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$  platí vztah  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Nulová hypotéza není zamítnuta a je možné předpokládat, že na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  mají tato data normální rozdělení.

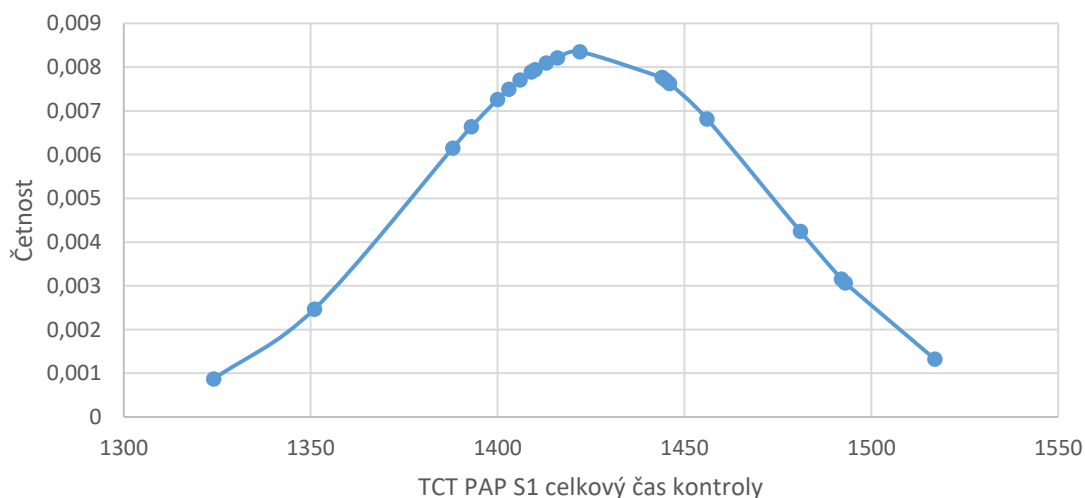
Q-Q plot TCT PAP S1 celkový čas kontroly



Obrázek 10-15: Q-Q plot TCT PAP S1 celkový čas kontroly [zdroj autor]

Graficky je tento výsledek potvrzen také grafy Q-Q plot (Obrázek 10-15) a tvarem křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-16).

TCT PAP S1 celkový čas kontroly - bell curve

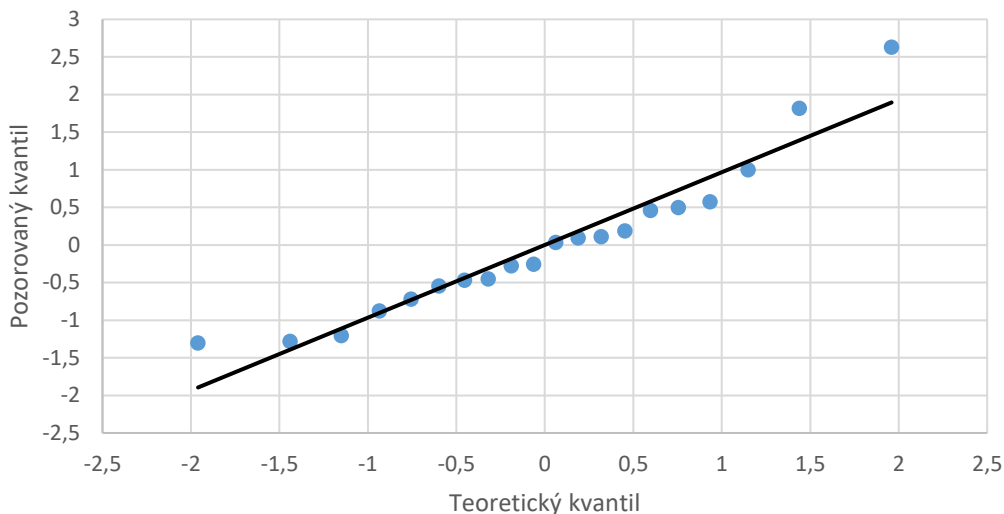


Obrázek 10-16: TCT PAP S1 celkový čas kontroly – bell curve [zdroj autor]

### TCT PAP pro S2 – celý čas kontroly

Pro naměřené časy skupiny S2 byla vypočtena hodnota  $W = 0,924$ . Tato hodnota  $W$  byla porovnána s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$ , která odpovídá velikosti vzorku  $n = 20$  a zvolené hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Platí tedy vztah, že  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Není proto dostatek důkazů pro zamítnutí nulové hypotézy, která potvrzuje, že na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  mají tato data normální rozdělení.

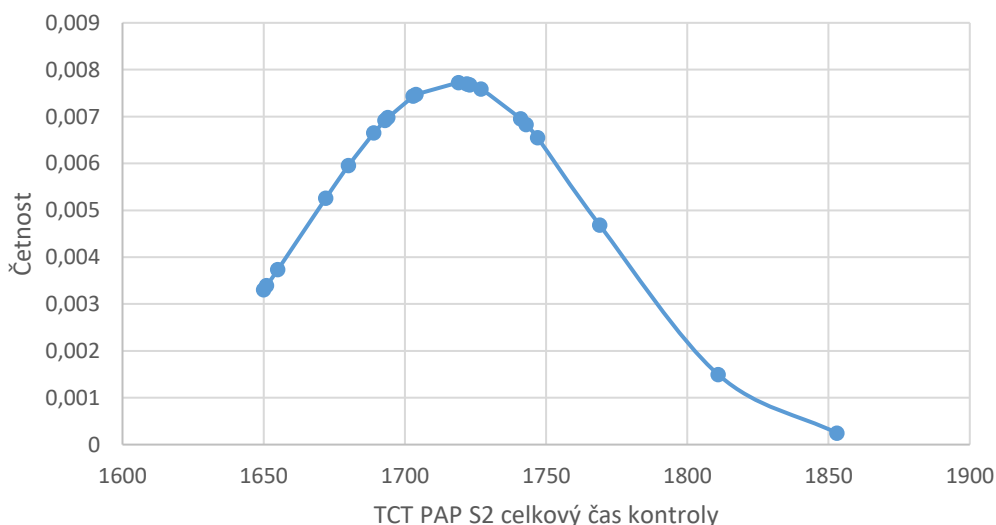
Q-Q plot TCT PAP S2 celkový čas kontroly



Obrázek 10-17: Q-Q plot TCT PAP S2 celkový čas kontroly [zdroj autor]

Výsledky výpočtové statistiky jsou potvrzené taky grafickou interpretací sledovaných dat na uvedených obrázcích (Obrázek 10-17 a Obrázek 10-18).

TCT PAP S2 celkový čas kontroly - bell curve



Obrázek 10-18: TCT PAP S2 celkový čas kontroly – bell curve [zdroj autor]



### Shrnutí výsledků Shapiro-Wilkova testu

Výsledky výpočetního statistického Shapiro-Wilkova testu jsou pro přehlednost shrnuty v následující tabulce (Obrázek 10-19). Testování normality potvrdilo, že pro naměřená data jednotlivých skupin rozdělených v závislosti na faktoru zkušeností a využitém přístupu pro podporu uživatele při kontrole potvrzují všechny 4 sady dat na zvolené hladině významnosti 0,05 normální rozdělení dat. Může pro ně proto být proveden statistický parametrický test, mezi jehož předpoklady patří normální rozdělení testovaných dat.

TCT SHAPIRO-WILK	TCT AR	TCT PAP	TCT AR S1	TCT AR S2	TCT PAP S1 - ČISTÝ	TCT PAP S2 - ČISTÝ	TCT PAP S1 - CELKOVÝ	TCT PAP S2 - CELKOVÝ
<b>W</b>	0,944	0,852	0,962	0,920	0,923	0,956	0,966	0,924
<b>W<sub>krit</sub></b>	0,940	0,940	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905	0,905
<b>P</b>	p>0,05	p<0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

Obrázek 10-19: Shapiro-Wilkův test – TCT [zdroj autor]

#### 10.1.2 Dvoucestná ANOVA – TCT

V dalším kroku statistické analýzy byla provedena dvoucestná analýza rozptylu nazývaná jako ANOVA. Předpoklad normálního rozdělení dat, který byl testován v předchozím textu, patří mezi hlavní předpoklady této analýzy. Díky potvrzení normálního rozdělení pro všechny čtyři sady dat v závislosti na sledovaných dvou faktorech je proto možné pokračovat v analýze času provedení kontrolního procesu s pomocí ANOVA analýzy.

ANOVA (Analysis of Variance) je statistická metoda používaná k porovnání průměrů mezi skupinami. Jejím cílem je zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi průměry skupin, a zároveň identifikovat, která skupina se od ostatních odlišuje. V rámci tohoto experimentu byla analýza zaměřena na čas dokončení úkolu a jeho závislost na dvou faktorech, tedy použitý přístup k podpoře uživatele při kontrole svařence (AR nebo tradiční metody) a zkušenosti uživatelů (skupina S1 a S2). Čas dokončení kontrolního úkolu je v této analýze závislou proměnnou, nezávislé proměnné jsou úroveň zkušeností a zvolený přístup k podpoře uživatele. Díky ANOVA analýze je možné zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl v průměrech času dokončení mezi různými kombinacemi nezávislých proměnných. Tato analýza poskytuje informace o tom, zda se výkonnost uživatele liší v různých scénářích experimentu a jaký je případný vliv daných faktorů na výsledky.

V rámci ANOVA jsou definovány dvě hlavní obecné hypotézy:

H0: Průměry mezi všemi skupinami dat jsou stejné.

H1: Existují statisticky významné rozdíly mezi alespoň jednou dvojicí skupin dat.

Pomocí ANOVA analýzy je možné zjistit, zda rozdíly ve výsledcích měření jsou statisticky významné a nejsou jen náhodné. Mimoto poskytuje ANOVA další informace, jako například průměrné rozdíly mezi skupinami nebo míru variability v rámci skupin.

Výsledkem ANOVA analýzy je hodnota  $F$  a hodnota  $p$ . Pokud je  $p$  – hodnota menší než předem stanovená hladina významnosti, je nulová hypotéza zamítnuta a přijata je alternativní

hypotéza, která tvrdí, že existují statisticky významné rozdíly mezi alespoň jednou dvojicí skupin. Hodnota F-statistiky udává poměr mezi tzv. meziskupinovou a vnitroskupinovou variabilitou. Meziskupinová variabilita představuje rozdíly mezi průměry skupin a je měřena prostřednictvím součtu čtverců odchylek mezi průměry skupin. Vnitroskupinová variabilita se zaměřuje na rozdíly uvnitř skupin a je měřena prostřednictvím součtu čtverců odchylek v rámci skupin. Vyšší hodnota F-statistiky naznačuje větší meziskupinovou variabilitu v porovnání s vnitroskupinovou variabilitou. Pro určení statistické významnosti F-statistiky se využívá F-kritická hodnota, která je stanovena na základě předem určené hladiny významnosti a stupňů volnosti. Pokud vypočtená hodnota F-statistiky překračuje F kritickou hodnotu, nulová hypotéza je zamítnuta a je přijata alternativní hypotéza, která tvrdí, že mezi skupinami existují statisticky významné rozdíly.

Obrázek 10-20 zobrazuje graf s průměrnými hodnotami a standardními chybami pro analýzu ANOVA. Na grafu jsou zobrazeny tři páry sloupců, každý pár představuje jednu skupinu dat. První sloupec v každém páru reprezentuje skupinu S1, zatímco druhý sloupec představuje skupinu S2. Sloupce jsou rozděleny v závislosti na použitém přístupu pro podporu kontrolora, konkrétně tedy pro AR přístup, pro tradiční přístup s papírovými podklady z pohledu čistého kontrolního času a následně z pohledu celkového času, který zahrnuje všechny operace od identifikace přes přípravu podkladů do konce kontroly. Standardní chyba je uvedena v grafu jako měřítko variability průměrů mezi jednotlivými skupinami. Zahrnutí standardní chyby do tohoto grafu umožňuje vizuálně porovnat stabilitu a přesnost průměrů.

Z grafu průměrů je zřejmé, že skupina S1 s použitím AR dosahuje nejnižších průměrných časů dokončení úkolu. Druhý nejnižší průměr vykazuje skupina S2 s podporou AR. U výsledků skupiny S2 je patrná vyšší hodnota standardní chyby, což naznačuje určitou variabilitu výsledků. S podporou tradičních metod založených na papírové dokumentaci vykazují obě skupiny průměrně delší čas dokončení. Rozdíl mezi průměrným časem provedení kontrolního úkolu u skupiny S1 a S2 je v případě tradičních metod s papírovými podklady vyšší než v případě AR.

Při kontrole s pomocí papírových podkladů je uživatel nucen dělit pozornost mezi podklady, kontrolovaný díl a kontrolní a měřicí pomůcky. Toto dělení pozornosti vede k prodloužení času při dokončení kontroly, rozptylování a relativně horší nebo pomalejší orientaci na kontrolovaném kusu. V tomto scénáři jsou na uživatele také kladeny vyšší nároky na měření a znalosti z oblasti metrologie. V tradiční metodě musí uživatel zkontrolovat kompletnost svařence a s pomocí měřících nástrojů doměřit pozice a charakteristiky všech kontrolovaných komponent. Jedná se o tedy o úkol náročný na čas, koncentraci i odbornou kvalifikaci pracovníka. V případě navrženého AR přístupu podpoří rozhraní rozšířené reality uživatele při rychlé základní orientaci na výrobku, porovnáním s ideálním stavem modelu získá uživatel rychlou představu o požadovaném rozmístění podsestav i svarových spojů a ten je tak schopen relativně v krátkém čase dokončit kontrolu dílu, případně nalézt chybu. Díky použitým vizualizacím jsou zároveň na uživatele kladeny nižší nároky na odbornou kvalifikaci a zkušenosti se čtením a interpretací výkresové dokumentace svařenců.

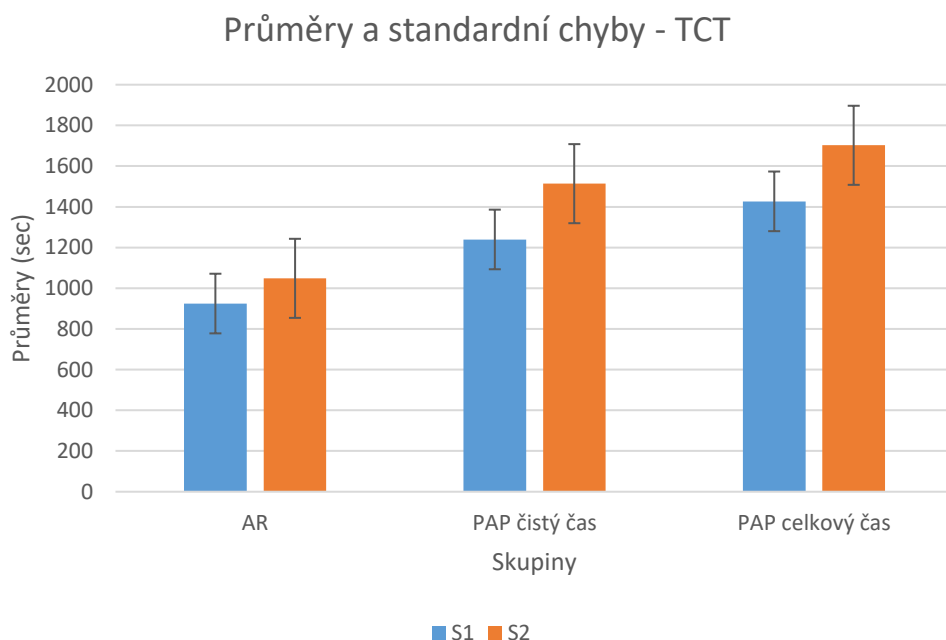
Třetí sada sloupců představuje výsledky průměrných časů dokončení kontrolní operace včetně přípravy výkresové dokumentace. Z tohoto grafu je patrný nárůst průměrného času dokončení úkolu pro obě skupiny. Nicméně vzhledem k tomu, že pro potřeby experimentu byla vytvořena speciální sada kontrolních plánů a experiment zahrnoval celkem 10 typů výrobků, byla orientace v této sadě výkresové dokumentace velmi rychlá a časová ztráta byla

u všech uživatelů na podobné úrovni. Třetí sada sloupců průměrných časů dokončení kontrolního úkolu tak vykazuje konzistentní nárůst bez výraznějších výkyvů mezi skupinami nebo v oblasti variability. Je pravděpodobné, že s rostoucím množstvím typů výrobků v rozsáhlejší nebo dlouhodobějším experimentu by variabilita mezi čistými časy provedení kontroly a celkovým časem zahrnujícím manipulaci s výkresovou dokumentací rostla.

V průběhu provádění kontrolního úkolu během experimentu se u většiny probandů projevovalo postupné zrychlování dílčích časů. Jako důvod uváděli, že při opakované kontrole stejného typu výrobku byli schopni se rychleji orientovat ve výkresech i na samotném dílu. Zároveň však i účastníci s nejrozsáhlejšími zkušenostmi a odbornou kvalifikací uvedli, že s ohledem na komplexnost kontrolovaných dílů, jejich podobnost a celkové množství kontrolovaných typů výrobků nedosáhli během experimentu stavu, kdy by byli schopni zkontrolovat daný díl „po paměti“ bez podkladů. Nikdo z účastníků se tak nedostal na úroveň znalosti dílů, kdy by ho podpůrné přístupy ke kontrole naopak začaly zpomalovat a působit negativně na jeho výkon. Je však pravděpodobné, že při jiném nastavení experimentu, tedy například při jiném trvání dokončení kontrolního úkolu nebo při odlišné variabilitě, může tento faktor učení ovlivňovat průběh a výsledky experimentu jiným způsobem než v této práci.

Tento graf s průměry a standardními chybami poskytuje přehledné vizuální porovnání mezi jednotlivými skupinami a různými přístupy v rámci experimentu. Výsledky naznačují, že použití AR má potenciál zkrátit čas dokončení úkolu ve srovnání s použitím tradičních papírových podkladů.

Tyto výsledky mohou poskytnout důležité poznatky pro další zkoumání efektivity a účinnosti metodiky podpory uživatele s pomocí AR při kontrole svařenců.



Obrázek 10-20: Průměry a standardní chyby – TCT [zdroj autor]

Graf průměrů a standardní chyby (Obrázek 10-20) graficky zobrazil charakter dat naměřených v průběhu experimentu a naznačuje, jaké vztahy a rozdíly mezi jednotlivými

skupinami existují. Pro potvrzení, zda jsou tyto rozdíly statisticky významné a nejedná se o náhodný jev, byla následně provedena analýza rozptylu (ANOVA). Cílem této analýzy je zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami závislé proměnné (v tomto případě čas dokončení kontrolního úkolu) mezi skupinami definovanými nezávislými proměnnými (metoda podpory probanda při kontrole, úroveň zkušeností uživatele).

Naměřená data byla testována metodou dvoucestné ANOVA analýzy, která zkoumá vztahy mezi 4 bloky datových sad, a sice časy dokončení kontrolního úkolu skupiny S1 s podporou AR, skupiny S2 s podporou AR, skupiny S1 s podporou papírových podkladů a skupiny S2 s podporou papírových podkladů. V každém bloku dat bylo celkem 20 naměřených časů. V této analýze jsou brány v úvahu pouze čisté časy provedení kontroly tradiční metodou, tedy časy od začátku samotné kontroly dílu po jeho dokončení, bez zahrnutí časů přípravy výkresové dokumentace. Tato data byla testována na zvolené hladině významnosti  $\alpha=0,05$ .

Následující Obrázek 10-21 shrnuje výsledky dvoucestné ANOVA analýzy. Výsledky dvoucestné ANOVA analýzy prokázaly významný hlavní efekt mezi bloky dat výzkumu a naznačují významné rozdíly mezi skupinami S1 a S2 a také mezi použitím AR přístupu a tradičních přístupů s podporou papírových podkladů. Hodnoty F-testu ukazují statisticky významné rozdíly mezi skupinami S1 a S2 ( $F(1,36) = 468,904$ ,  $p < 0,001$ ). Také mezi přístupy k podpoře uživatele byly pozorovány statisticky významné rozdíly ( $F(1,36) = 1696,035$ ,  $p < 0,001$ ). Zároveň byla pozorována signifikantní interakce mezi faktorem zkušeností a faktorem metody podpory ( $F(1,36) = 76,015$ ,  $p < 0,001$ ).

Na základě vysokých hodnot F-testu v porovnání s kritickou hodnotou F a nízkých hodnot p je možné zamítnout nulovou hypotézu a přijmout alternativní hypotézu, která tvrdí, že rozdíly ve výkonnosti mezi zkušeností uživatelů a metodou podpory jsou statisticky významné. Skupina S1 dosáhla průměrného času dokončení úkolu 927,8 sekund s použitím přístupu AR a 1238,3 v případě použití papírových podkladů. Skupina S2 dosáhla průměrného času 1051,5 s podporou AR přístupu a 1528,7 sekund s papírovými podklady. Tato zjištění naznačují, že použití AR podpory výrazně zkracuje čas dokončení úkolu ve srovnání s tradičním přístupem s tištěnými podklady. Interakce mezi mírou zkušeností a metodou podpory kontrolora naznačuje, že rozdíl v efektivitě AR přístupu oproti tradičnímu přístupu je výraznější u skupiny S2, tedy nezkušených probandů než u skupiny S1, tedy zkušených inspektorů. To naznačuje, že efekt AR podpory na výkon uživatele závisí na míře zkušeností a může mít různý vliv na různé uživatele.

**ANOVA: DVA FAKTORY S OPAKOVÁNÍM**

FAKTOR	TCT AR (s)	TCT PAP čistý (s)	Celkem				
<b>S1</b>							
POČET	20	20	40				
SOUČET	18556	24765	43321				
PRŮMĚR	927,800	1238,250	1083,025				
ROZPTYL	1948,168	1739,039	26508,948				
<b>S2</b>							
POČET	20	20	40				
SOUČET	21030	30574	51604				
PRŮMĚR	1051,500	1528,700	1290,100				
ROZPTYL	1132,789	2495,800	60157,477				
<b>CELKEM</b>							
POČET	40	40					
SOUČET	39586	55339					
PRŮMĚR	989,650	1383,475					
ROZPTYL	5424,490	23694,204					
<b>ANOVA</b>							
ZDROJ VARIABILITY	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit	test signifikance
VÝBĚR	857601,113	1	857601,113	468,904	3,038E-34	3,967	faktor je významný
SLOUPCE	3101962,613	1	3101962,613	1696,035	9,962E-54	3,967	faktor je významný
INTERAKCE	139027,813	1	139027,813	76,015	4,618E-13	3,967	faktor je významný
DOHROMADY	139000,150	76	1828,949				
CELKEM	4237591,688	79					

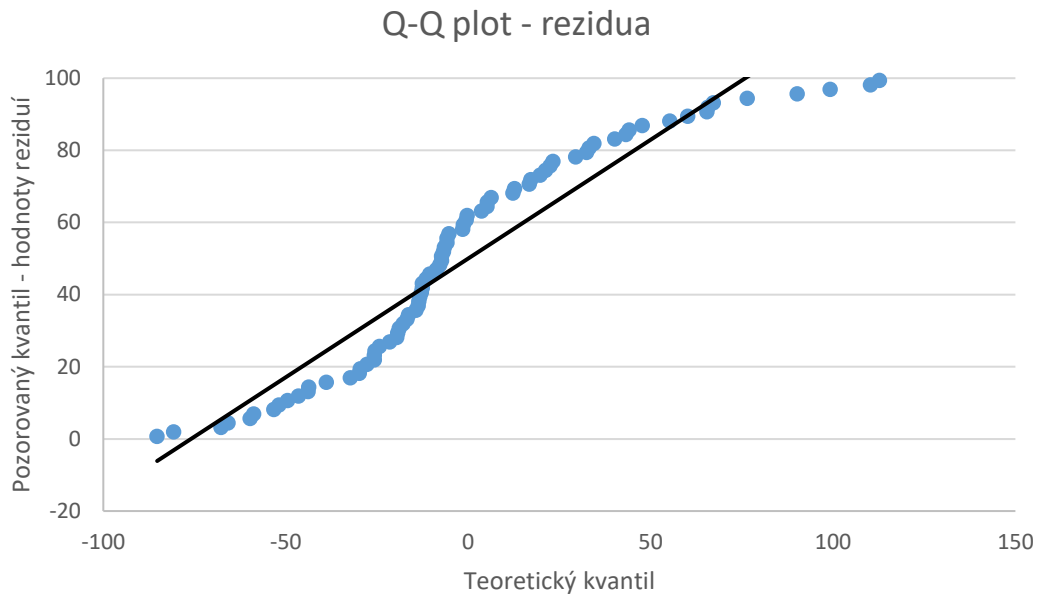
Obrázek 10-21: ANOVA analýza TCT [zdroj autor]

### 10.1.3 Analýza reziduí – TCT

Po provedení dvoucestné analýzy rozptylů ANOVA byla provedena analýza reziduí s cílem posoudit kvalitu modelu a přesnost předpovědi. Analýza reziduí je důležitým nástrojem pro ověření předpokladů regresního modelu a posouzení zbytkové variability. Analýza reziduí byla provedena v několika krocích. Nejprve byly vypočteny reziduální hodnoty, které představují rozdíl mezi pozorovanými hodnotami a předpovídanými hodnotami na základě modelu. Poté byla rezidua analyzována graficky. Analýza reziduí je tedy důležitým krokem po provedení ANOVA analýzy, který poskytuje další informace o přesnosti a validitě modelu.

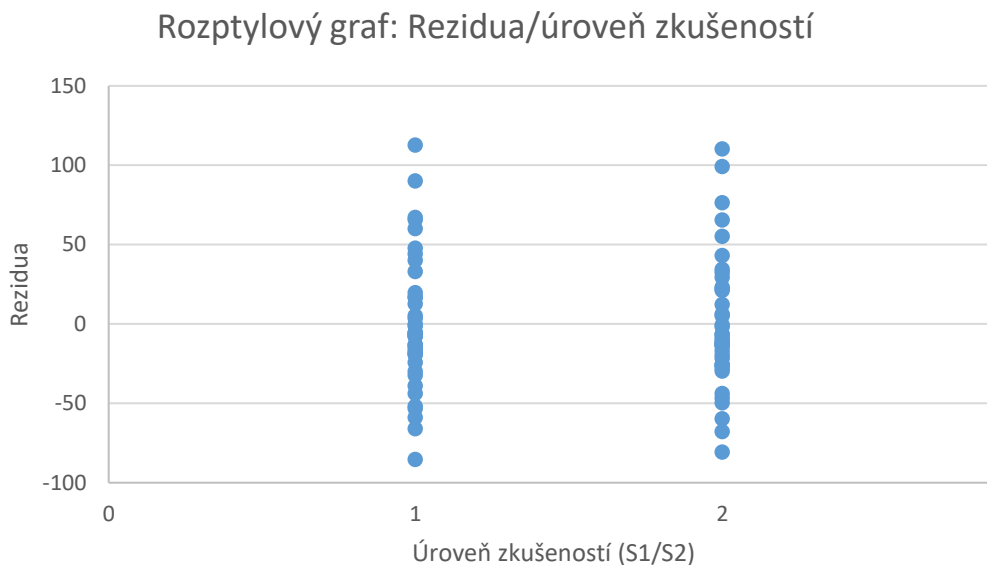
Součástí této analýzy bylo vytvoření Q-Q grafu za účelem ověření normality rozdělení reziduí. Vytvořený Q-Q plot je zobrazený na následujícím obrázku (Obrázek 10-22). Porovnává

pozorované hodnoty reziduí a kvantily teoretického normálního rozdělení. Z grafu je patrné, že pozorované hodnoty reziduí se blíží ideální hodnotě normálního rozdělení a je možné usuzovat, že předpoklad normálního rozdělení reziduí je pravděpodobně splněn.



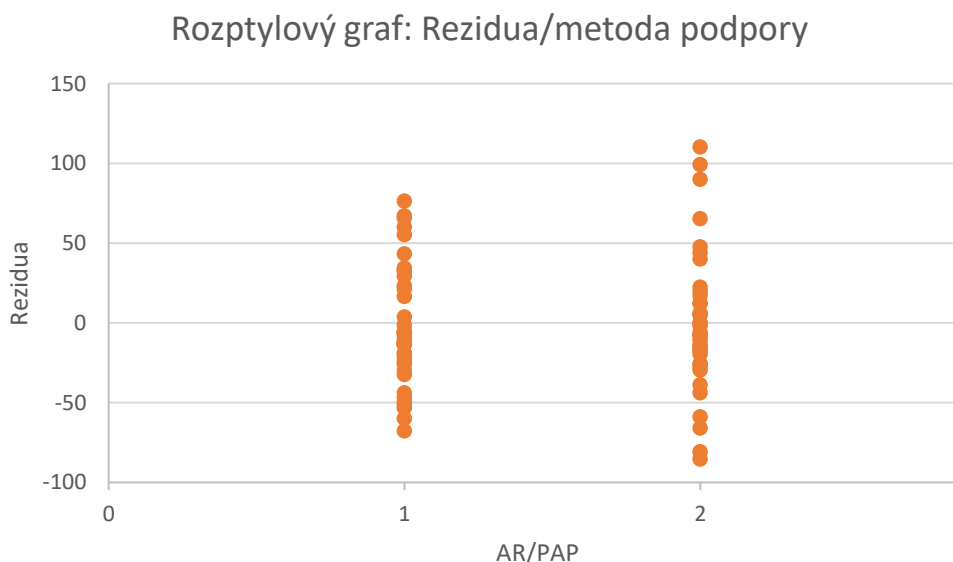
Obrázek 10-22: Q-Q plot rezidua [zdroj autor]

V dalším kroku analýzy reziduí byl vytvořen rozptylový graf (Obrázek 10-23), který porovnává míru zkušeností s hodnotami reziduí. Konkrétně se jedná pouze o dvě skupiny, kdy porovnává skupinu S1, tedy zkušené inspektory a skupinu S2, tedy probandy bez zkušeností s kontrolou svařenců. Na ose y jsou zobrazeny hodnoty reziduí, zatímco na ose x je vyjádřena úroveň zkušeností. Z výsledného grafu lze pozorovat, že není patrný žádný systematický vzor mezi mírou zkušeností a hodnotami reziduí a model proto nevykazuje žádné významné narušení validity.



Obrázek 10-23 : Rozptylový graf – rezidua/úroveň zkušeností [zdroj autor]

Zároveň byl proveden rozptylový graf (Obrázek 10-24) porovnávající rezidua a přístupy k podpoře uživatelů při kontrole. Na ose x jsou tedy konkrétně jen dva scénáře, podpora s pomocí AR a podpora s pomocí tradičních papírových podkladů. Na ose y jsou uvedeny hodnoty reziduí. Z výsledného grafu je patrné, že data nevykazují systematický vzor a pro model proto nebylo zjištěno zásadní narušení validity.



Obrázek 10-24: Rozptylový graf – rezidua/metoda podpory [zdroj autor]

Z analýzy reziduí vyplynulo, že testovaný model v experimentu nevykazuje žádné zásadní narušení validity. Rezidua nevykazují systematický vzor ani významné odchylky v závislosti na míře zkušenosti nebo přístupu k podpoře uživatelů. Tím je potvrzena přesnost a validita modelu v rámci experimentu.

#### 10.1.4 Post hoc Tukeyho test – TCT

Po provedení dvoucestné analýzy rozptylů ANOVA a analýzy residuí byl jako další krok proveden post hoc Tukeyho test. Post hoc Tukeyho test je statistická metoda, která slouží k porovnání možných kombinací skupin v rámci faktoru a identifikaci statisticky významných rozdílů mezi nimi. Vzhledem k tomu, že byla zjištěna signifikantní interakce mezi faktory v rámci ANOVA analýzy, byl proveden upravený post hoc Tukeyho test. Tento upravený postup se doporučuje v případech, kdy interakce mezi faktory může ovlivnit výsledky testu. Z tohoto důvodu byl zaměřen Tukeyho test pouze na jeden faktor, a sice na AR přístup k podpoře kontroly. V rámci tohoto přístupu byly porovnány vzájemně dvě skupiny S1 a S2.

Výsledky post hoc Tukeyho testu ukázaly, že absolutní rozdíl mezi skupinami S1 a S2 byl 123,7, přičemž kritická hodnota byla 27. Tento výsledek potvrdil statisticky významný rozdíl mezi skupinami S1 a S2 v rámci AR přístupu.

Tímto post hoc testem bylo tedy potvrzeno, že existuje statisticky významný rozdíl mezi skupinami S1 a S2 v rámci zkoumaného faktoru. Tento výsledek přináší další poznatky o vztazích mezi skupinami a umožňuje lépe porozumět výsledkům experimentu. Provedení post hoc Tukeyho testu v rámci jednoho faktoru bylo zvoleno kvůli signifikantní interakci mezi faktory v ANOVA analýze. Tento přístup umožňuje odhalit významné rozdíly mezi specifickými skupinami a minimalizuje vliv interakce na výsledky testu.

#### 10.1.5 Leveneův test – TCT

V rámci analýzy dat byl proveden také Leveneův test, který slouží k otestování homogenity rozptylů mezi skupinami. Tento test byl proveden s cílem ověřit předpoklady pro následující t-test, který předpokládá homogenitu rozptylů mezi srovnávanými skupinami.

Leveneův test ověřuje následující hypotézy:

H0: Rozptyly mezi skupinami jsou stejné (homogenní).

H1: Rozptyly mezi skupinami jsou různé (nehomogenní).

Pro tento test byla zvolena hladina významnosti 0,05. Výsledek testu ukázal hodnotu testové statistiky  $W = 0,9$  a p-hodnotu 0,44. Na základě těchto výsledků není dostatečný důkaz pro zamítnutí nulové hypotézy. To tedy naznačuje, že rozptyly mezi skupinami nejsou statisticky významně odlišné. Takový výsledek Leveneova testu naznačuje, že předpoklad homogenity rozptylů mezi skupinami je pravděpodobně splněn. Je proto možné pokračovat k provedení standardního t-testu.

#### 10.1.6 T-test – TCT

T test je statistická metoda, která se používá k porovnání průměrů dvou skupin a testování jejich statistické významnosti. Při provedení t-testu je nejprve vypočtena t-hodnota, která vyjadřuje rozdíl mezi průměry dvou skupin ve standardních chybách. Následně je tato t-hodnota porovnána s kritickou hodnotou z t-rozdělení, která je určena na základě hladiny významnosti a počtu pozorování.

Provedení t-testu je relevantní i přesto, že již byla provedena dvoucestná analýza rozptylu (ANOVA). Zatímco ANOVA testuje rozdíly mezi skupinami jako celek, t-test se zaměřuje na konkrétní párová srovnání mezi dvěma skupinami. Tím poskytuje detailnější informace



o rozdílech mezi těmito dvěma skupinami a doplňuje tak komplexnost provedené statistické analýzy naměřených dat.

Pro provedení t-testu byly definovány následující dílčí nulové a alternativní hypotézy:

H1.1(0): „Neexistuje rozdíl v čase dokončení úkolu mezi skupinou S1 při použití podpory AR a PAP.“

H1.1(1): „S1 dokončí úkol s podporou AR rychleji než s PAP.“

H1.2(0): „Neexistuje rozdíl v čase dokončení úkolu mezi skupinou S2 při použití podpory AR a PAP.“

H1.2(1): „S2 dokončí úkol s podporou AR rychleji než s PAP.“

H1.3(0): „Neexistuje rozdíl v čase dokončení úkolu mezi skupinou S1 a S2 při použití podpory AR.“

H1.3(1): „S podporou AR dokončí úkol rychleji S1 než S2.“

H1.4(0): „Neexistuje rozdíl v čase dokončení úkolu mezi skupinou S1 a S2 při použití podpory PAP.“

H1.4(1): „S podporou PAP dokončí úkol rychleji S1 než S2.“

H1.5(0): „Neexistuje rozdíl v čase dokončení úkolu mezi podporou AR a tradičním PAP u všech probandů.“

H1.5(1): „S podporou AR dokončí všichni probandi úkol rychleji než s PAP.“

Obrázek 10-25 nabízí přehled výsledků t-testu pro výše uvedené hypotézy. Test byl provedený na zvolené hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

	STŘEDNÍ HODNOTA	směrodatná odchylka	t hodnota	p hodnota	počet pozorování	stupně volnosti
<b>H1.1</b>	927,800	44,138	-22,864	4,088E-24	20	38
	1238,250	41,702			20	
<b>H1.2</b>	1051,500	33,657	-35,428	5,116E-31	20	38
	1528,700	49,958			20	
<b>H1.3</b>	927,800	44,138	-9,966	1,874E-12	20	38
	1051,500	33,657			20	
<b>H1.4</b>	1238,250	41,702	-19,960	4,838E-22	20	38
	1528,700	49,958			20	
<b>H1.5</b>	989,650	73,651	-14,596	2,605E-24	40	78
	1383,475	153,929			40	

Obrázek 10-25: T-testy TCT [zdroj autor]

Z těchto výsledků plynou následující výstupy:

**H1.1:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S1 provede s podporou AR (M = 927,80, SD = 44,14, n = 20) rychleji než s podporou tištěné dokumentace (M = 1238,25, SD = 41,70, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = -22,86$ ,  $p = 4,088E-24$ .

**H1.2:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S2 provede s podporou AR (M = 1051,50, SD = 33,66, n=20) rychleji než s podporou tištěné dokumentace (M = 1528,70, SD = 49,96, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = -35,43$ ,  $p = 5,116E-31$ .

**H1.3:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S1 provede s podporou AR (M = 927,80, SD = 44,14, n=20) rychleji než skupina S2 (M = 1051,50, SD =33,66, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = -9,97$ ,  $p = 1,874E-12$ .

**H1.4:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S1 provede s podporou PAP (M = 1238,25, SD = 41,70, n=20) rychleji než skupina S2 (M = 1528,70, SD =49,96, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = -19,96$ ,  $p = 4,838E-22$ .

**H1.5:** T-test potvrdil hypotézu, že všichni uživatelé provedou kontrolu s podporou AR (M = 989,65, SD = 73,65, n=40) rychleji než s PAP (M = 1383,48, SD = 153,93, n = 40). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(78) = -14,60$ ,  $p = 2,605E-24$ .

Výsledky t-testu pro všechny definované dílčí hypotézy vedly k zamítnutí nulových hypotéz a potvrzení hypotéz alternativních. Na základě toho je možné vyvodit statisticky významné rozdíly mezi sledovanými sadami dat. Statistické párové otestování signifikantních rozdílů mezi skupinami tak poskytlo další důležité informace o rozdílech mezi sledovanými proměnnými.

### 10.1.7 Mann-Whitney U test – TCT

V úvodním Shapiro-Wilkově testu normality dat bylo potvrzeno normální rozdělení dat vyjadřujících celkový čas dokončení kontrolního úkolu všech uživatelů ( $S_1+S_2$ ) s podporou AR. Tento test však nepotvrdil normální rozdělení dat u časů dokončení úkolu všech uživatelů ( $S_1+S_2$ ) s podporou tradičních metod s papírovými podklady. Z tohoto důvodu byl t-test porovnávající tyto skupiny dat ( $H_{1.5}$  v předchozí kapitole) proveden jako doplňující test analýzy, neboť jedna skupina dat nesplňuje předpoklad normality.

Z tohoto důvodu byl proveden také neparametrický test, který nevyžaduje předpoklad normality dat a je zároveň schopen spolehlivě ověřit, zda je rozdíl mezi výkonem uživatelů s podporou AR a s papírovými podklady statisticky významný. Pro tuto analýzu byl zvolen neparametrický Mann-Whitneyův U test, který se používá pro porovnání dvou nezávislých skupin dat. S pomocí tohoto testu je možné i pro data, která nesplňují předpoklad normálního rozdělení, potvrdit, zda je rozdíl mezi časy dokončení kontrolního úkolu všech uživatelů s podporou AR a s podporou tradičního přístupu statisticky signifikantní.

Mann-Whitneyův U test je neparametrický test, který ověřuje následující dílčí hypotézy:

$H(0)$ : Neexistuje statisticky významný rozdíl ve výkonu uživatelů s podporou přístupu AR a s podporou tradičních přístupů s tištěnými podklady.

$H(1)$ : Existuje statisticky významný rozdíl ve výkonu uživatelů s podporou přístupu AR a s podporou tradičních přístupů s tištěnými podklady.

Tyto hypotézy jsou testovány na základě pozorovaných dat a výpočtu hodnoty  $Z$  a signifikance ve Mann-Whitneyově U testu. Cílem bylo zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl ve výkonu uživatelů s podporou přístupu AR a tradičních metod s papírovými podklady. Test porovnával dvě skupiny dat. První skupinu tvořilo 40 naměřených časů dokončení kontrolního úkolu všech účastníků experimentu s podporou AR přístupu, zatímco druhou tvořilo 40 naměřených časů dokončení kontrolního úkolu všech účastníků experimentu s podporou tradiční metody s papírovými podklady.

Výsledky Mann-Whitneyova U testu pro porovnání dvou skupin ukázaly, že hodnota  $Z$  vyšla jako 7,698 a signifikance byla vypočtena jako  $1,377E-14$ . Tento test byl proveden na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Výsledky testu naznačují, že existuje statisticky významný rozdíl ve výkonu uživatelů v závislosti na použitém přístupu k podpoře probandů při kontrolních úkolech.

### 10.1.8 Shrnutí

V rámci statistické analýzy výkonnosti uživatelů vyjádřené časem dokončení kontrolního úkolu bylo provedeno několik kroků. Nejprve byl proveden test normality dat pomocí Shapiro-Wilkova testu. Výsledky tohoto testu naznačily, že všechny 4 sady dat naměřených časů definovaných kombinací dvou faktorů, způsobem podpory probanda během kontrolního úkolu a úrovní jeho zkušeností s kontrolou svařenců, vykazují normální rozdělení dat. Stejně tak data z pohledu pouze faktoru metodiky podpory uživatele vykazují v případě přístupu AR normalitu dat. Naopak data uživatelů s podporou tradičních metod s papírovými podklady normální rozdělení neprokázala.

Na základě těchto výsledků byla následně provedena analýza pomocí dvoucestné analýzy rozptylu (ANOVA) pro blokové porovnání 4 sad dat v závislosti na kombinaci dvou sledovaných

faktorů. ANOVA testování prokázalo statisticky významný rozdíl mezi těmito dvěma skupinami, což umožnilo zamítnout nulovou hypotézu a přijmout alternativní hypotézu o existenci signifikantního rozdílu mezi skupinami. ANOVA analýza byla doplněna analýzou reziduí, která ověřila kvalitu testovaného modelu, a post hoc Tukeyho testem, který podrobněji sledoval signifikanci rozdílů mezi jednotlivými skupinami.

Zároveň byl proveden párový t-test pro porovnání časů dokončení úkolu mezi jednotlivými sadami dat. Ve všech sledovaných případech byly zjištěny statisticky významné rozdíly, což podporuje hypotézu, že podpora s přístupem AR vede k rychlejšímu dokončení úkolu ve srovnání s tradiční podporou tištěných dokumentů.

V neposlední řadě byl proveden neparametrický Mann-Whitneyův U test, pro porovnání času dokončení úkolu s podporou AR metodiky a tradiční metodiky pro sadu dat, která nepotvrdila předpoklad normálního rozdělení nutný pro parametrické testy.

Na základě provedené statistické analýzy výkonu probandů vyjádřeného časem dokončení kontrolního úkolu byla potvrzena následující ověřovaná hlavní hypotéza a příslušné dílčí hypotézy:

**H1:** „S použitím navrženého AR přístupu dojde ke zkrácení doby dokončení kontroly svařence ve srovnání s použitím konvenčních přístupů založených na tištěných podkladech.“

H1.1: „Zkušební inspektoři dokončí proces kontroly svařence rychleji s podporou přístupu AR než s podporou tradičního přístupu založeného na papírové výkresové dokumentaci.“

H1.2: „Pracovníci bez zkušeností s kontrolou svařenců dokončí proces kontroly svařence rychleji s podporou přístupu AR než s podporou tradičního přístupu založeného na papírové výkresové dokumentaci.“

H1.3: „S podporou přístupu AR dokončí zkušební inspektoři proces kontroly svařence rychleji než pracovníci bez zkušeností s kontrolou svařenců.“

H1.4: „S podporou tradičního přístupu založeného na papírové výkresové dokumentaci dokončí zkušební inspektoři proces kontroly svařence rychleji než pracovníci bez zkušeností s kontrolou svařenců.“

H1.5: „S podporou přístupu AR dokončí inspektoři kontrolu svařence rychleji než s podporou tradičního přístupu založeného na papírové výkresové dokumentaci.“

Celkově lze konstatovat, že provedená statistická analýza poskytuje důkazy o existenci statisticky významného rozdílu ve výkonu uživatelů v závislosti na použité metodice kontroly svařence. Tyto výsledky podporují původní hypotézy, které předpokládaly, že použití přístupu AR povede k rychlejšímu dokončení kontrolního úkolu ve srovnání s tradiční metodou s podporou tištěné dokumentace. Zjištění naznačují, že AR přístup má relativně větší přínos pro skupinu nezkušených probandů než pro zkušené inspektory.

Tato zjištění mají důležité implikace pro další vývoj a využití technologií AR v oblasti průmyslových kontrolních procesů, neboť naznačují, že AR může být efektivním nástrojem pro zvýšení efektivity při provádění kontrolních operací svařovaných konstrukcí.

## 10.2 Míra chybovosti

V rámci experimentu byl zkoumán nejen čas provedení úkolu, ale také byla pozornost zaměřena na hodnocení chybovosti během tohoto kontrolního procesu. Hlavním cílem této části experimentu bylo zjistit, jaké jsou chyby, kterých se probandi dopouštějí při kontrole svařenců, a identifikovat případné trendy.

Během experimentu provedli inspektoři kontrolu dvou kontrolních sad dílů s podporou dvou kontrolních přístupů. V těchto sadách dílů bylo 80 % výrobků bez chyb a 20 % zahrnovalo chybu. Úkolem probandů bylo provést kontrolu těchto dílů co nejrychleji a s minimálním počtem chyb. Analýza zaznamenaných chyb ukázala, že převážná většina chyb spočívala v případech, kdy probandi přehlédli přítomnost chyby na dílu. Tento typ chyby představoval nejčastější vzorec chybového chování. V jednom případě byla také zaznamenána chyba, kdy proband chybně označil bezchybný díl za neshodný.

Během experimentu byla pozorována velmi nízká průměrná chybovost. Probandi vykazovali vysokou úspěšnost při detekci chyb umístěných na dílech. Vzhledem k nízkému počtu pozorovaných chyb může být vhodné v dalším výzkumu provést rozsáhlejší a dlouhodobější experiment, který by umožnil podrobnější zkoumání míry chybovosti a poskytl by relevantní údaje o vlivu podpory metodiky AR na míru chybovosti uživatelů.

V této části analýzy byla pozornost zaměřena na testy a statistiky, které pomohou porozumět pozorované chybovosti uživatelů a provést kvantifikaci těchto chyb.

### 10.2.1 Testování normálního rozdělení dat – chybovost

V úvodní části této analýzy byla pozornost opět zaměřena na testování normálního rozdělení dat získaných během experimentu. Normalita dat patří mezi nejdůležitější předpoklady mnoha statistických metod. Proto byl i pro data chybovosti proveden Shapiro-Wilkův test normality, který testuje následující obecné hypotézy:

H0: Data mají normální rozdělení.

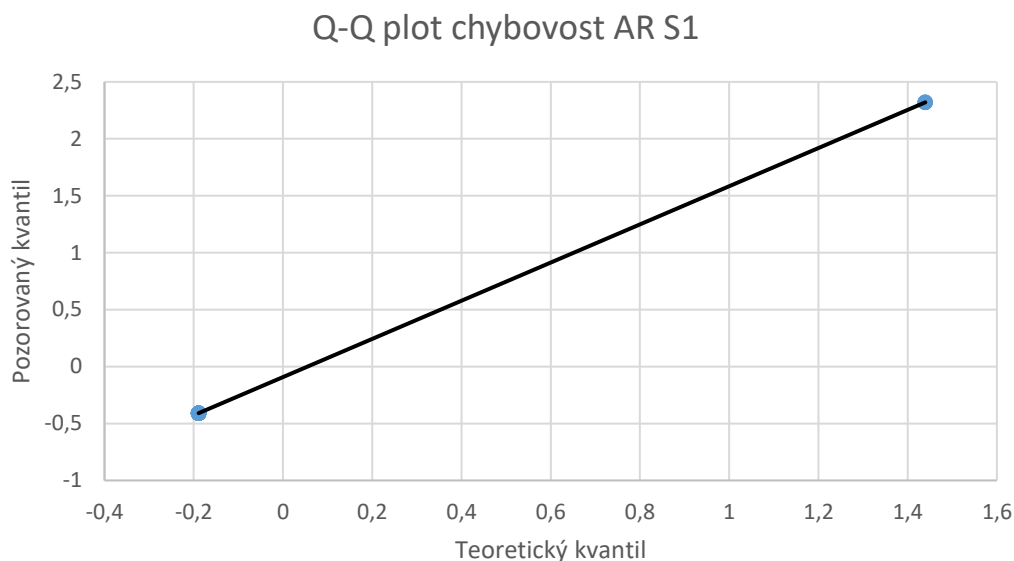
H1: Data nemají normální rozdělení.

Shapiro-Wilkův test byl doplněn o grafickou analýzu pomocí Q-Q plotu a křivky normálního rozdělení. Tyto metody poskytly informace o tom, zda data získaná z experimentu vykazují normální rozdělení.

#### **Chybovost S1 s podporou AR**

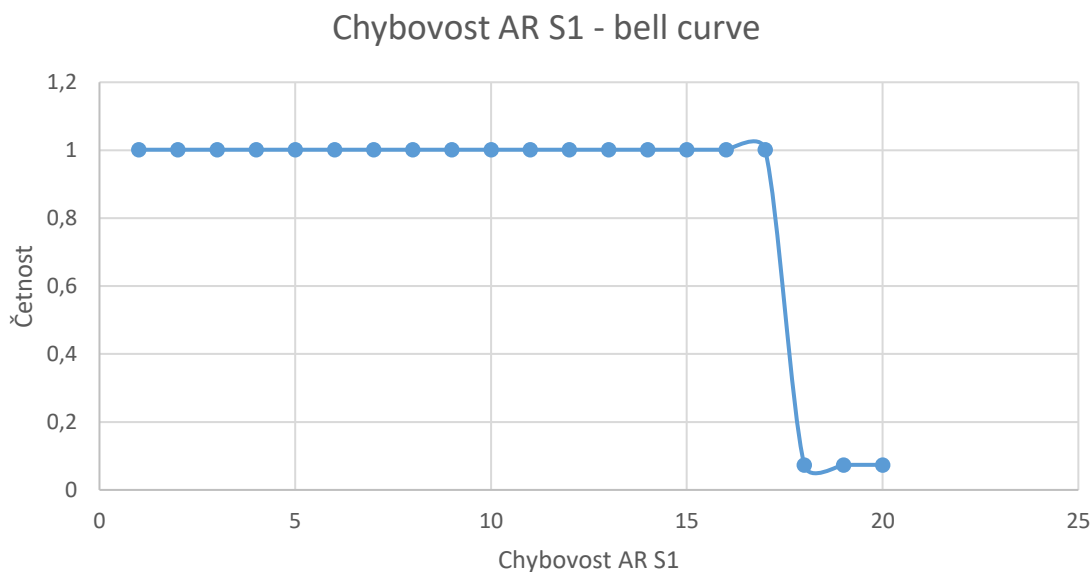
Jako první je popsán výsledek testu normálního rozdělení pro data chybovosti skupiny probandů S1 s podporou přístupu AR. Každá z uvedených 4 skupin dat obsahuje 20 náměrů pro každou skupinu, celkem tedy 80 dat, která jsou rozdělena do 4 skupin v závislosti na kombinaci dvou sledovaných faktorů.

Vypočtená hodnota testové statistiky  $W$  pro tuto sadu byla 0,433. K porovnání slouží kritická hodnota  $W_{krit} = 0,905$ , která je specifická pro zvolenou hladinu významnosti  $\alpha=0,05$  a daný počet náměrů. Platí tedy vztah, že vypočtená  $W < W_{krit}$  a  $p < 0,05$ . Nulová hypotéza konstatující normální rozdělení dat je proto zamítnuta a je přijata alternativní analýza. Ta tvrdí, že data nemají normální rozdělení.



Obrázek 10-26: Q-Q plot chybovost AR S1 [zdroj autor]

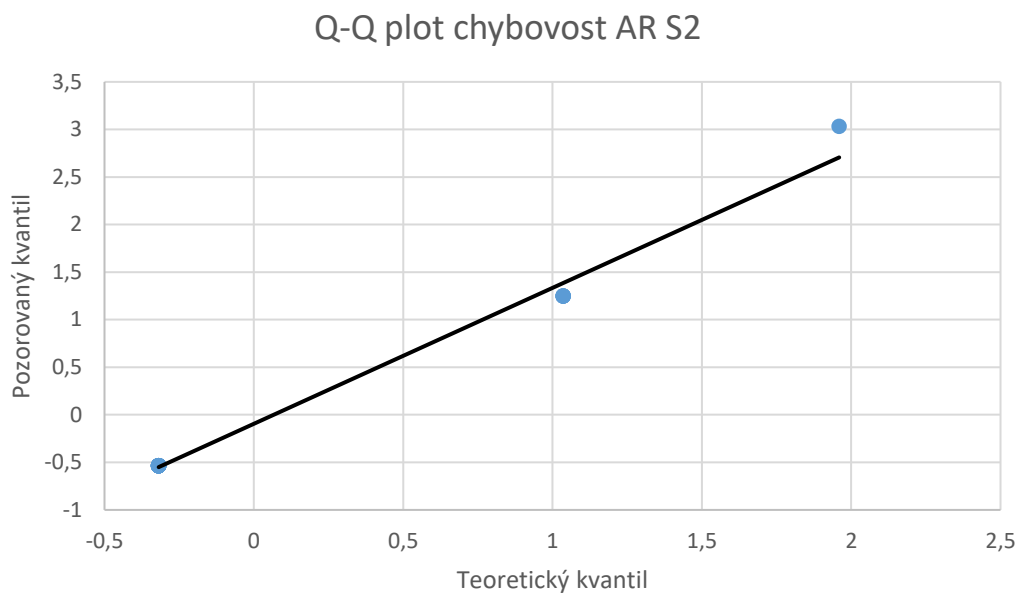
Stejný výsledek vyplývá také z grafů Q-Q plot (Obrázek 10-26) a křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-27).



Obrázek 10-27: Chybovost AR S1 – bell curve [zdroj autor]

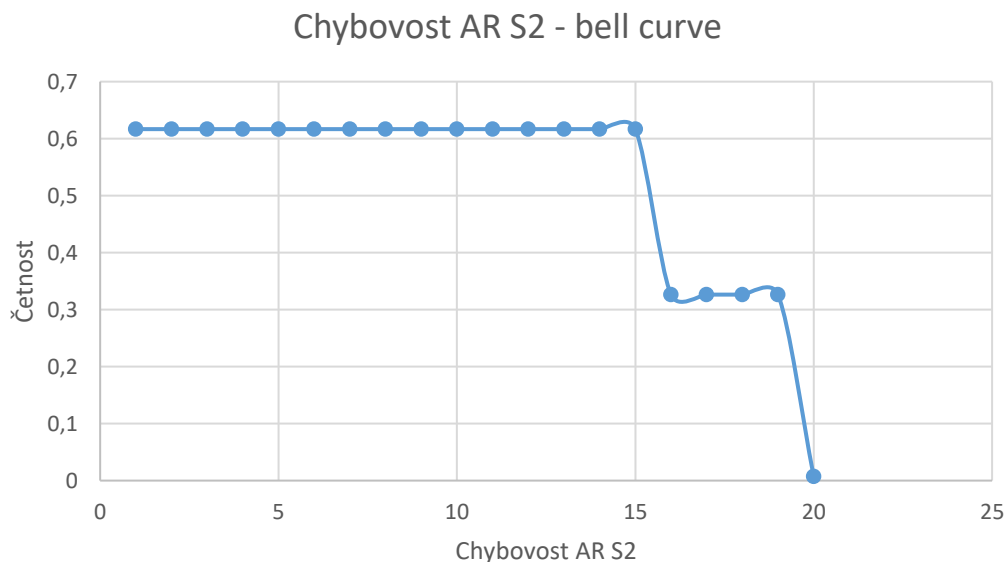
### Chybovost S2 s podporou AR

Další test normality dat byl proveden pro skupinu S2 s podporou přístupu AR. Vypočtená hodnota  $W$  byla 0,544. Porovnání s kritickou hodnotou  $W_{krit}$ , která je rovna 0,905, ukazuje, že  $W < W_{krit}$  na hladině významnosti 0,05. Na základě těchto výsledků byla zamítnuta nulová hypotéza Shapiro-Wilkova testu, která předpokládá normální rozdělení dat, a byla přijata alternativní hypotéza o nenormálním rozdělení dat.



Obrázek 10-28: Q-Q plot chybovost AR S2 [zdroj autor]

Tento závěr je potvrzen také grafickou analýzou, která zobrazuje Q-Q plot (Obrázek 10-28) a křivku normálního rozdělení (Obrázek 10-29), které prokazují nesoulad s normálním rozdělením dat.



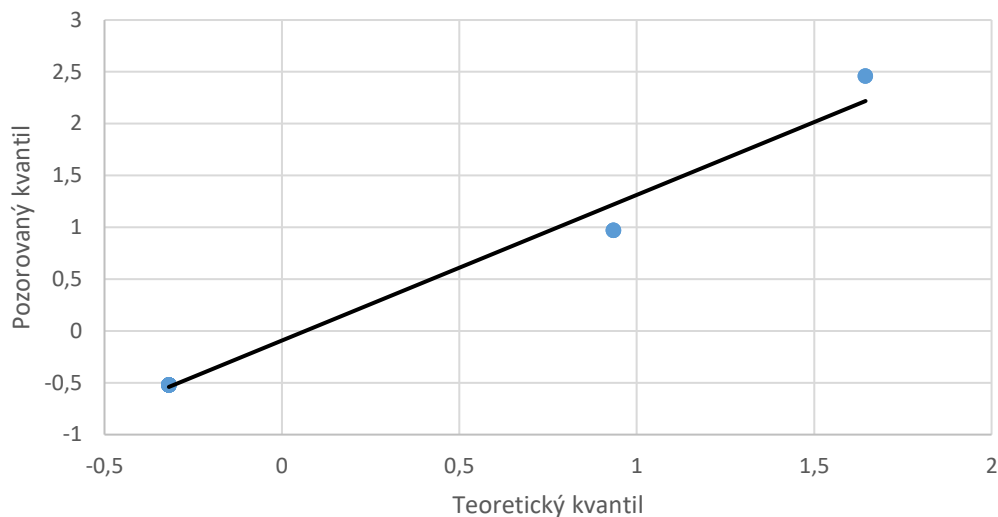
Obrázek 10-29: Chybovost AR S2 – bell curve [zdroj autor]

### Chybovost S1 s podporou PAP

Pro skupinu S1 s podporou tradiční metody založené na papírové dokumentaci byl proveden test normality pro chybovost pozorovanou u uživatelů s výslednou hodnotou  $W=0,528$ , zatímco  $W_{krit}$  je  $0,905$ . Stanovená hladina významnosti byla  $0,05$ . Z porovnání těchto

hodnot vyplývá, že  $W < W_{krit}$  a  $p < 0,05$ . Z tohoto důvodu byla nulová hypotéza zamítnuta a byla přijata alternativní hypotéza popisující nenormální rozdělení dat.

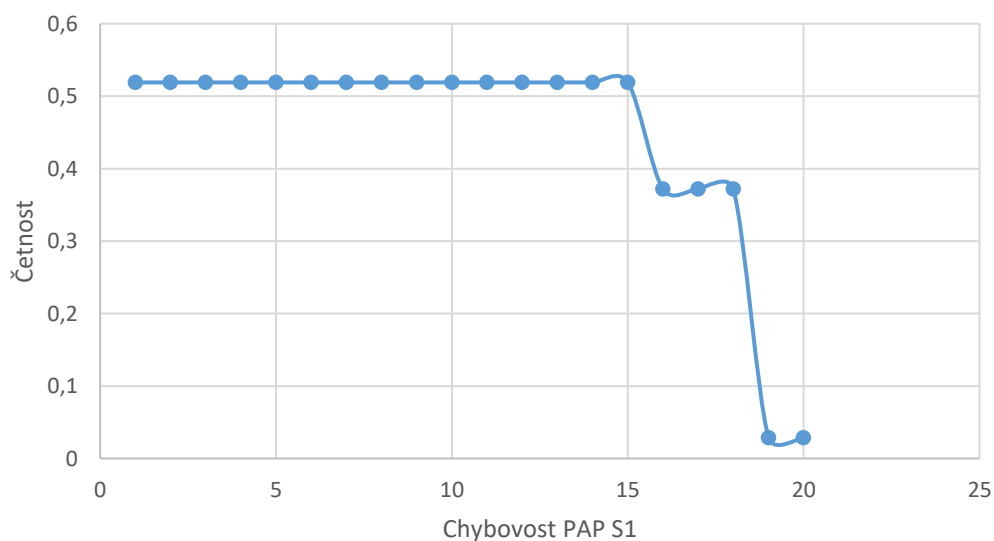
Q-Q plot chybovost PAP S1



Obrázek 10-30: Q-Q pot chybovost PAP S1 [zdroj autor]

Tento závěr je podporován také grafickou analýzou, která zobrazuje křivku normálního rozdělení, která nevykazuje zvonovitý tvar charakteristický pro Gaussovu křivku. Také body na Q-Q plotu nejsou rovnoměrně rozloženy kolem přímky ideálního normálního rozdělení, což naznačuje nesoulad s normálním rozdělením dat (Obrázek 10-30 a Obrázek 10-31).

Chybovost PAP S1 - bell curve



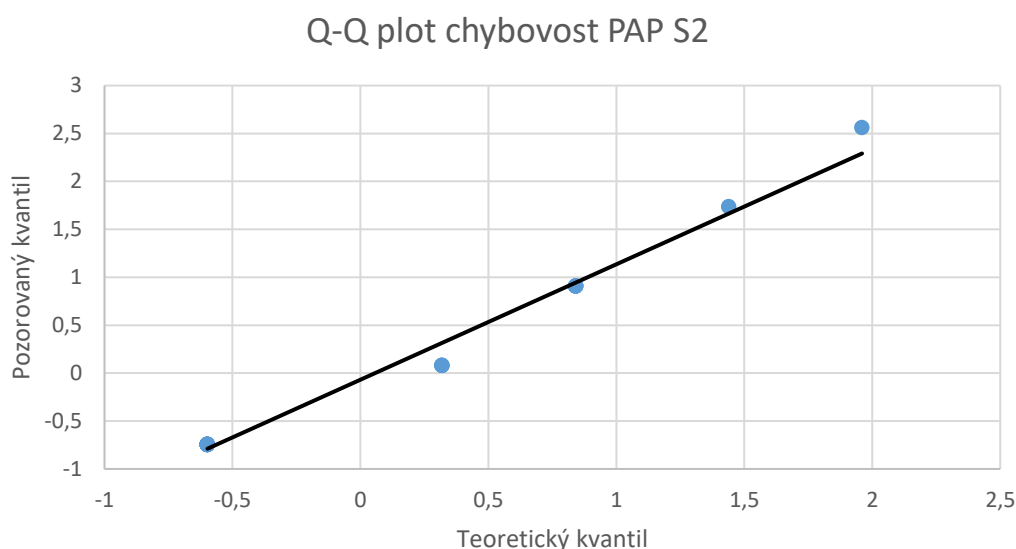
Obrázek 10-31: Chybovost PAP S1 – bell curve [zdroj autor]



### Chybovost S2 s podporou PAP

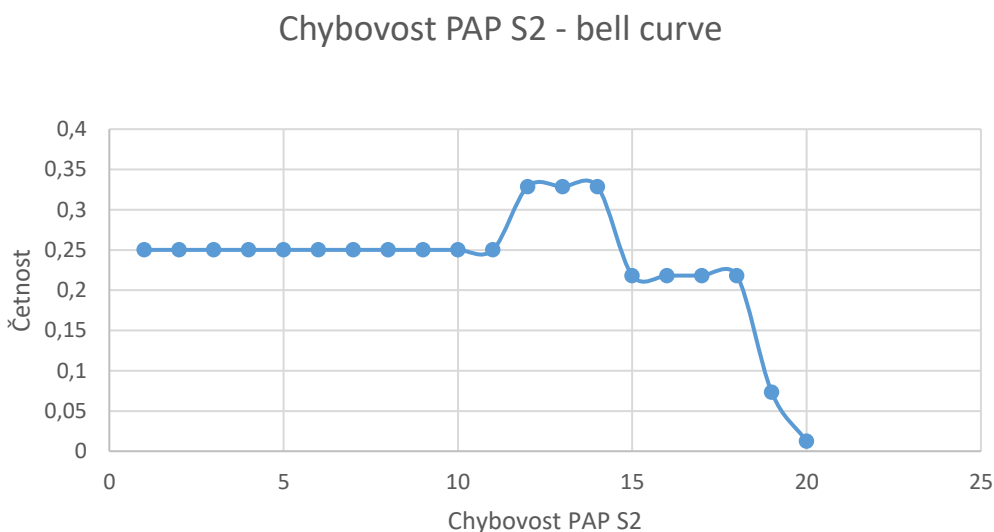
Pro poslední zkoumanou skupinu dat, tedy S2 ve scénáři podpory tradiční metody založené na papírové dokumentaci, byl proveden test normality pro chybovost pozorovanou u uživatelů s výslednou hodnotou  $W = 0,543$ . Kritická hodnota  $W_{krit}$  je rovna 0,905. Stanovenou hladinou významnosti je 0,05. Z porovnání těchto hodnot vyplývá vztah  $W < W_{krit}$  a zároveň  $p < 0,05$ . Z tohoto důvodu je zamítnuta nulová hypotéza o normálním rozdělení dat a přijata alternativní hypotéza o nenormálním rozdělení dat.

Také z Q-Q plotu (Obrázek 10-32) je patrné, že body nejsou rovnoměrně rozmístěny kolem křivky ideálního normálního rozdělení.



Obrázek 10-32: Q-Q plot chybovost PAP S2 [zdroj autor]

Stejný závěr potvrzuje také křivka normálního rozdělení (Obrázek 10-33). Tvar této křivky nevykazuje zvonovitý tvar. Obě grafické metody tak potvrdily výsledek výpočetní metody, tedy nenormální rozdělení dat i poslední čtvrté skupiny náměřů.



Obrázek 10-33: Chybovost PAP S2 – bell curve [zdroj autor]

V této části analýzy byla pozornost zaměřena na testování normality dat pro 4 zkoumané skupiny, které zahrnovaly celkem 80 náměrů. Každá skupina zahrnovala 20 dat, které byly pozorovány u celkem 40 probandů ve dvou scénářích kontroly. Pro každou skupinu byl proveden výpočet Shapiro-Wilkova testu a grafická analýza pomocí Q-Q plotu a křivky normálního rozdělení.

Z výsledků provedených testů vyplývá, že pro žádnou z těchto čtyř skupin nebylo potvrzeno normální rozdělení dat. Hodnoty  $W$  vypočtené ze Shapiro-Wilkova testu byly v každé skupině nižší než odpovídající kritická hodnota  $W$ , zároveň  $p$  hodnota byla menší než zvolená hladina významnosti. Tento závěr byl dále podpořen grafickou analýzou, kde v Q-Q grafech neležely body rovnoměrně v blízkosti přímky ideálního normálního rozdělení a křivky normálního rozdělení nevykazovaly charakteristický zvonovitý tvar. Toto zjištění nenormálního rozdělení je důležité brát v úvahu při dalším statistickém vyhodnocování a interpretaci výsledků experimentu.

### 10.2.2 Friedmanův test – chybovost

Pro sledování významnosti rozdílů mezi čtyřmi sledovanými skupinami, u kterých bylo zjištěno, že data nevykazují normální rozdělení, byl zvolen neparametrický Friedmanův test, jako alternativa k parametrické dvoucestné analýze rozptylu (ANOVA). Friedmanův test je neparametrickou metodou pro porovnání měření a slouží k testování hypotézy o rovnosti distribucí mezi skupinami. Obecné hypotézy Friedmanova testu jsou následující:

$H_0$ : Neexistuje rozdíl mezi distribucemi mezi testovanými skupinami.

$H_1$ : Existuje rozdíl mezi distribucemi mezi testovanými skupinami.

Tento test je vhodný pro případy, kdy nejsou splněny předpoklady normálního rozdělení.

Výpočtem Friedmanova testu pro naměřená data chybovosti během experimentu byla získána hodnota signifikance  $3,097E-11$ . Tato hodnota vyjadřuje významnost rozdílů mezi skupinami. Vzhledem k tomu, že je tato hodnota menší než zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ , je nulová hypotéza o rovnosti distribucí mezi skupinami zamítnuta. To naznačuje statisticky významné rozdíly mezi alespoň jednou dvojicí skupin dat.

Friedmanův test tak umožňuje detekovat rozdíly mezi skupinami bez nutnosti splnění předpokladu normálního rozdělení dat. Jeho výsledky naznačují, že přístup k podpoře kontroly a úroveň zkušeností mají statisticky významný vliv na chybovost pozorovanou u uživatelů.

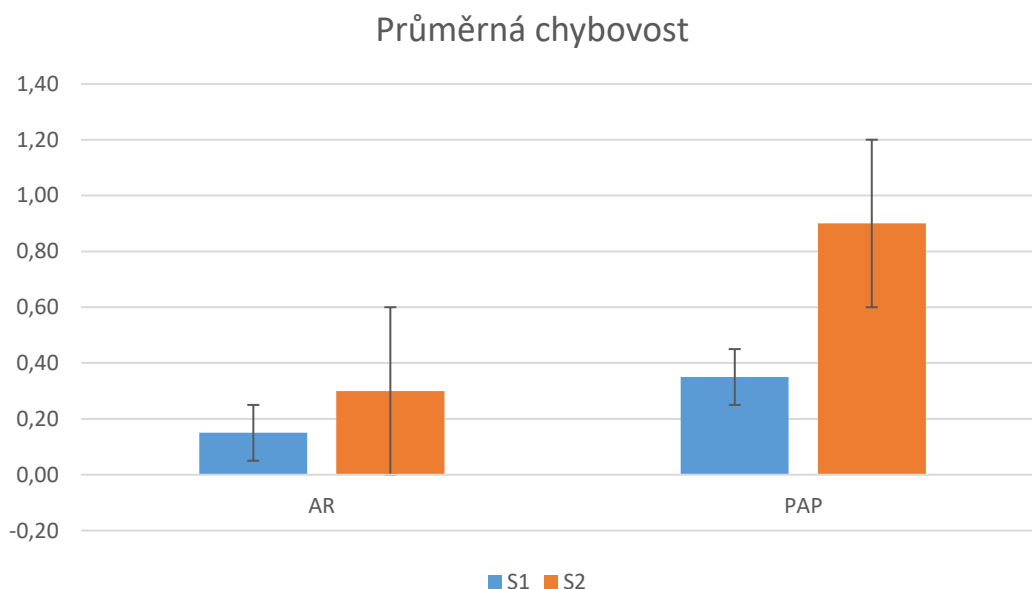
Na následujícím grafu je uveden grafický přehled průměrné chybovosti a standardních chyb, který zobrazuje výsledky chybovosti pro jednotlivé skupiny a jejich porovnání mezi přístupem AR a tradiční metodikou.

Graf průměrů a standardních chyb (Obrázek 10-34) slouží k vizuálnímu zobrazení rozdílů v chybovosti mezi skupinami probandů a porovnání přístupu AR a tradiční metodiky kontroly. Graf obsahuje dvě sady sloupců, první sloupec v každé sadě odpovídá skupině S1 a druhý skupině S2. První sada sloupců interpretuje výsledky při použití přístupu AR, zatímco druhá sada sloupců interpretuje výsledky při použití tradiční metodiky a papírových podkladů.

Na vertikální ose je zobrazena průměrná chybovost, zatímco na horizontální ose jsou identifikovány jednotlivé skupiny. Kromě průměrných hodnot je také zobrazena standardní chyba, která vyjadřuje rozptyl dat v rámci každé skupiny.

Z analýzy grafu je možné vyčíst několik závěrů. Nejnižší průměrná chybovost byla zaznamenána ve skupině S1 při použití přístupu AR, což naznačuje, že tato kombinace dosáhla nejlepších výsledků. Druhý nejnižší průměr je pozorován ve skupině S2 při použití přístupu AR. Skupina S1 při použití tradiční metodiky vykazuje vyšší průměrnou chybovost než předchozí dvě skupiny, zatímco skupina S2 při použití tradiční metodiky má relativně výrazně nejvyšší průměr.

Představený graf umožňuje srovnání výkonnosti jednotlivých skupin a přístupů. Na základě průměrné chybovosti je možné identifikovat skupiny, které dosahují lepších výsledků a mohou sloužit jako referenční body pro zlepšování kontrolního procesu. Standardní chyba naopak poskytuje informaci o rozptylu dat uvnitř každé skupiny, což může být užitečné pro hodnocení konzistence výsledků. Obecně graf průměrů a standardních chyb poskytuje přehlednou vizuální reprezentaci rozdílů v chybovosti mezi skupinami a metodikami, což přispívá k celkovému porozumění výsledkům analýzy chyb v kontextu experimentu.



Obrázek 10-34: Průměrná chybovost [zdroj autor]

### 10.2.3 Mann Whitneyho U test – chybovost

Po provedení Friedmanova testu, který prokázal statisticky významné rozdíly mezi alespoň jednou dvojicí skupin dat, byl proveden post hoc test za účelem identifikace konkrétních skupin, mezi kterými jsou rozdíly v chybovosti statisticky významné. Za tímto účelem byl proveden post hoc Mann-Whitneyho U test.

Mann-Whitneyho U test je neparametrický test, který se používá k porovnání dvou nezávislých skupin. Jeho cílem je zjistit, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi dvěma skupinami z hlediska středních hodnot. Provedení Mann-Whitneyho testu umožňuje identifikovat konkrétní párová srovnání skupin, mezi kterými jsou statisticky významné rozdíly v chybovosti.

V tomto experimentu byla tedy provedena čtyři párová srovnání, jak je uvedeno v následující tabulce. Na zvolené hladině významnosti 0,05 je vyhodnocováno, zda jsou

hodnoty  $p$  menší než tato hladina. Pokud je hodnota  $p$  menší než 0,05, znamená to, že mezi srovnávanými skupinami existuje statisticky významný rozdíl v chybovosti. Pokud je hodnota  $p$  větší než 0,05, neexistuje dostatečný důkaz pro zamítnutí nulové hypotézy o stejné chybovosti mezi skupinami.

V případě tohoto experimentu vycházejí hodnoty  $p$  následovně:

	AR S1 VS S2	PAP S1 VS S2	S1 AR VS PAP	S2 AR VS PAP
<b>P HODNOTA</b>	0,372	0,100	0,403	0,126

Obrázek 10-35: Mann-Whitneyův test – chybovost [zdroj autor]

Na základě těchto dat nejsou potvrzené statisticky významné rozdíly mezi žádnou dvojicí srovnávaných skupin (Obrázek 10-35). To znamená, že není dostatečný důkaz pro tvrzení, že by mezi skupinami S1 a S2 při přístupu AR, S1 a S2 při tradiční metodě, AR přístupem a tradiční metodikou pro S1 a AR přístupem a tradiční metodikou pro S2 existoval statisticky významný rozdíl v chybovosti.

#### 10.2.4 Shrnutí

Během analýzy experimentu byla pozornost zaměřena na hodnocení rozdílů mezi čtyřmi skupinami v kontextu jejich chybovosti při kontrole svařenců. Pro ověření významnosti rozdílů mezi skupinami byl nejprve použit Friedmanův test, který je neparametrickou alternativou ke dvoucestné analýze rozptylu (ANOVA). Výsledky tohoto testu naznačily statisticky významné rozdíly mezi sledovanými skupinami ( $p < 0,05$ ).

Vzhledem k těmto výsledkům byly následně provedeny post hoc testy s cílem identifikovat konkrétní skupiny, mezi kterými jsou rozdíly statisticky významné. Pro tento účel byl použit Mann-Whitneyho U test, který je vhodný pro porovnání dvou skupin. Pomocí Mann-Whitneyho U testu nebyly prokázány statisticky významné rozdíly pro žádný kontrolovaný pár skupin dat. Možným vysvětlením této situace může být skutečnost, že Friedmanův test je citlivý na jakékoliv formy rozdílů mezi skupinami, zatímco Mann-Whitneyho U test je zaměřen především na porovnání dvou skupin a nemusí být dostatečně citlivý na malé rozdíly mezi skupinami. Je možné, že při použití Mann-Whitneyho U testu není možné odhalit statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými páry skupin, přesto mohou tyto rozdíly existovat.

V této části analýzy naměřených dat byla testována následující hlavní hypotéza:

H2: "S použitím AR přístupu dojde ke snížení míry chybovosti kontroly ve srovnání s použitím konvenčních přístupů založených na tištěných podkladech."

Na základě výsledků Friedmannova a Mann-Whitneyho testu nelze jednoznačně potvrdit ani zamítnout uvedenou hypotézu o míře chybovosti mezi přístupem AR a tradiční metodikou založenou na papírové dokumentaci. Friedmannův test prokázal, že existují statisticky významné rozdíly mezi skupinami, což naznačuje, že alespoň jedna z metodik dosahuje odlišné míry chybovosti. Nicméně, Mann-Whitneyho test, který slouží jako post hoc test pro

porovnání konkrétních skupin, neodhalil statisticky významné rozdíly mezi žádnou dvojicí skupin. Z hlediska statistiky nejsou dostatečné důkazy pro potvrzení hypotézy, že míra chybovosti při kontrole svařence s podporou přístupu AR je nižší než při použití tradiční metody s papírovou dokumentací. Bylo by v tomto případě proto vhodné provést další výzkum pro získání rozsáhlejšího vzorku dat pro další analýzy.

### 10.3 Mentální zátěž

Další oblastí sledovanou v rámci provedeného experimentu byla mentální zátěž. Pro hodnocení mentální zátěže u probandů během experimentu byl použit standardizovaný dotazník NASA TLX (Task Load Index). Tento dotazník slouží k měření vnímané mentální zátěže a je často používán ve výzkumech zahrnujících lidský faktor a v oblasti ergonomie.

NASA TLX se skládá ze šesti sledovaných dílčích oblastí, které reflektují různé aspekty mentální zátěže. Tyto oblasti zahrnují mentální náročnost (Mental Demand), fyzickou náročnost (Physical Demand), časovou náročnost (Temporal Demand), úsilí (Effort), frustraci (Frustration) a vnímání výkonu (Performance). Každá z těchto oblastí je hodnocena na škále od 0 do 100, přičemž vyšší hodnota značí vyšší vnímanou zátěž.

K hodnocení tohoto experimentu byla využita varianta NASA RTLX (Raw Task Load Index). Tato možnost se od základní verze TLX liší absencí váhových přepočtů. Zatímco původní verze TLX vyžaduje, aby respondenti při hodnocení jednotlivých oblastí mentální zátěže přiřadili váhy, které vyjadřují relativní důležitost těchto oblastí, RTLX pracuje s daty bez váhových koeficientů. V experimentu byla zvolena varianta RTLX namísto klasického TLX z důvodu jednoduššího a příjemnějšího vyplňování pro probandy. Varianta RTLX je v rámci výzkumů a experimentů velice rozšířená. Přestože původní verze TLX s váhovými přepočty je stále široce využívána a poskytuje podrobné informace o vnímané zátěži v jednotlivých oblastech, RTLX je často preferována pro svou jednoduchost a snadnější použitelnost, zejména v případech, kdy je důležitý rychlý a efektivní sběr dat od respondentů.

V rámci pilotní studie byly s pilotním vzorkem respondentů testovány obě varianty, klasická TLX s váhovými koeficienty a RTLX. Vzhledem k tomu, že klasická verze s TLX s váhovými koeficienty byla probandy hodnocena jako zdoluhavá, těžko pochopitelná a někdy až frustrující, byla pro hodnocení samotného experimentu zvolena varianta RTLX, která je také schopná přinášet spolehlivá data a poskytovat podrobný pohled na aspekty mentální zátěže, ale zároveň je příjemnější, snadnější a rychlejší pro probandy při vyplňování.

Během experimentu vyplnil každý proband dotazník NASA TLX celkem dvakrát, jednou po dokončení kontroly s použitím metodiky AR a jednou po dokončení kontroly s použitím konvenční metody. Celkem byly tedy pro každého probandy shromážděny dvě sady dat, ze kterých je možné analyzovat jednotlivé oblasti mentální zátěže i celkovou hodnotu mentální zátěže při použití testovaných metodik kontroly svařence. Ukázka NASA TLX dotazníku je zobrazena v příloze 4.

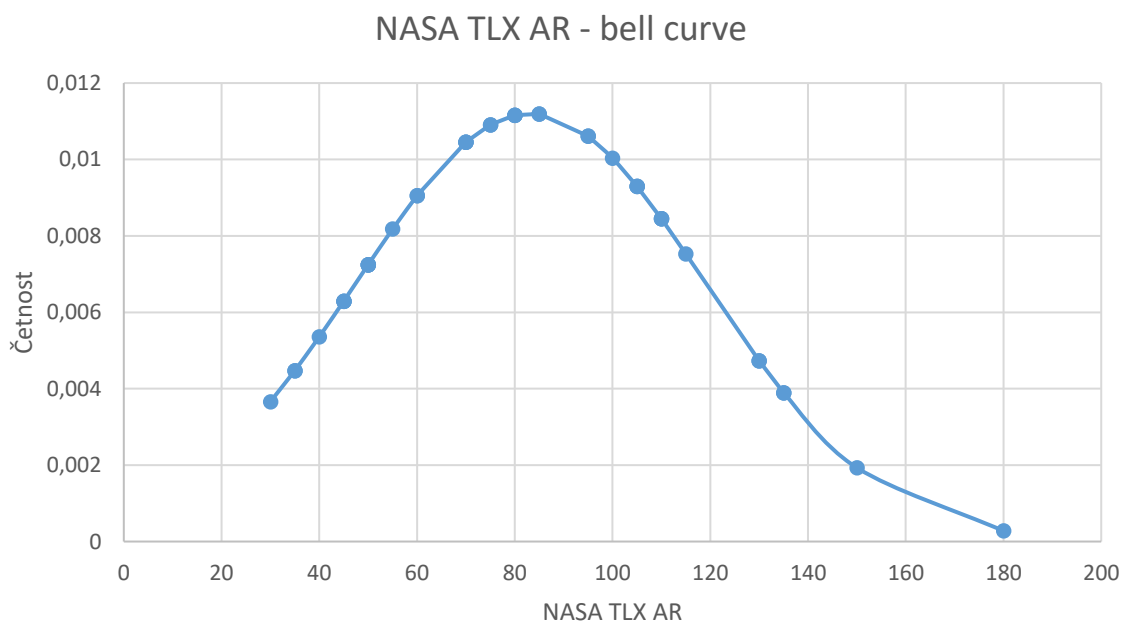
Pro testování získaných dat byla nejprve ověřena normalita dat, což je předpoklad pro následující statistické testy. Následně byla provedena dvoucestná analýza rozptylu (ANOVA) pro posouzení signifikance rozdílů mezi čtyřmi bloky dat v závislosti na kombinaci dvou sledovaných faktorů. Dále byl proveden párový t-test pro kontrolu rozdílů mezi jednotlivými dvojicemi datových sad.

### 10.3.1 Testování normálního rozdělení dat – mentální zátěž

Stejným způsobem jako u předchozího hodnocení výkonnosti probandů byla normalita zkoumána pomocí Shapiro-Wilkova testu a grafů křivky normálního rozdělení a Q-Q plotu, které pomáhaly vizualizovat distribuci dat. V následujícím textu jsou shrnuty výsledky těchto testů normálního rozdělení pro jednotlivé sady dat.

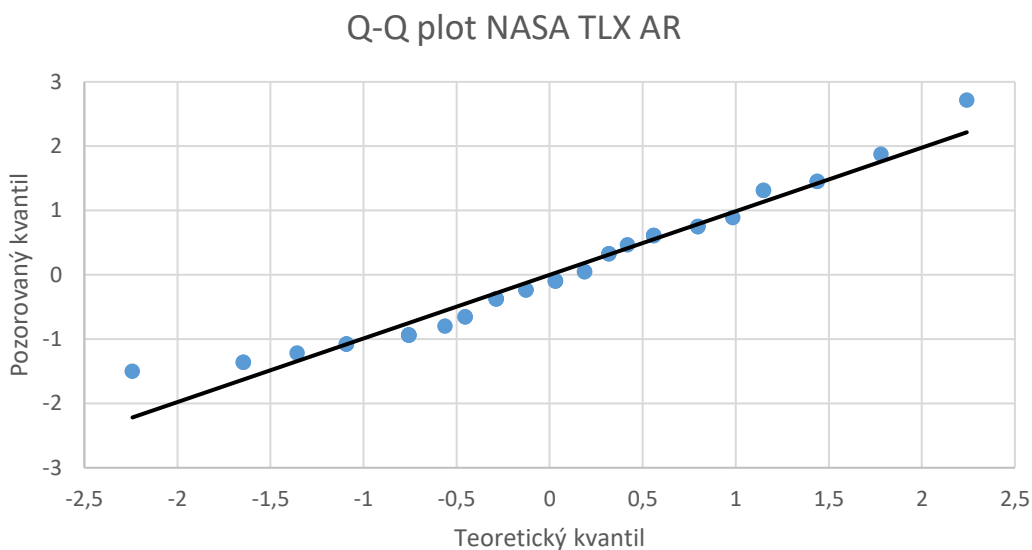
#### NASA TLX AR

První testovaná skupina zahrnuje výsledky všech probandů celkového skóre mentální zátěže v případě použití metodiky AR. Celkem je tedy testováno 40 dat. Výpočtem Shapiro-Wilkova testu byla vypočtená hodnota  $W=0,853$ . Při kritické hodnotě  $W_{krit}=0,940$  platí tedy vztah  $W > W_{krit}$  a  $p > 0,05$ . Pro tato data tedy nejsou dostatečné důkazy k zamítnutí nulové hypotézy a potvrzuje se tak normální rozdělení těchto dat. Tento výsledek je podpořen také grafem křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-36), který ukazuje typický zvonovitý tvar pro normálně rozdělená data.



Obrázek 10-36: NASA TLX AR - bell curve [zdroj autor]

Dále byl analyzován Q-Q plot (Obrázek 10-37), který ukázal, že body jsou rovnoměrně rozloženy kolem ideálního trendu normálního rozdělení a dá se proto předpokládat normální rozdělení těchto dat.

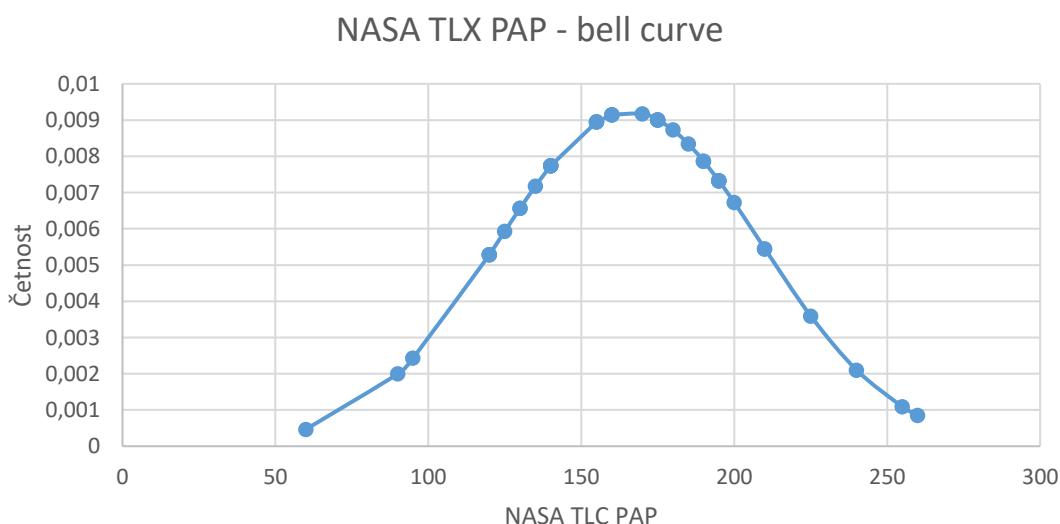


Obrázek 10-37: Q-Q plot NASA TLX AR [zdroj autor]

### NASA TLX PAP

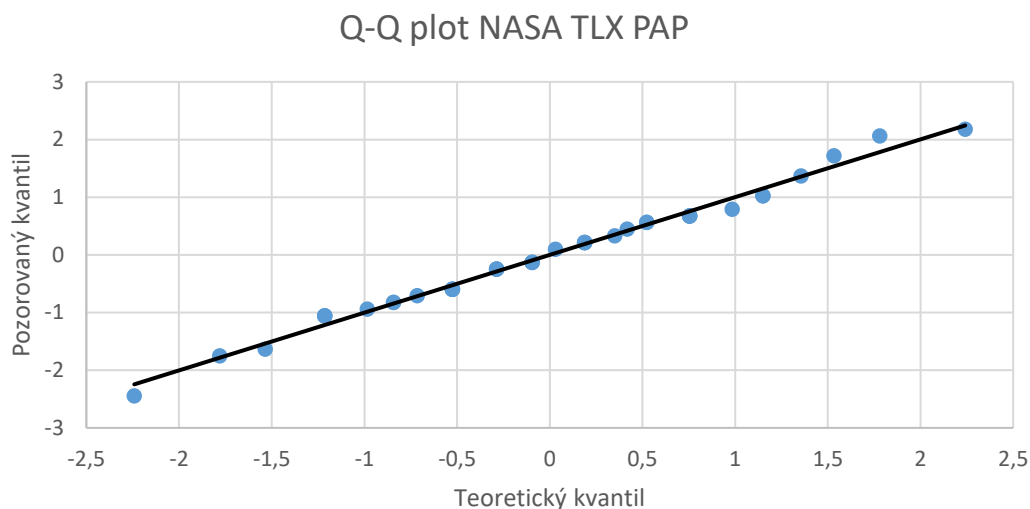
Pro druhou skupinu dat, která zahrnuje výsledky celkové mentální zátěže vnímané probandy při kontrole dílů s použitím konvenční metodiky, byl proveden Shapiro-Wilkův test s výslednou hodnotou  $W = 0,985$ . Porovnáním s kritickou hodnotou  $W$  byl potvrzen vztah, kdy  $W > W_{krit}$ ,  $p > 0,05$  a nulová hypotéza o normalitě datové sady proto není zamítnuta. Test ověřoval sadu celkem 40 dat skóre zátěže vnímané uživateli.

Normalitu rozdělení dat vykazuje také graf křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-38), který se tvarem blíží tvaru Gaussovy křivky.



Obrázek 10-38: NASA TLX PAP – bell curve [zdroj autor]

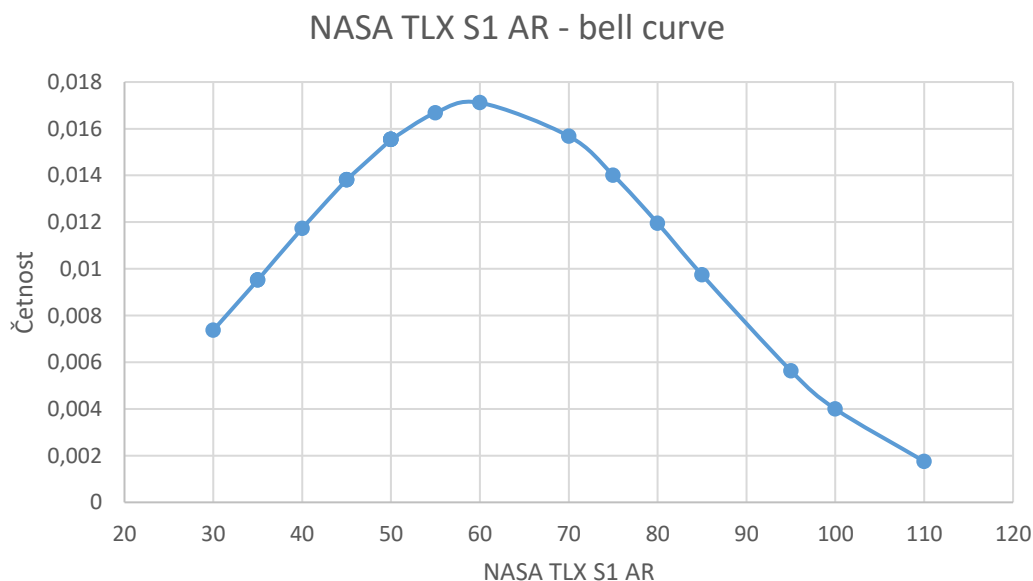
Stejně tak také Q-Q plot (Obrázek 10-39) pro tuto sadu dat zobrazuje rovnoměrné rozmístění bodů v okolí trendové křivky ideálního normálního rozdělení.



Obrázek 10-39: Q-Q plot NASA TLX PAP [zdroj autor]

### NASA TLX AR S1

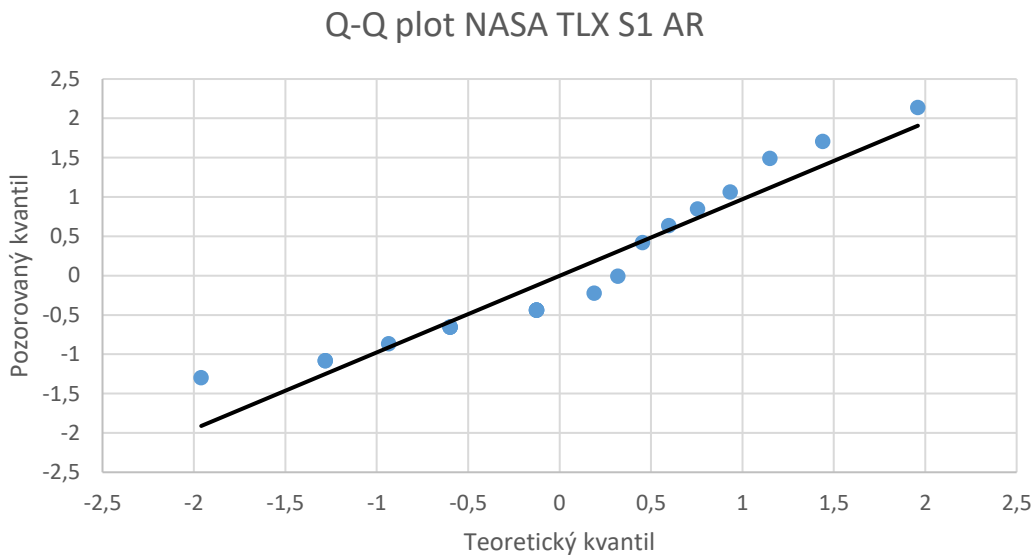
Po provedení testu normality dat pro údaje vnímané mentální zátěže všech probandů pro dva různé přístupy kontroly byly provedeny testy normálního rozdělení také pro tato data rozdělená celkem do 4 skupin v závislosti na kombinaci faktoru použitého přístupu a zároveň úrovně zkušeností probandů. Jako první byla testována skupina S1, tedy zkušení inspektoři, v závislosti na přístupu AR. Celkem tuto skupinu tedy tvořilo celkem 20 údajů o celkové vnímané zátěži probandy skupiny S1. Výpočtem Shapiro-Wilkova testu byla získána hodnota  $W = 0,909$ . Kritická hodnota  $W$  je  $0,905$ . Shapiro – Wilkův test tak potvrdil vztah  $W > W_{krit}$ ,  $p > 0,05$  a naznačuje, že testovaná data mají normální rozdělení. Tento závěr je potvrzen také vizuálním hodnocením grafu křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-40), který ukazuje charakteristický zvonový tvar pro normální distribuci dat.



Obrázek 10-40: NASA TLX S1 AR – bell curve [zdroj autor]



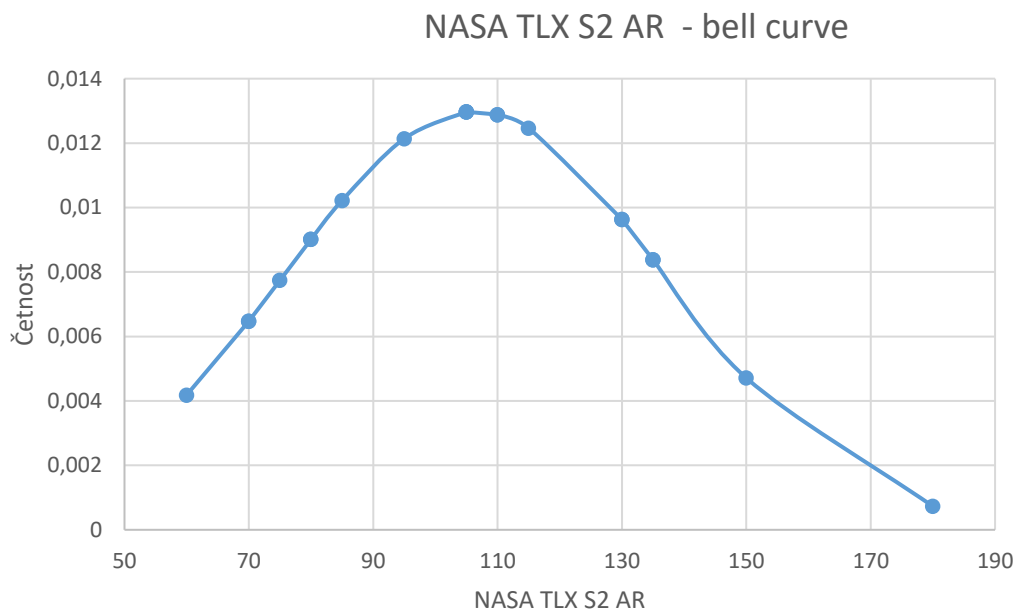
Také Q-Q graf (Obrázek 10-41) zobrazuje rovnoměrně rozmístěné body kolem křivky trendu a potvrzuje tím normální distribuci dat.



Obrázek 10-41: Q-Q plot NASA TLX S1 AR [zdroj autor]

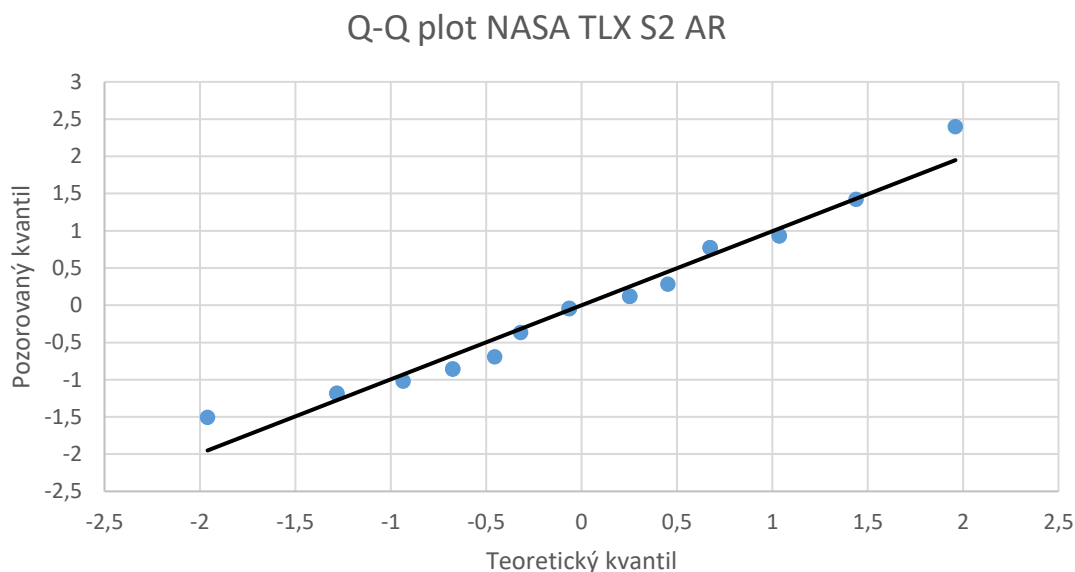
### NASA TLX AR S2

Analýza mentální zátěže vnímané uživateli při použití metodiky AR ve skupině S2 vykazuje hodnotu  $W = 0,958$ . Porovnání s kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$  naznačuje normální rozdělení, neboť  $W$  je větší než  $W_{krit}$ .



Obrázek 10-42: NASA TLX S2 AR – bell curve [zdroj autor]

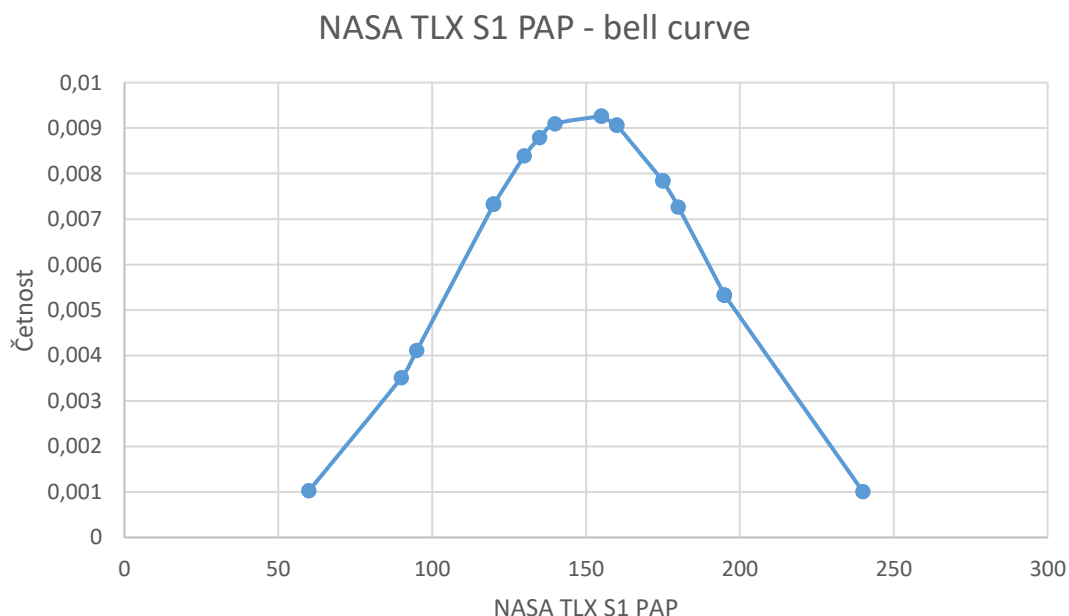
Tento závěr je dále podpořen vizuálním hodnocením grafu křivky normálního rozdělení (Obrázek 10-42) a Q-Q plotu (Obrázek 10-43).



Obrázek 10-43: Q-Q plot NASA TLX S2 AR [zdroj autor]

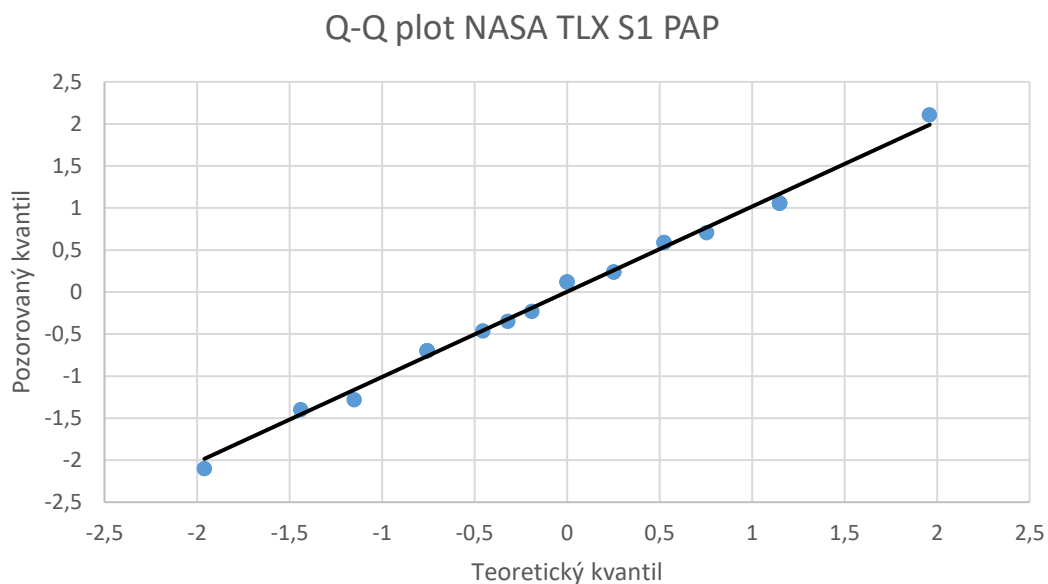
#### NASA TLX PAP S1

Shodná analýza byla provedena také pro skupinu S1 s použitím konvenční metodiky. S kritickou hodnotou  $W_{krit} = 0,905$  byla porovnána vypočtená  $W = 0,984$ . I pro tato data platí  $W > W_{krit}$ ,  $p > 0,05$ . Výsledek hodnoty Shapiro-Wilkova testu tedy naznačuje normální rozdělení dat.



Obrázek 10-44: NASA TLX S1 PAP – bell curve [zdroj autor]

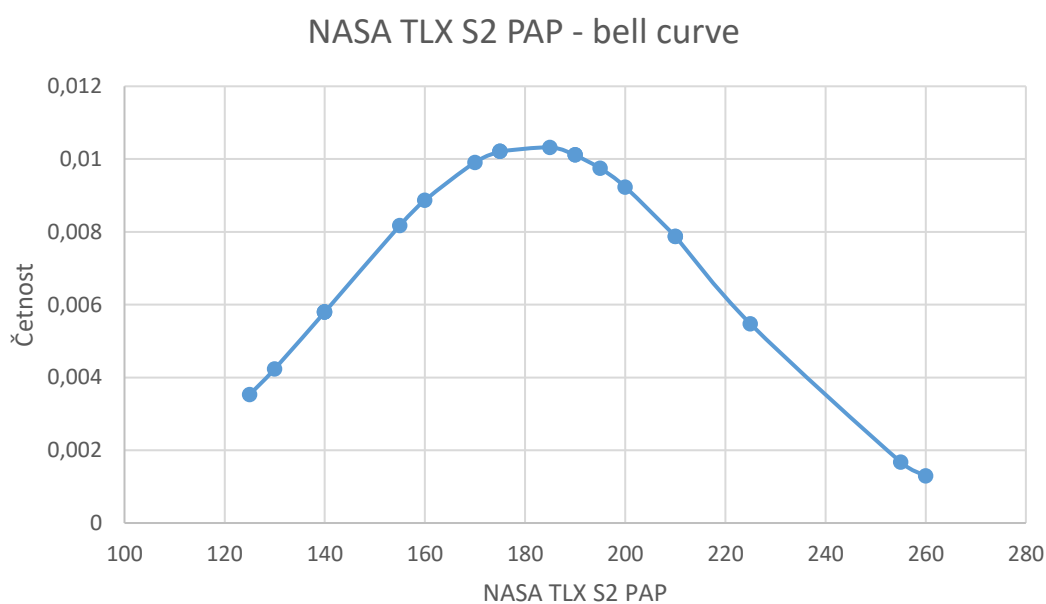
Stejné výsledky vykazují také grafické interpretace dat (Obrázek 10-44 a Obrázek 10-45).



Obrázek 10-45: Q-Q plot NASA TLX S1 PAP [zdroj autor]

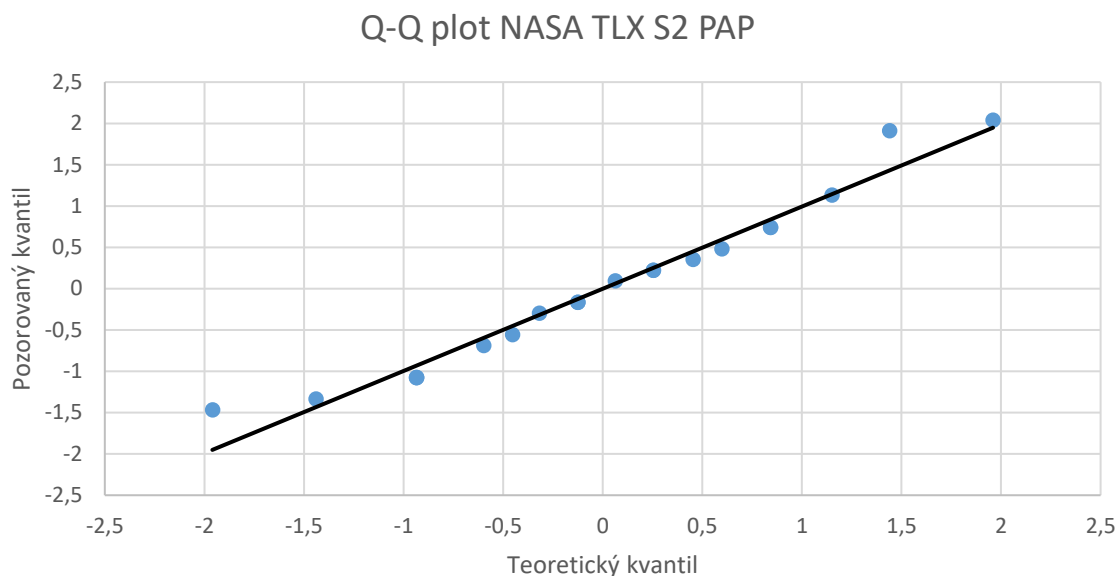
### NASA TLX PAP S2

Zjištěná vnímaná mentální zátěž uživatelů skupiny S2 při konvenční metodice vykazuje hodnotu  $W = 0,955$ . Při kritické hodnotě  $W_{krit} = 0,905$  platí vztah  $p > 0,05$  a  $W > W_{krit}$ . Není proto dostatek důkazů k zamítnutí nulové hypotézy, která tvrdí, že data mají normální rozdělení. Podobně je možné pozorovat tuto skutečnost na grafické interpretaci dat. Křivka normálního rozdělení (Obrázek 10-46) tvoří tvar podobný zvonu a blíží se tak tvaru Gaussovy křivky. Naznačuje proto normální distribuci dat.



Obrázek 10-46: NASA TLX S2 PAP – bell curve [zdroj autor]

Podobně interpretuje data také Q-Q plot (Obrázek 10-47), ze kterého je patrné, že data jsou rozmístěna v okolí přímky ideálního normálního rozdělení.



Obrázek 10-47: Q-Q plot NASA TLX S2 PAP [zdroj autor]

Pro všechny testované sady dat byl potvrzen předpoklad normálního rozdělení dat. Jedná se o důležitou informaci, neboť normální rozdělení dat je důležitý předpoklad pro další statistické testy.

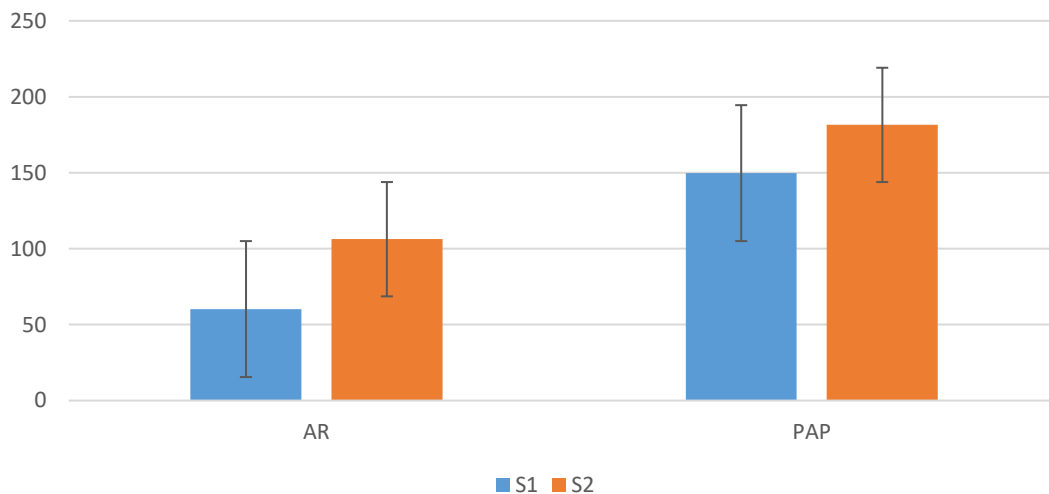
### 10.3.2 Dvoucestná ANOVA – mentální zátěž

Pro porozumění charakteru získaných dat byla provedena grafická analýza průměrné úrovně celkového skóre vnímané mentální zátěže a standardních chyb. Tato analýza umožňuje vizuálně porovnat průměrné hodnoty mentální zátěže mezi jednotlivými skupinami a zároveň poskytuje informace o rozptylu dat v každé skupině.

Cílem bylo porovnat výsledky celkové mentální zátěže v závislosti na míře zkušeností probandů a v závislosti na použitém přístupu pro kontrolu. V první skupině sloupců byly zobrazeny průměrné hodnoty mentální zátěže pro přístup AR, zatímco druhá skupina sloupců zobrazuje průměrná data pro mentální zátěž při konvenčním přístupu. V každé sadě je v prvním sloupci zobrazena zátěž vnímaná skupinou S1, druhý sloupec v každé sadě definuje zátěž skupiny S2.

Z grafu je patrné, že nejnižší průměrná hodnota vnímané mentální zátěže byla dosažena ve skupině S1 při použití AR přístupu (Obrázek 10-48). Druhá nejnižší hodnota byla vnímána u skupiny S2 při přístupu AR. Tato analýza poskytuje cenné informace o rozdílech ve vnímané mentální zátěži mezi uživateli v závislosti na zvoleném přístupu ke kontrole a úrovni zkušeností pracovníků. Výsledky naznačují, že AR přístup může přinášet snížení vnímané mentální zátěže u uživatelů ve srovnání s konvenční metodou. Tyto poznatky mají význam pro další vývoj a zkoumání interaktivních systémů a mohou sloužit jako podklad pro další vývoj uživatelských rozhraní s ohledem na mentální zátěž uživatelů.

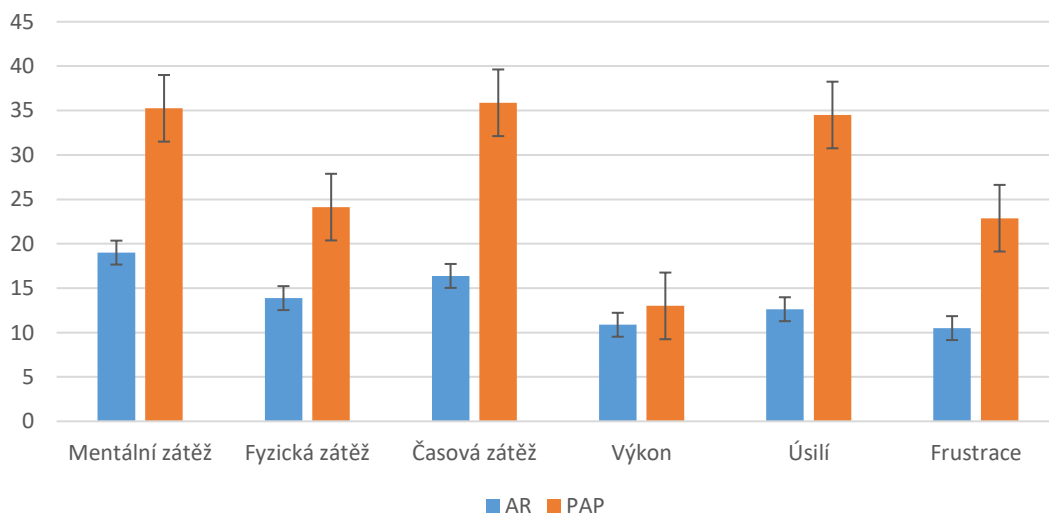
### Průměrná celková mentální zátěž



Obrázek 10-48: Průměrná celková mentální zátěž [zdroj autor]

Ve druhém grafu byly zobrazeny průměrné hodnoty mentální zátěže z hlediska jednotlivých dílčích oblastí (Obrázek 10-49). Tyto oblasti zahrnují mentální, fyzickou a časovou zátěž, výkon, úsilí a frustraci. Respondenti hodnotili úroveň mentální zátěže během kontroly ve vztahu k těmto aspektům.

### Průměrná dílčí mentální zátěž



Obrázek 10-49: Průměrná dílčí mentální zátěž [zdroj autor]

Probandi zodpovídali následující otázky:

1. Mentální zátěž: Jak moc byla náročná mentálně tato úloha?
2. Fyzická zátěž: Jak moc byla náročná fyzicky tato úloha?
3. Časová zátěž: Jak moc bylo tempo plnění úkolu uspěchané?

4. Výkon: Jak se vám podařilo splnit to, co jste dostali za úkol?
5. Úsilí: Jak usilovně jste museli pracovat, abyste dosáhli své úrovně výkonu?
6. Frustrace: Jak moc jste se v této úloze cítil(a) frustrovaný(á)?

Pro každou z uvedených oblastí mentální zátěže byly vypočteny průměrné hodnoty a standardní chyby pro oba použité přístupy, to znamená pro konvenční metodu a pro přístup AR. Tyto výsledky poskytují přehled o průměrné úrovni mentální zátěže v konkrétních oblastech a ukazují míru variability v těchto hodnotách.

Z grafu je patrné, že konvenční přístup vykazuje výrazně vyšší úroveň mentální zátěže ve většině zkoumaných oblastech ve srovnání s přístupem AR. Nejvyšší hodnoty mentální zátěže byly pozorovány při použití konvenční metody v oblastech mentální zátěže a úsilí. Tyto oblasti vykazují také nejvyšší rozdíly ve srovnání s přístupem AR. Nejmenší rozdíl mezi oběma přístupy vykazoval ukazatel výkonu.

Tyto výsledky naznačují, že přechod na AR přístup může mít potenciál snížit celkovou mentální zátěž uživatelů při kontrole. Tato data jsou důležitá pro hodnocení efektivity a použitelnosti jednotlivých metodik a mohou sloužit jako podklad pro rozhodování o vhodnosti použití metodiky AR v daném kontextu.

Následně byla provedena dvoucestná analýza rozptylu (ANOVA) pro sledovaná data mentální zátěže. Tato statistická metoda porovnává vliv dvou nezávislých proměnných (míry zkušenosti a použitého přístupu) na závislou proměnnou (mentální zátěž). Tato analýza umožňuje identifikovat, zda existují statisticky významné rozdíly mezi daty v závislosti na sledovaných faktorech nebo jejich interakci.

V následujícím přehledu (Obrázek 10-50) je uveden souhrn výsledků ANOVA analýzy. Porovnány jsou v ní 4 bloky dat, kdy každý blok obsahuje 20 náměrů, které reprezentují skóre standardizovaného dotazníku NASA TLX pro celkovou mentální zátěž. Cílem je zjistit, zda existují signifikantní rozdíly ve vnímané mentální zátěži mezi různými kombinacemi míry zkušeností a použitého přístupu.

Dvoucestná ANOVA testuje nulovou hypotézu, která předpokládá, že neexistuje žádný vliv faktorů zkušenosti a přístupu na celkovou mentální zátěž. Alternativní hypotéza naznačuje, že existují statisticky významné rozdíly mezi skupinami. Tento test je provedený na zvolené hladině významnosti 0,05.

Výsledkem ANOVA analýzy je hodnota F, která při překročení kritické hodnoty  $F_{krit}$  určuje zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Výsledky dvoucestné analýzy rozptylu (ANOVA) naznačují statisticky významné rozdíly ve vnímané mentální zátěži mezi různými kombinacemi faktorů zkušenosti a použitého přístupu. V rámci skupiny S1 bylo zjištěno, že použití AR přístupu mělo průměrnou hodnotu mentální zátěže 60,25, zatímco použití konvenční metody mělo průměrnou hodnotu 149,75. Celkový průměr pro skupinu S1 byl 105. Na druhé straně ve skupině S2 bylo zjištěno, že AR přístup měl průměrnou hodnotu mentální zátěže 106,25, zatímco konvenční metoda měla průměrnou hodnotu 181,5. Celkový průměr pro skupinu S2 byl 143,88.

Hodnota F pro porovnání skupin byla 25,20, což je výrazně vyšší než kritická hodnota  $F_{krit} = 3,97$ . P-hodnota je naopak velmi nízká, je tedy statisticky významná, což naznačuje, že

existuje signifikantní rozdíl ve vnímané mentální zátěži mezi AR přístupem a konvenčním přístupem.

Nicméně, interakce mezi faktory zkušenosti a přístupu nebyla statisticky významná, což naznačuje, že vliv těchto faktorů na vnímanou mentální zátěž není vzájemně závislý.

Celkově lze interpretovat výsledky tak, že použití konvenční metody vykazuje výrazně vyšší mentální zátěž ve srovnání s AR přístupem. Nejvyšší hodnoty mentální zátěže byly pozorovány u časové zátěže a úsilí při použití konvenční metody. Nejmenší rozdíly byly pozorovány v oblasti výkonu. Tato data podporují závěr, že AR přístup může přinášet výhody ve snižování vnímané mentální zátěže ve srovnání s konvenční metodikou.

#### ANOVA: DVA FAKTORY S OPAKOVÁNÍM

FAKTOR	NASA TLX AR TOT	NASA TLX PAP TOT	Celkem				
<b>S1</b>							
POČET	20	20	40				
SOUČET	1205	2995	4200				
PRŮMĚR	60,250	149,750	105,000				
ROZPTYL	543,355	1827,566	3208,974				
<b>S2</b>							
POČET	20	20	40				
SOUČET	2125	3630	5755				
PRŮMĚR	106,250	181,500	143,875				
ROZPTYL	944,408	1481,842	2633,958				
<b>CELKEM</b>							
POČET	40	40					
SOUČET	3330	6625					
PRŮMĚR	83,250	165,625					
ROZPTYL	1267,372	1870,753					
<b>ANOVA</b>							
<b>ZDROJ VARIABILITY</b>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>	<i>test signifikance</i>
S1/S2	30225,313	1	30225,313	25,203	3,313E-06	3,967	faktor je významný
AR/PAP	135712,813	1	135712,813	113,161	1,046E-16	3,967	faktor je významný
INTERAKCE	1015,313	1	1015,313	0,847	0,360	3,967	faktor není významný
DOHROMADY	91146,250	76	1199,293				
CELKEM	258099,688	79					

Obrázek 10-50: Dvoucestná ANOVA – mentální zátěž [zdroj autor]

### 10.3.3 Párový t-test – mentální zátěž

Po provedení analýzy rozptylu (ANOVA) pro mentální zátěž byl proveden t-test, který umožňuje porovnání jednotlivých párů skupin. Zatímco ANOVA testuje celkový rozdíl mezi skupinami, t-test se zaměřuje na konkrétní páry skupin a testuje statistickou významnost rozdílu mezi jejich středními hodnotami. T-test poskytuje specifické informace o rozdílu mezi dvěma skupinami, což je při detailnějším zkoumání výsledků užitečné. Pomocí t-testu je možné získat přesnější a specifitější porozumění tomu, zda jsou rozdíly mezi skupinami statisticky významné.

Pro provedení t-testu byly definovány následující dílčí nulové a alternativní hypotézy:

H3.1(0): „Neexistuje rozdíl v mentální zátěži při kontrole mezi přístupem AR a konvenčním přístupem u všech probandů.“

H3.2(1): „Všichni probandi dokončí kontrolu s přístupem AR s nižší mentální zátěží než s konvenčním přístupem.“

H3.2(0): „Neexistuje rozdíl v mentální zátěži při kontrole u skupiny S1 při použití přístupu AR a přístupu konvenčního.“

H3.2(1): „S1 dokončí kontrolu s přístupem AR s nižší mentální zátěží než s konvenčním přístupem.“

H3.3(0): „Neexistuje rozdíl v mentální zátěži při kontrole u skupiny S2 při použití přístupu AR a přístupu konvenčního.“

H3.3(1): „S2 dokončí kontrolu s přístupem AR s nižší mentální zátěží než s konvenčním přístupem.“

V následujícím přehledu (Obrázek 10-51) jsou shrnuty výsledky t-testů pro výše uvedené hypotézy. Test byl provedený na zvolené hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

	STŘEDNÍ HODNOTA	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	T HODNOTA	P HODNOTA	POČET POZOROVÁNÍ	STUPNĚ VOLNOSTI
<b>H3.1</b>	83,250	35,600	9,300	1,413E-14	40	78
	165,625	43,252			40	
<b>H3.2</b>	60,250	23,310	8,220	2,936E-10	20	38
	149,750	42,750			20	
<b>H3.3</b>	106,250	30,731	6,832	2,077E-08	20	38
	181,500	38,495			20	

Obrázek 10-51: T-testy – mentální zátěž [zdroj autor]



Z těchto výsledků plynou následující výstupy:

**H3.1.:** T-test potvrdil hypotézu, že všichni uživatelé provedou kontrolu s přístupem AR (M = 83,25, SD = 35,60, n=40) rychleji než s konvenčním přístupem (M = 165,63, SD = 43,25, n = 40). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(78) = 9,30$ ,  $p = 1,413E-14$ .

**H3.2:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S1 provede s přístupem AR (M = 60,25, SD = 23,31, n=20) s nižší mentální zátěží než s konvenčním přístupem (M = 149,75, SD = 42,75, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = 8,22$ ,  $p = 2,936E-10$ .

**H3.3:** T-test potvrdil hypotézu, že skupina S2 provede s přístupem AR (M = 106,25, SD = 30,73, n=20) s nižší mentální zátěží než s konvenčním přístupem (M = 181,50, SD = 38,49, n = 20). Zjištěný rozdíl je statisticky významný,  $t(38) = 6,83$ ,  $p = 2,077E-08$ .

Výsledky t-testu pro všechny definované dílčí hypotézy vedly k zamítnutí nulových hypotéz a potvrzení hypotéz alternativních. Na základě toho je možné vyvodit statisticky významné rozdíly mezi sledovanými sadami dat. Statistické párové otestování signifikantních rozdílů mezi skupinami tak poskytlo další důležité informace o rozdílech mezi sledovanými proměnnými.

## 10.4 SUS

Za závěr statistické analýzy byla také zkoumána míra použitelnosti navrženého řešení. Pro hodnocení použitelnosti bylo provedeno testování s pomocí standardizovaného dotazníku SUS (System Usability Scale). SUS je široce používaný nástroj pro měření subjektivního vnímání použitelnosti systému, metodiky nebo nástroje. Ukázka SUS dotazníku je zobrazena v příloze 5.

SUS se skládá z 10 otázek, které pokrývají různé aspekty použitelnosti, jako je jednoduchost, efektivita, přívětivost a celková spokojenost se systémem. Odpovědi na otázku jsou vyhodnocovány na pětistupňové Likertově škále, kde respondenti vybírají jednu z možných odpovědí od „silně nesouhlasím“ po „silně souhlasím“.

V experimentu po dokončení kontroly vyplnili probandi SUS dotazník a vyjádřili tak své hodnocení použitelnosti navrženého řešení. Výsledkem testování byla průměrná hodnota SUS skóre, která poskytuje míru celkové použitelnosti systému.

V následujícím přehledu (Obrázek 10-52) jsou zobrazeny výsledné hodnoty SUS testování.

SKUPINY/SUS	SUS	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
S1	95,50	4,97
S2	93,88	4,67
S1+S2	94,69	4,94

Obrázek 10-52: Výsledky SUS testování [zdroj autor]

Celková průměrná hodnota SUS skóre v experimentu byla 94,69, což naznačuje vysokou míru použitelnosti navrženého řešení a velkou spokojenost probandů. Při zaměření pozornosti na jednotlivé skupiny, průměrná hodnota SUS skóre pro skupinu S1 byla 95,50 a pro skupinu S2 byla 93,88. Směrodatná odchylka celkově byla 4,94, pro skupinu S1 4,97 a pro skupinu S2 4,67.

Tyto výsledky naznačují, že obě skupiny uživatelů hodnotily navržené řešení jako velmi použitelné. Skupina S1 dosáhla mírně vyššího SUS skóre než skupina S1, což může naznačovat, že zkušební pracovníci dostáli vyšší úrovně spokojenosti a hodnotili pozitivně použitelnost systému.

Celkově lze tedy konstatovat, že navržené řešení dosáhlo vysokého stupně použitelnosti, což představuje pozitivní ukazatel efektivity a použitelnosti systému z pohledu uživatelů. Tato zjištění potvrzují skutečnost, že navržené řešení má potenciál uspokojit uživatele a přispět k pozitivní uživatelské zkušenosti.

## 10.5 Obecné hodnocení AR přístupu

Přestože většina účastníků zapojených do experimentální studie neměla s rozšířenou realitou žádné nebo minimální praktické zkušenosti, po seznámení s navrhovaným AR přístupem převládá pozitivní postoj k jejímu potenciálnímu využití v kontextu kontroly kvality svařenců v průmyslových procesech.

<b>Přínosy</b>	Okamžitá dostupnost
	Interaktivní 3D vizualizace
	Zobrazení přímo na díl, nedělení pozornosti
<b>Limity</b>	Obavy z dostatečné úrovně přesnosti
	Potřeba dobré znalosti i pro drobné změny a úpravy

Účastníci vyzdvihovali především dobrou dostupnost AR řešení pro pomoc inspektorům v dané oblasti. Podle účastníků zapojených do studie může AR jako mobilní nástroj pomoci pracovníkům bezprostředněji se soustředit na zkoumaný produkt. Hodnotí jako užitečné mít možnost přístupu k relevantním informacím přímo u sledovaného objektu. Takto dostupná AR může podporovat uživatele různými způsoby. Uživatelé pozitivně hodnotili možnost okamžité dostupnosti relevantních dat včetně jejich vizuální interpretace, která eliminuje nutnost nejprve připravovat tištěnou dokumentaci pro zahájení kontrolních operací. Další z účastníků zmiňují podporu při identifikaci dílu, kdy díky automatizovanému rozpoznávání kontrolovaného dílu není možné díl zaměnit s dalšími velmi podobnými produkty.

Současně si probandí všímají vysokého potenciálu využití AR v rámci komplexních kontrolních procesů v průmyslových aplikacích. Podle jejich komentářů by se AR mohla stát jedním z vysoce účinných nástrojů na podporu řešení úkolů. Jeden z účastníků konkrétně komentuje přínos v případě opakovaně střídavé kontroly velmi podobných dílů v rychlém sledu a zmiňuje, že AR může být využita jako výkonný nástroj pro interaktivní vizualizaci a podporu i méně kvalifikovaného nebo zkušeného uživatele.

Účastníci v několika případech také uvádějí skutečnost, že u inspektorů s menšími zkušenosti nebo odbornými znalostmi, by mohl navrhovaný přístup pomoci posunout hranici úloh, které jsou tito kontroloři schopni posoudit a rozhodnout samostatně oproti konvenčním metodám, kdy proces rozhodování v těchto případech přesahuje jejich možnosti a musí vyhledávat podporu zkušenějšího supervisory.

Dalším významným přínosem zavedení rozšířené reality je podle několika účastníků její schopnost 3D vizualizace. Bylo zjištěno, že interaktivní 3D vizualizace pomáhá při přesnější analýze úkolů. Účastníci se shodovali, že by uvítali zapojení AR přístupu do konkrétních aplikací v rámci jejich běžné praktické pracovní náplně.

Většina probandů se shodovala, že AR by mohla být velmi přínosná při řešení kontrolních úkolů díky své schopnosti interaktivní vizualizace. Několik probandů by uvítalo využití AR přístupu nejen jako výstupní kontrolu svařence, ale také již jako nástroje pro průběžnou samokontrolu svařence během přípravy operace, interpretace svarů, rozvrhování svarů na reálný kus a průběžnou kontrolu plnění předepsaných charakteristik.

Co se týká výzev při uplatnění AR při kontrole kvality v průmyslovém procesu, přestože u probandů převažovaly pozitivní ohlasy na AR přístup, je třeba mít na paměti, že AR stále není ve většině průmyslových odvětví více rozšířena. Pro lepší pochopení možností, jak aplikovat AR v průmyslové kontrole kvality a zvýšit její použitelnost, byly sledovány také výzvy zmiňované účastníky.

Jednou z těchto výzev byla lehkost používání. Někteří účastníci upozornili na obavu při kontrole rozměrnějších a tvarově komplexnějších výrobků. Sada dílů pro experimentální studii byla z hlediska rozměrů poměrně dobře manipulovatelná a dobře dostupná. Tato skutečnost pravděpodobně přispěla k tomu, že během studie se nevyskytly žádné větší problémy s rozpoznáváním dílu nebo zarovnáním digitální vizualizace na reálný objekt. Účastníci se shodovali, že vzhledem k povaze dané úlohy, tedy kontroly kvality na hotovém svařenci, nepovažují za limitující ani nutnost držení HHD a tím omezení pohybů rukou.

Jeden z účastníků zmínil obavu z nedostatečné flexibility AR řešení, které vyžaduje specializovanou znalost AR technologie. Díky tomu může být zdlouhavé provádět i malé úpravy v AR vizualizaci.

## 11 Diskuze

V této části jsou diskutovány výsledky provedeného výzkumu, přínosy pro průmyslové i akademické prostředí a doporučení pro budoucí výzkum.

Cílem tohoto výzkumu bylo navrhnout obecnou metodiku vizuální kontroly kvality svařenců a hodnotit vliv navrženého AR přístupu na výkonnost provedení kontroly kvality svařence a mentální zátěž uživatelů v podmínkách reálného průmyslového pracoviště.

Výsledky experimentu s uživateli ukazují, že použití AR při kontrole kvality svařenců vede ke zvýšení efektivity provedení tohoto úkolu, tedy ke zkrácení času provedení kontroly ve srovnání s tištěnou papírovou dokumentací. Tyto výsledky jsou v souladu s podobnými studiemi, které sledovaly provedení úkolu a zaznamenaly zvýšení efektivity provedení činnosti s podporou AR ve srovnání s papírovými instrukcemi [156], [157], [158] a video instrukcemi [159], [160]. Řada dostupných studií naopak zaznamenala opačný trend, tedy snížení efektivity provedení úkolu při zapojení AR podpory [161], [162]. Nižší efektivitu provedení montážní operace v těchto studiích může vysvětlovat prostorové rozmístění instrukcí a jejich delší hledání a orientaci při úkolu. Naopak zvýšení efektivity kontrolního procesu může vysvětlovat charakter designu experimentu. V tomto experimentu kontrolovali uživatelé svařence rozměrově charakterizované od 300 do 800 mm a od 2 kg do 7 kg. Byla pro ně proto poměrně jednoduchá manipulace s těmito svařenci. Na rozdíl od tradičních instrukcí nemuseli inspektoři dělit pozornost a porovnávací metodou zobrazení ideálního 3D modelu přes reálný svařenec provedl i méně zkušený inspektor poměrně rychlou úvodní orientaci na dílu a kontrolu základní kompletnosti a základních rozměrů bez nutnosti detailního přeměřování.

V tomto výzkumu byla pozorována relativně nízká průměrná chybovost, respektive opomenutí odhalení randomizovaně rozmístěných chyb na dílech nebo nesprávné označení bezchybného dílu za chybný. V průměru byla pozorována nižší chybovost s použitím AR přístupu ve srovnání s konvenčními tištěnými podklady. Pro zvolenou hladinu významnosti  $\alpha=0,05$  však nebyl zjištěn statisticky významný pokles chybovosti pro navržené AR řešení. V podobných studiích z oblasti montážních výzkumů byl zjištěn pokles montážních chyb [163], [159], [137]. V kontrolních operacích je nicméně charakter chybovosti odlišný od montážních úkolů. V montážních aplikacích je proveden montážní úkol a chyby v jeho provedení. V kontrolních úkolech je kontrolován již dokončený výrobní proces a porovnáván s požadovaným ideálním stavem.

Vedle vlivu na efektivitu a chybovost bylo sledováno zapojení AR přístupu také z hlediska vnímané mentální zátěže uživateli. Tato zátěž byla hodnocena standardizovaným dotazníkem NASA TLX. Během experimentu vnímali uživatelé nižší mentální zátěž ve srovnání s konvenčním přístupem s papírovými podklady. Tento pozitivní výsledek potvrzuje, že navržený AR přístup může snížit mentální zátěž při kontrole kvality svařenců díky snížení dělení pozornosti mezi předepsané požadavky na design dílu a reálný díl. Tento výsledek potvrzuje, že je možné snížit mentální zátěž, zvýšit koncentraci uživatele a podpořit tak efektivitu provedení kontrolního úkolu. Podobné výsledky potvrzují také další dostupné studie [163], [159], [164], [165].

Kromě výsledků efektivity byla v závěrečných dotaznících Usability SUS a v rozhovorech po experimentu hodnocena použitelnost a míra akceptace navrženého řešení pozitivně. Probandi upřednostnili AR řešení před konvenčním přístupem s tištěnými podklady. Použitelnost navrženého nástroje byla hodnocena pozitivně probandy průměrným skóre

94,69 na škále 0 až 100. Toto hodnocení odpovídá úrovni A+ a vyjadřuje vysokou spokojenost uživatelů s použitým řešením. Dostupné studie se obecně shodují na hranici přijatelnosti nad 70 bodů [166], [167]. Probandi oceňovali možnost rychlého porovnání kontrolovaného dílu a ideálního modelu, rychlou orientaci při interpretaci požadavků. K vysokému stupni použitelnosti mohla přispět úzká spolupráce s odborníky z průmyslové praxe při návrhu AR přístupu a provedení pilotní studie pro zjištění limitů navrhovaného řešení. Díky použití HHD bylo také možné pro uživatele volně se pohybovat na pracovišti při kontrole dílu bez omezení v souvislosti s hardware.

Obecně je tedy možné vyvodit závěr, že navržené AR řešení by bylo možné využít pro inspektory a operátory v průmyslové praxi při kontrole kvality svařenců pro zjištění neshod s požadovaným stavem a hodnocení kvality svařenců.

## 12 Přínosy disertační práce

Mezi hlavní ukazatele každého průmyslového podniku patří produktivita a výkonnost. Disertační práce poskytuje inovativní pohled na zvýšení produktivity a podporu pracovníků při kontrole svařenců přímo na pracovišti. Na základě všech získaných poznatků lze provést shrnutí přínosů disertační práce nejprve do teoretických přínosů a následně do přínosů pro podnikovou praxi.

### 12.1 Teoretický přínos práce

Teoretickým přínosem tohoto výzkumu bylo ověření, zda navržená metodika pro kontrolu s podporou AR má potenciál zvýšit efektivitu provádění kontroly koncovými uživateli, snížit chybovost jejich práce a zároveň nezvyšovat, nebo naopak snižovat mentální zátěž vnímanou uživateli.

Teoretické přínosy je možné shrnout v následujících bodech:

- Vytvoření přehledu současného stavu používání AR ke kontrole kvality v průmyslových aplikacích.
- Návrh obecného metodického přístupu ke kontrolnímu procesu pro zpracování a vizualizaci dat při průmyslové kontrole.
- Integrace technologie AR pro podporu vizualizace dat, jejich interpretaci, posouzení kontrolovaného dílu a rozhodování na pracovišti.

### 12.2 Praktický přínos práce

Praktickým přínosem je přiblížení technologie AR specializovaným oblastem kontroly v průmyslových procesech, u kterých není plná automatizace vhodná nebo možná.

Praktické přínosy mohou být shrnuty v následujících bodech:

- Vytvoření komplexního AR přístupu pro podporu inspektorů kvality pro kontextovou analýzu vizualizace dat a kontrolovaného výrobku pomocí HHD AR.
- Zprostředkování imerzivního prostředí a interaktivních vizualizací pro snazší pochopení a interpretaci dat, pro zvýšení výkonnosti a uživatelského zážitku.
- Návrh a provedení komparativní studie pro prokázání efektivitu navrhovaného AR přístupu ve srovnání s konvenčními metodami a získání zpětné vazby.
- Zkoumání účinku navrženého AR přístupu a pomocných AR vizualizací na efektivitu plnění kontrolního úkolu.
- Statistické zpracování získaných výsledků a zkušeností z měření uživatelů během experimentu

### 12.3 Doporučení pro další výzkum

Uvedený výzkum má vedle prokázaných přínosů také omezení. Hlavní z nich souvisí s použitou metodou object detection. Na rozdíl od metody image detection nevyžaduje použití dodatečných markerů ve scéně, samotný kontrolovaný objekt slouží jako target a tato metoda má proto velmi vysoký potenciál pro nasazení i do průmyslových aplikací. Na rozdíl od metody image target však dosud není technologicky možné detekovat v jedné scéně více než

jeden objekt. Při rozpoznávání více objektů je zatím proto nutné tyto metody kombinovat. Po dostatečném technologickém vývoji této metody by bylo přínosné otestovat tuto metodu při experimentu s uživateli formou multiobject recognition.

Další omezení souvisí se světelnými podmínkami a trackingem sledovaného objektu. Během experimentu fungovala detekce object targetu bezproblémově za standardních světelných podmínek na pracovišti bez nutnosti dodání dodatečného světelného zdroje. Při delší kontrole nebo větším pohybu kolem kontrolovaného dílu se v některých chvílích odpojila vizualizace od targetu a bylo potřeba opětovně ukotvit scénu. V budoucím výzkumu by bylo přínosné testovat na dlouhodobém pozorování spolehlivost vizualizace a trackingu AR při rozpoznávání object targetu.

Experimentální ověření celé navržené metodiky řízení kvality s podporou AR přesahuje rámec tohoto výzkumu. Komplexní dlouhodobé ověření celého navrženého metodického rámce pro kontrolu kvality je jedním z hlavních doporučení pro budoucí směr výzkumu.

## Závěr

Provedený výzkum se věnoval problematice kontroly kvality svařence v průmyslových procesech. Kontrolní úkoly patří obecně mezi činnosti, které nepřidávají výrobku hodnotu, ale přesto jsou nezbytnou součástí všech průmyslových procesů. Naopak je v průmyslu patrný trend stále rostoucích nároků na bezchybnou úroveň kvality. Z tohoto důvodu je potřeba provádět průmyslovou kontrolu s co nejvyšší efektivitou. S rozvojem čtvrté průmyslové revoluce se postupně rozvíjejí možnosti automatizace. Zatímco pro některé obory je možné zavedení vyššího stupně automatizace, pro jiné typy výroby není zavedení vysokého stupně automatizace vhodné. Jedná se například o malosériovou výrobu, produkty s krátkým životním cyklem nebo vysokou frekvencí technických změn nebo úprav designu. Tento výzkum se proto zaměřoval na zkoumání možnosti zavedení nižšího stupně automatizace pro tyto typy výrob. Ve zvoleném stupni automatizace je proces posouzení a rozhodování závislý na inspektorovi. Při procesu interpretace požadavků, posouzení dílu a rozhodování je však podpořen technologickým řešením. V případě tohoto výzkumu je tímto technologickým řešením podpora rozšířené reality.

Provedením teoretické rešerše byla identifikována mezera ve výzkumu. Dosud žádný výzkum se nezabýval využitím AR přístupu ke kontrole svařence s použitím object recognition a se zaměřením na efektivitu, chybovost a mentální zátěž. Pro tento experiment byl navržen a vyvinut software AR, který uživatele provádí kontrolním procesem během experimentu namísto tradiční tištěné dokumentace. V průběhu výzkumu byl navržený hrubý metodický rámec adaptován do finální podoby.

Definovány byly tři hlavní hypotézy, které byly následně testovány v průběhu experimentu. První z nich se věnuje efektivitě provedení kontrolního úkolu a vlivu navrženého AR přístupu na tuto efektivitu. Úroveň efektivit byla v experimentu definována celkovým časem dokončení úkolu, tedy rychlostí, s jakou proband provedl inspekci celé kontrolní sady. Tento ukazatel byl testován ve dvou variantách, a sice s podporou konvenčního kontrolního přístupu a s podporou navrženého AR přístupu. Zároveň byl sledován aspekt zkušeností uživatelů. Provedená statistická analýza poskytuje důkazy o existenci statisticky významného rozdílu ve výkonu uživatelů v závislosti na použitém přístupu ke kontrole svařence. Tyto výsledky podporují původní hypotézu, která předpokládala, že použití přístupu AR povede k rychlejšímu dokončení kontrolního úkolu ve srovnání s tradiční metodou s podporou tištěné dokumentace. Zjištění naznačují, že AR přístup má relativně větší přínos pro skupinu nezkušených probandů než pro zkušené inspektory.

Druhá definovaná hypotéza sleduje vliv navrženého AR přístupu na úroveň chybovosti. Celkově je možné shrnout výsledky analýzy tak, že byly nalezeny statisticky významné rozdíly v chybovosti mezi sledovanými skupinami dat, nicméně testy provedené v rámci post hoc analýzy nedokázaly identifikovat konkrétní páry skupin s významnými rozdíly. Toto zjištění naznačuje, že pro další výzkum by bylo vhodné použít rozšířenější statistické metody nebo výrazně zvýšit velikost vzorku, aby byla získána přesnější a komplexnější analýza dat chybovosti.

Třetí hypotéza se věnovala dopadu použitého přístupu na úroveň vnímané mentální zátěže. Během experimentu bylo statisticky potvrzeno, že použití konvenční metodiky vykazuje výrazně vyšší mentální zátěž ve srovnání s AR přístupem. Nejvyšší hodnoty mentální zátěže byly pozorovány u časové zátěže a úsilí při použití konvenční metody. Nejmenší rozdíly



byly pozorovány v oblasti výkonu. Tato data podporují závěr, že AR přístup může přinášet výhody ve snižování vnímané mentální zátěže ve srovnání s konvenční metodikou.

Uživatelé hodnotili v rámci experimentu také použitelnost navrženého řešení. Skóre použitelnosti dosahovalo vysokých hodnot, které korespondují s kategorií použitelnosti hodnocenou jako „výborná“.

Provedený experiment, statistické vyhodnocení dat z experimentu a výsledky testování hypotéz potvrdily, že s použitím navrženého kontrolního přístupu AR je možné zvýšit efektivitu provedení kontroly kvality svařence v průmyslovém procesu a zároveň snížit mentální zátěž vnímanou uživateli. Výsledky naznačují, že použití AR řešení může vést také ke snížení chybovosti, pro možnost statistického potvrzení by bylo potřeba provést rozsáhlejší výzkum.

## Seznam použité literatury

- [1] SYAM, Wahyudin P., Konstantin RYBALCENKO, André GAIO, Joseph CRABTREE a Richard K. LEACH. Methodology for the development of in-line optical surface measuring instruments with a case study for additive surface finishing. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2019, **121**, 271–288 [vid. 2021-11-21]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/J.OPTLASENG.2019.04.015
- [2] *Management of Inspection and Quality Control – Juran – Mookambika Metallurgical Solutions* [online]. [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://mmsallaboutmetallurgy.com/2018/09/26/management-of-inspection-and-quality-control-juran/amp/>
- [3] MASOOD, Tariq a Johannes EGGER. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Computers in Industry* [online]. 2020, **115** [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2019.07.002
- [4] KUMAR, Amit, Vikas CHAUHAN a Ankur GB SINGH BIST. Role of Artificial Neural Network in Welding Technology: A Survey. *International Journal of Computer Applications*. 2013, **67**(1), 975–8887.
- [5] SEMENIUTA, Oleksandr, Sebastian DRANSFELD, Kristian MARTINSEN a Petter FALKMAN. Towards increased intelligence and automatic improvement in industrial vision systems. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **67**, 256–261. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2017.12.209
- [6] JOHANSEN, Kerstin, Sagar RAO a Milad ASHOURPOUR. The Role of Automation in Complexities of High-Mix in Low-Volume Production – A Literature Review. *Procedia CIRP* [online]. 2021, **104**, 1452–1457 [vid. 2023-08-21]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCIR.2021.11.245
- [7] PARKER, Sharon K. a Gudela GROTE. Automation, Algorithms, and Beyond: Why Work Design Matters More Than Ever in a Digital World. *Applied Psychology* [online]. 2022, **71**(4), 1171–1204 [vid. 2023-08-21]. ISSN 14640597. Dostupné z: doi:10.1111/APPS.12241
- [8] COLLEDANI, Marcello, Tullio TOLIO, Anath FISCHER, Benoit IUNG, Gisela LANZA, Robert SCHMITT a József VÁNCZA. Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2014, **63**(2), 773–796. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2014.05.002
- [9] IMKAMP, Dietrich, Jürgen BERTHOLD, Michael HEIZMANN, Karin KNIEL, Eberhard MANSKE, Martin PETEREK, Robert SCHMITT, Jochen SEIDLER a Klaus-Dieter SOMMER. Challenges and trends in manufacturing measurement technology-the „Industrie 4.0" concept. *J. Sens. Sens. Syst* [online]. 2016, **5**, 325–335 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.5194/jsss-5-325-2016
- [10] WILLIAM WINCHELL. *Inspection and Measurement in Manufacturing*. B.m.: Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 0-87263-474-4.
- [11] KOREN, Yoram, Xi GU a Weihong GUO. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2018, **13**(2), 121–136. ISSN 20950241. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-018-0483-0

- [12] BABU, Manoj, Pasquale FRANCIOSA a Darek CEGLAREK. Adaptive Measurement and Modelling Methodology for In-line 3D Surface Metrology Scanners. *Procedia CIRP* [online]. 2017, **60**, 26–31. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2017.01.009
- [13] GEWOHN, Marco, Thomas USLÄNDER, Jürgen BEYERER a Gerhard SUTSCHET. Digital Real-time Feedback of Quality-related Information to Inspection and Installation Areas of Vehicle Assembly. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **67**, 458–463 [vid. 2023-08-21]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCIR.2017.12.242
- [14] ROBINSON, Lawrence W., John O. MCCLAIN a L. JOSEPH THOMAS. The good, the bad and the ugly: Quality on an assembly line. <http://dx.doi.org/10.1080/00207549008942767> [online]. 2007, **28(5)**, 963–980 [vid. 2022-02-20]. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207549008942767
- [15] PFEIFER, T. *Production Metrology* [online]. 1st edn. B.m.: De Gruyter., 2015 [vid. 2023-08-17]. ISBN 9783486810424. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/725001/production-metrology-pdf>
- [16] KUNZMANN, H., T. PFEIFER, R. SCHMITT, H. SCHWENKE a A. WECKENMANN. Productive Metrology - Adding Value to Manufacture. *CIRP Annals* [online]. 2005, **54(2)**, 155–168 [vid. 2021-10-28]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60024-9
- [17] BAYKAL, Ibrahim Cem. Inspection of Screw Holes on Machine Parts Using Robot Vision. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018* [online]. 2019 [vid. 2022-02-20]. Dostupné z: doi:10.1109/IDAP.2018.8620904
- [18] DEY, Bikash Koli, Sarla PAREEK, Muhammad TAYYAB a Biswajit SARKAR. Autonomation policy to control work-in-process inventory in a smart production system. *International Journal of Production Research* [online]. 2021, **59(4)**, 1258–1280 [vid. 2023-08-21]. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2020.1722325
- [19] AUST, Jonas a Dirk PONS. Comparative Analysis of Human Operators and Advanced Technologies in the Visual Inspection of Aero Engine Blades. *Applied Sciences* [online]. 2022, **12(4)**. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12042250
- [20] PHUYAL, Sudip, Diwakar BISTA a Rabindra BISTA. Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review. *Sustainable Futures* [online]. 2020, **2**, 100023 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2666-1888. Dostupné z: doi:10.1016/J.SFTR.2020.100023
- [21] TSUZUKI, Ryoichi. Development of automation and artificial intelligence technology for welding and inspection process in aircraft industry. *Welding in the World* [online]. 2022, **66(1)**, 105–116 [vid. 2023-08-21]. ISSN 18786669. Dostupné z: doi:10.1007/S40194-021-01210-3/FIGURES/13
- [22] LI, Yingguang, Changqing LIU, James X. GAO a Weiming SHEN. An integrated feature-based dynamic control system for on-line machining, inspection and monitoring. *Integrated Computer-Aided Engineering* [online]. 2015, **22(2)**, 187–200 [vid. 2021-11-21]. ISSN 18758835. Dostupné z: doi:10.3233/ICA-150483
- [23] GAO, W., H. HAITJEMA, F. Z. FANG, R. K. LEACH, C. F. CHEUNG, E. SAVIO a J. M. LINARES. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*

- [online]. 2019, **68**(2), 843–866 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIRP.2019.05.005
- [24] JAVAID, Mohd, Abid HALEEM, Ravi PRATAP SINGH a Rajiv SUMAN. Significance of Quality 4.0 towards comprehensive enhancement in manufacturing sector. *Sensors International* [online]. 2021, **2**, 100109 [vid. 2023-08-21]. ISSN 2666-3511. Dostupné z: doi:10.1016/J.SINTL.2021.100109
- [25] DENIZ, Cengiz a Mustafa CAKIR. In-line stereo-camera assisted robotic spot welding quality control system. *Industrial Robot* [online]. 2018, **45**(1), 54–63 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0143991X. Dostupné z: doi:10.1108/IR-06-2017-0117/FULL/PDF
- [26] PFEIFFER, Sabine. Robots, Industry 4.0 and Humans, or Why Assembly Work Is More than Routine Work. *Societies 2016, Vol. 6, Page 16* [online]. 2016, **6**(2), 16 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2075-4698. Dostupné z: doi:10.3390/SOC6020016
- [27] WAN, Xiaodong, Yuanxun WANG, Dawei ZHAO, Yong An HUANG a Zhouping YIN. Weld quality monitoring research in small scale resistance spot welding by dynamic resistance and neural network. *Measurement* [online]. 2017, **99**, 120–127 [vid. 2021-12-06]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2016.12.010
- [28] KHUMAIDI, Agus, Eko Mulyanto YUNIARNO a Mauridhi Hery PURNOMO. Welding defect classification based on convolution neural network (CNN) and Gaussian Kernel. *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application: Strengthening the Link Between University Research and Industry to Support ASEAN Energy Sector, ISITIA 2017 - Proceeding* [online]. 2017, **2017-January**, 261–265 [vid. 2022-02-20]. Dostupné z: doi:10.1109/ISITIA.2017.8124091
- [29] PARASURAMAN, Raja, Thomas B. SHERIDAN a Christopher D. WICKENS. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans*. [online]. 2000, **30**(3), 286–297. ISSN 10834427. Dostupné z: doi:10.1109/3468.844354
- [30] FROHM, Jörgen, Veronica LINDSTRÖM, Johan STAHRÉ, Mats WINROTH, John JOHANSEN a Christer JOHANSSON. Levels of Automation in Manufacturing. *Ergonomia - an International journal of ergonomics and human factors*. 2008, **30**(3). ISSN 0137-4990.
- [31] KABER, David B. a Mica R. ENDSLEY. *The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task* [online]. 2004. ISBN 1463922021000. Dostupné z: doi:10.1080/1463922021000054335
- [32] KABER, David B. Issues in Human–Automation Interaction Modeling: Presumptive Aspects of Frameworks of Types and Levels of Automation. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* [online]. 2018, **12**(1), 7–24 [vid. 2023-08-17]. ISSN 21695032. Dostupné z: doi:10.1177/1555343417737203/FORMAT/EPUB
- [33] KABER, David B. a Mica R. ENDSLEY. The Combined Effect of Level of Automation and Adaptive Automation on Human Performance with Complex, Dynamic Control Systems: <http://dx.doi.org/10.1177/107118139704100147> [online]. 2016, **1**, 205–209 [vid. 2022-02-20]. ISSN 10711813. Dostupné z: doi:10.1177/107118139704100147

- [34] DE PACE, Francesco, Federico MANURI a Andrea SANNA. Augmented Reality in Industry 4.0. *AMERICAN JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY* [online]. 2018, **6**(1), 17 [vid. 2021-11-06]. Dostupné z: doi:10.21767/2349-3917.100017
- [35] KAUFMANN, Felix. Understanding the Potential of Augmented Reality in Manufacturing Processes [online]. 2021, (August). Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:b9943231-dec3-4637-a42a-5734bafac8a>
- [36] SANTI, Gian Maria, Alessandro CERUTI, Alfredo LIVERANI a Francesco OSTI. Augmented Reality in Industry 4.0 and Future Innovation Programs. *Technologies 2021, Vol. 9, Page 33* [online]. 2021, **9**(2), 33 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2227-7080. Dostupné z: doi:10.3390/TECHNOLOGIES9020033
- [37] AZUMA, Ronald T. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* [online]. 1997, **6**(4), 355–385 [vid. 2021-11-28]. ISSN 10547460. Dostupné z: doi:10.1162/PRES.1997.6.4.355
- [38] MILGRAM, Paul. A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration Augmented Reality through Graphic Overlays on Stereoscopic video View project [online]. 2001 [vid. 2022-01-03]. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-87512-0\_1
- [39] MILGRAMT, Paul a Fumio KISHINOTT. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. 1994.
- [40] HOOVER, Melynda, Stephen GILBERT a James OLIVER. An evaluation of the Microsoft HoloLens for a manufacturing-guided assembly task. nedatováno.
- [41] MERINO, Leonel, Magdalena SCHWARZL, Matthias KRAUS, Michael SEDLMAIR, Dieter SCHMALSTIEG a Daniel WEISKOPF. Evaluating Mixed and Augmented Reality: A Systematic Literature Review (2009-2019). *Proceedings - 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2020* [online]. 2020, 438–451 [vid. 2022-02-20]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR50242.2020.00069
- [42] AMIN, Dhiraj a Sharvari GOVILKAR. Comparative Study of Augmented Reality Sdk's. *International Journal on Computational Science & Applications* [online]. 2015, **5**(1), 11–26 [vid. 2021-12-31]. Dostupné z: doi:10.5121/IJCSA.2015.5102
- [43] KHADSE, Dr. Kavita. „Exploratory study of Augmented Reality SDK'S & Virtual Reality SDK'S". *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt / Egyptology* [online]. 2021, **18**(7), 2208–2222 [vid. 2021-12-23]. ISSN 1567-214X. Dostupné z: <https://www.archives.palarch.nl/index.php/jae/article/view/8427>
- [44] OSTI, Francesco, Alessandro CERUTI, Alfredo LIVERANI a Gianni CALIGIANA. Semi-automatic Design for Disassembly Strategy Planning: An Augmented Reality Approach. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **11**, 1481–1488 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROMFG.2017.07.279
- [45] GATTULLO, Michele, Alessandro EVANGELISTA, Antonio E. UVA, Michele FIORENTINO a Joseph L. GABBARD. What, How, and Why are Visual Assets Used in Industrial Augmented Reality? A Systematic Review and Classification in Maintenance, Assembly, and Training (From 1997 to 2019). *IEEE Transactions on Visualization and Computer*

- Graphics* [online]. 2022, **28**(2), 1443–1456 [vid. 2022-02-20]. ISSN 19410506. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2020.3014614
- [46] CARMIGNIANI, Julie, Borko FURHT, Marco ANISETTI, Paolo CERAVOLO, Ernesto DAMIANI a Misa IVKOVIC. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications* [online]. 2011, **51**(1), 341–377 [vid. 2022-01-03]. ISSN 13807501. Dostupné z: doi:10.1007/S11042-010-0660-6/FIGURES/24
- [47] ROLLAND, Jannick P. a Henry FUCHS. Optical versus Video See-Through Head-Mounted Displays. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality* [online]. 2001, 129–172 [vid. 2022-01-03]. Dostupné z: doi:10.1201/9780585383590-10
- [48] GROOVER, Mikell P. Automation production systems and computer-integrated manufacturing. 2015, 809.
- [49] OHNO, Taiichi a Norman BODEK. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* [online]. 2019, 1–143 [vid. 2022-02-20]. Dostupné z: doi:10.4324/9780429273018/TOYOTA-PRODUCTION-SYSTEM-TAIICHI-OHNO-NORMAN-BODEK
- [50] RILEY, James F. a J. M. (Joseph M.) JURAN. *The quality improvement process*. B.m.: McGraw-Hill, 1999. ISBN 007034003X.
- [51] AZAMFIREI, Victor, Yvonne LAGROSEN a Anna GRANLUND. Harmonising design and manufacturing: a quality inspection perspective [online]. 2021, 1–7 [vid. 2022-01-08]. Dostupné z: doi:10.1109/ETFA45728.2021.9613142
- [52] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. Measurement system analysis. *Technical report*. 2010.
- [53] SAUER, Steffen, Dirk BERNDT, Jost SCHNEE a Christian TEUTSCH. Worker Assistance and Quality Inspection – Application of Optical 3D Metrology and Augmented Reality Technologies. 2011.
- [54] MONOSTORI, L., B. KÁDÁR, T. BAUERNHANSL, S. KONDOH, S. KUMARA, G. REINHART, O. SAUER, G. SCHUH, W. SIHN a K. UEDA. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals* [online]. 2016, **65**(2), 621–641 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIRP.2016.06.005
- [55] WANG, Ke Sheng. Towards zero-defect manufacturing (ZDM)-a data mining approach. *Advances in Manufacturing* [online]. 2013, **1**(1), 62–74 [vid. 2022-02-20]. ISSN 21953597. Dostupné z: doi:10.1007/S40436-013-0010-9/TABLES/3
- [56] WIENDAHL, H. P., H. A. ELMARAGHY, P. NYHUIS, M. F. ZÄH, H. H. WIENDAHL, N. DUFFIE a M. BRIEKE. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(2), 783–809 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIRP.2007.10.003
- [57] TAKAYA, Yasuhiro. In-Process and On-Machine Measurement of Machining Accuracy for Process and Product Quality Management: A Review. *International Journal of Automation Technology* [online]. 2014, **8**(1), 4–19 [vid. 2021-11-21]. ISSN 18838022. Dostupné z: doi:10.20965/IJAT.2014.P0004

- [58] BABU, Manoj, Pasquale FRANCIOSA a Dariusz CEGLAREK. Spatio-Temporal Adaptive Sampling for effective coverage measurement planning during quality inspection of free form surfaces using robotic 3D optical scanner. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2019, **53**, 93–108 [vid. 2021-10-23]. ISSN 0278-6125. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMSY.2019.08.003
- [59] SÄFSTEN, K., M. WINROTH a J. STAHERE. The content and process of automation strategies. *International Journal of Production Economics* [online]. 2007, **110**(1–2), 25–38 [vid. 2022-02-20]. ISSN 09255273. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJPE.2007.02.027
- [60] CALLAHAN, Jamie L. Writing Literature Reviews: A Reprise and Update. <http://dx.doi.org/10.1177/1534484314536705> [online]. 2014, **13**(3), 271–275 [vid. 2022-02-20]. ISSN 15526712. Dostupné z: doi:10.1177/1534484314536705
- [61] FISCH, Christian a Joern BLOCK. Six tips for your (systematic) literature review in business and management research. *Management Review Quarterly 2018 68:2* [online]. 2018, **68**(2), 103–106 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2198-1639. Dostupné z: doi:10.1007/S11301-018-0142-X
- [62] PENDRILL, Leslie. Man as a Measurement Instrument. <http://dx.doi.org/10.1080/19315775.2014.11721702> [online]. 2016, **9**(4), 24–35 [vid. 2022-01-03]. ISSN 1931-5775. Dostupné z: doi:10.1080/19315775.2014.11721702
- [63] MAJSTOROVIC, Vidosav, Slavenko STOJADINOVIC, Srdjan ZIVKOVIC, Dragan DJURDJANOVIC, Zivana JAKOVLJEVIC a Nemanja GLIGORIJEVIC. Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM3) for Sculptured Surfaces – Turbine Blade Application. *Procedia CIRP* [online]. 2017, **63**, 658–663 [vid. 2021-11-21]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCIR.2017.03.093
- [64] ZHANG, Xin, Yuhang CHENG, Lin HU, Sha WEI a Feng WU. Machine Vision On-line Detection System: Applications and Standardization Requirements. *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications, ICAICA 2020* [online]. 2020, 1200–1204 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1109/ICAICA50127.2020.9181902
- [65] XU, Fangmin, Fan YANG, Xinya WU, Qi GUO a Chenglin ZHAO. Application and experiments of 5g technology powered industrial internet. *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2019 - Proceedings* [online]. 2019 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1109/ICCW.2019.8757129
- [66] AZAMFIREI, Victor, Anna GRANLUND a Yvonne LAGROSEN. Multi-Layer Quality Inspection System Framework for Industry 4.0. *International Journal of Automation Technology* [online]. 2021, **15**(5), 641–650 [vid. 2022-01-08]. ISSN 1881-7629. Dostupné z: doi:10.20965/IJAT.2021.P0641
- [67] GERMANI, Michele, Ferruccio MANDORLI, Maura MENGONI a Roberto RAFFAELI. CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control. *Precision Engineering* [online]. 2010, **34**(1), 7–15 [vid. 2021-10-23]. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/J.PRECISIONENG.2008.10.002
- [68] STROPPIA, L, P CASTELLINI a N PAONE. *Self-Optimizing Robot Vision for Online Quality Control*. 2015.

- [69] KIRACI, Ercihan, Pasquale FRANCIOSA, Glen A. TURLEY, Alan OLIFENT, Alex ATTRIDGE a Mark A. WILLIAMS. Moving towards in-line metrology: evaluation of a Laser Radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016 91:1 [online]. 2016, **91**(1), 69–78 [vid. 2022-02-20]. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-016-9696-8
- [70] MOLLEDA, Julio, Juan L. CARÚS, Rubén USAMENTIAGA, Daniel F. GARCÍA, Juan C. GRANDA a José L. RENDUELES. A fast and robust decision support system for in-line quality assessment of resistance seam welds in the steelmaking industry. *Computers in Industry* [online]. 2012, **63**(3), 222–230 [vid. 2021-10-23]. ISSN 0166-3615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2012.01.003
- [71] ZHENG, Pai, Honghui WANG, Zhiqian SANG, Ray Y. ZHONG, Yongkui LIU, Chao LIU, Khamdi MUBAROK, Shiqiang YU a Xun XU. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering* 2018 13:2 [online]. 2018, **13**(2), 137–150 [vid. 2021-11-21]. ISSN 2095-0241. Dostupné z: doi:10.1007/S11465-018-0499-5
- [72] HOFMANN, Erik a Marco RÜSCH. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry* [online]. 2017, **89**, 23–34 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0166-3615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2017.04.002
- [73] LASI, Heiner, Peter FETTKE, Hans Georg KEMPER, Thomas FELD a Michael HOFFMANN. Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering* [online]. 2014, **6**(4), 239–242 [vid. 2022-02-20]. ISSN 18670202. Dostupné z: doi:10.1007/S12599-014-0334-4/FIGURES/1
- [74] ROMERO, David, Johan STAHERE, Thorsten WUEST, Ovidiu NORAN, Peter BERNUS, Åsa FAST-BERGLUND a Dominic GORECKY. Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies Moving beyond end-users and customers to better understand the View project Green Virtual Enterprise Breeding Environments: A Sustainable Industrial Development Model for a Circular Economy View project TOWARDS AN OPERATOR 4.0 TYPOLOGY: A HUMAN-CENTRIC PERSPECTIVE ON THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION TECHNOLOGIES [online]. 2016, 29–31 [vid. 2021-11-22]. ISSN 2164-8689. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/309609488>
- [75] LONGO, Francesco, Letizia NICOLETTI a Antonio PADOVANO. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Computers and Industrial Engineering* [online]. 2017, **113**, 144–159 [vid. 2022-01-22]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIE.2017.09.016
- [76] MOEUF, Alexandre, Robert PELLERIN, Samir LAMOURI, Simon TAMAYO-GIRALDO a Rodolphe BARBARAY. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research* [online]. 2018, **56**(3), 1118–1136 [vid. 2022-01-22]. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2017.1372647



- [77] ROMERO, David, Johan STAHRÉ a Marco TAISCH. The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. *Computers and Industrial Engineering* [online]. 2020, **139** [vid. 2022-01-22]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIE.2019.106128
- [78] HO, P T, J A ALBAJEZ, J A YAGÜE a J SANTOLARIA. Preliminary study of Augmented Reality based manufacturing for further integration of Quality Control 4.0 supported by metrology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, **1193**(1), 012105. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1193/1/012105
- [79] KAASINEN, Eija, Franziska SCHMALFUSS, Cemalettin ÖZTURK, Susanna AROMAA, Menouer BOUBEKEUR, Juhani HEILALA, Päivi HEIKKILÄ, Timo KUULA, Marja LIINASUO, Sebastian MACH, Rakesh MEHTA, Esko PETÄJÄ a Thomas WALTER. Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Computers & Industrial Engineering* [online]. 2020, **139**, 105678 [vid. 2023-08-21]. ISSN 0360-8352. Dostupné z: doi:10.1016/J.CIE.2019.01.052
- [80] DESHPANDE, Abhiraj a Inki KIM. The effects of augmented reality on improving spatial problem solving for object assembly [online]. 2018 [vid. 2023-08-21]. Dostupné z: doi:10.1016/j.aei.2018.10.004
- [81] EGGER, Johannes a Tariq MASOOD. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. *Computers and Industrial Engineering* [online]. 2020, **140** [vid. 2022-01-22]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/j.cie.2019.106195
- [82] MASOOD, Tariq a Johannes EGGER. Augmented reality in support of Industry 4.0— Implementation challenges and success factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, **58**, 181–195 [vid. 2022-01-22]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/J.RCIM.2019.02.003
- [83] OJER, Marco, Hugo ALVAREZ, Ismael SERRANO, Fátima A. SAIZ, Iñigo BARANDIARAN, Daniel AGUINAGA, Leire QUEREJETA a David ALEJANDRO. Projection-Based Augmented Reality Assistance for Manual Electronic Component Assembly Processes. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 796* [online]. 2020, **10**(3), 796 [vid. 2022-02-21]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/APP10030796
- [84] ZHANG, J., S. K. ONG a A. Y.C. NEE. RFID-assisted assembly guidance system in an augmented reality environment. *International Journal of Production Research* [online]. 2011, **49**(13), 3919–3938 [vid. 2022-01-22]. ISSN 00207543. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2010.492802
- [85] KOLLATSCH, Christian, Marco SCHUMANN, Philipp KLIMANT, Volker WITTSTOCK a Matthias PUTZ. Mobile augmented reality based monitoring of assembly lines. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **23**(C), 246–251 [vid. 2022-01-22]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCIR.2014.10.100
- [86] WANG, Yuanbin, Minggao LIU, Pai ZHENG, Huayong YANG a Jun ZOU. A smart surface inspection system using faster R-CNN in cloud-edge computing environment. *Advanced Engineering Informatics* [online]. 2020, **43** [vid. 2021-10-23]. Dostupné z: doi:10.1016/J.AEI.2020.101037

- [87] WANG, Zhuo, Xiaoliang BAI, Shusheng ZHANG, Mark BILLINGHURST, Weiping HE, Peng WANG, Weiqi LAN, Haitao MIN a Yu CHEN. A comprehensive review of augmented reality-based instruction in manual assembly, training and repair. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2022, **78**, 102407 [vid. 2023-08-21]. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:10.1016/J.RCIM.2022.102407
- [88] ÁLVAREZ, Hugo, Iker AGUINAGA a Diego BORRO. Providing guidance for maintenance operations using automatic markerless augmented reality system. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2011* [online]. 2011, 181–190 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2011.6092385
- [89] FIORENTINO, Michele, Antonio E. UVA, Michele GATTULLO, Saverio DEBERNARDIS a Giuseppe MONNO. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. *Computers in Industry* [online]. 2014, **65**(2), 270–278 [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/j.compind.2013.11.004
- [90] FLATT, Holger, Nils KOCH, Carsten RÖCKER, Andrei GÜNTER a Jürgen JASPERNEITE. A context-aware assistance system for maintenance applications in smart factories based on augmented reality and indoor localization. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* [online]. 2015, **2015-October** [vid. 2022-01-22]. ISSN 19460759. Dostupné z: doi:10.1109/ETFA.2015.7301586
- [91] LAMBERTI, Fabrizio a Fernando PESCADOR. Advanced Interaction and Virtual/Augmented Reality: Making Interaction with Machines More Natural and Effective. *IEEE Consumer Electronics Magazine* [online]. 2018, **7**(2), 62–63 [vid. 2022-01-22]. ISSN 21622256. Dostupné z: doi:10.1109/MCE.2017.2776499
- [92] RUNJI, Joel Murithi, Yun Ju LEE a Chih Hsing CHU. Systematic Literature Review on Augmented Reality-Based Maintenance Applications in Manufacturing Centered on Operator Needs. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 2022 10:2* [online]. 2022, **10**(2), 567–585 [vid. 2023-08-21]. ISSN 2198-0810. Dostupné z: doi:10.1007/S40684-022-00444-W
- [93] WEBEL, Sabine, Uli BOCKHOLT, Timo ENGELKE, Matteo PEVERI, Manuel OLBRICH a Carsten PREUSCHE. Augmented Reality Training for Assembly and Maintenance Skills. *BIO Web of Conferences* [online]. 2011, **1**, 00097 [vid. 2022-02-21]. ISSN 2117-4458. Dostupné z: doi:10.1051/BIOCONF/20110100097
- [94] DE CRESCENZIO, Francesca, Massimiliano FANTINI, Franco PERSIANI, Luigi DI STEFANO, Pietro AZZARI a Samuele SALTI. Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support. *IEEE Computer Graphics and Applications* [online]. 2011, **31**(1), 96–101 [vid. 2022-02-21]. ISSN 02721716. Dostupné z: doi:10.1109/MCG.2011.4
- [95] TUMLER, Johannes, Fabian DOIL, Rüdiger MECKE, Georg PAUL, Michael SCHENK, Eberhard A. PFISTER, Anke HUCKAUF, Irina BÖCKELMANN a Anja ROGGENTIN. Mobile augmented reality in industrial applications: approaches for solution of user-related issues. *Proceedings - 7th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008, ISMAR 2008* [online]. 2008, 87–90 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2008.4637330
- [96] BUTASLAC, Isidro M, Yuichiro FUJIMOTO, Taishi SAWABE, Masayuki KANBARA a Hirokazu KATO. Systematic Review of Augmented Reality Training Systems. *IEEE*

- Transactions on Visualization and Computer Graphics* [online]. 2022, 1–20. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2022.3201120
- [97] MUÑOZ, Adolfo, Xavier MAHIQUES, J. Ernesto SOLANES, Ana MARTÍ, Luis GRACIA a Josep TORNERO. Mixed reality-based user interface for quality control inspection of car body surfaces. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019, **53**, 75–92.
- [98] BOTTANI, Eleonora a Giuseppe VIGNALI. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244> [online]. 2019, **51**(3), 284–310 [vid. 2022-01-03]. ISSN 24725862. Dostupné z: doi:10.1080/24725854.2018.1493244
- [99] RUPPERT, Tamás, Szilárd JASKÓ, Tibor HOLCZINGER a János ABONYI. Enabling Technologies for Operator 4.0: A Survey. *Applied Sciences 2018, Vol. 8, Page 1650* [online]. 2018, **8**(9), 1650 [vid. 2022-02-20]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/APP8091650
- [100] GIMENO, J., P. MORILLO, J. M. ORDUÑA a M. FERNÁNDEZ. A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures. *Computers in Industry* [online]. 2013, **64**(9), 1263–1271 [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2013.06.012
- [101] SCURATI, Giulia Wally, Michele GATTULLO, Michele FIORENTINO, Francesco FERRISE, Monica BORDEGONI a Antonio Emmanuele UVA. Converting maintenance actions into standard symbols for Augmented Reality applications in Industry 4.0. *Computers in Industry* [online]. 2018, **98**, 68–79 [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2018.02.001
- [102] PALMARINI, Riccardo, John Ahmet ERKOYUNCU, Rajkumar ROY a Hosein TORABMOSTAEDI. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2018, **49**, 215–228 [vid. 2022-01-22]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/J.RCIM.2017.06.002
- [103] VAN LOPIK, Katherine, Murray SINCLAIR, Richard SHARPE, Paul CONWAY a Andrew WEST. Developing augmented reality capabilities for industry 4.0 small enterprises: Lessons learnt from a content authoring case study. *Computers in Industry* [online]. 2020, **117** [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2020.103208
- [104] GENG, Junhao, Xinyu SONG, Yuntao PAN, Jianjun TANG, Yu LIU, Dongping ZHAO a Yongsheng MA. A systematic design method of adaptive augmented reality work instruction for complex industrial operations. *Computers in Industry* [online]. 2020, **119** [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2020.103229
- [105] OLWAL, Alex, Jonny GUSTAFSSON a Christoffer LINDFORS. Spatial augmented reality on industrial CNC-machines. *The Engineering Reality of Virtual Reality 2008* [online]. 2008, **6804**, 680409 [vid. 2022-01-22]. ISSN 0277786X. Dostupné z: doi:10.1117/12.760960
- [106] YOUNG, Mark S., Karel A. BROOKHUIS, Christopher D. WICKENS a Peter A. HANCOCK. State of science: mental workload in ergonomics. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151> [online]. 2015, **58**(1), 1–17 [vid. 2022-02-20]. ISSN 13665847. Dostupné z: doi:10.1080/00140139.2014.956151

- [107] LEUTERT, Florian a Klaus SCHILLING. Augmented Reality for telemaintenance and -inspection in force-sensitive industrial robot applications. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2015, **28**(10), 153–158 [vid. 2022-01-22]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/J.IFACOL.2015.08.124
- [108] FRANCESCHINI, Fiorenzo, Maurizio GALETTO, Domenico MAISANO a Luca MASTROGIACOMO. Towards the use of augmented reality techniques for assisted acceptance sampling: <http://dx.doi.org/10.1177/0954405415624360> [online]. 2016, **230**(10), 1870–1884 [vid. 2021-11-21]. ISSN 20412975. Dostupné z: doi:10.1177/0954405415624360
- [109] JAYAWEERA, Malith, Indika WIJESORIYA, Damith WIJEWARDANA, Tharindu DE SILVA a Chandana GAMAGE. Demo abstract: Enhanced real-time machine inspection with mobile augmented reality for maintenance and repair. *Proceedings - 2017 IEEE/ACM 2nd International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation, IoTDI 2017 (part of CPS Week)* [online]. 2017, 287–288 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1145/3054977.3057302
- [110] SEGOVIA, Daniel, Miguel MENDOZA, Eloy MENDOZA a Eduardo GONZÁLEZ. Augmented Reality as a Tool for Production and Quality Monitoring. *Procedia Computer Science* [online]. 2015, **75**, 291–300 [vid. 2022-01-22]. ISSN 18770509. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROCS.2015.12.250
- [111] ANTONELLI, Dario a Sergey ASTANIN. Enhancing the quality of manual spot welding through augmented reality assisted guidance. *Procedia CIRP* [online]. 2015, **33**, 556–561 [vid. 2022-01-22]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.06.076
- [112] ZHOU, Jianlong, Ivan LEE, Bruce THOMAS, Roland MENASSA, Anthony FARRANT a Andrew SANSOME. Applying Spatial Augmented Reality to facilitate in-situ support for automotive spot welding inspection. *Proceedings of VRCAI 2011: ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications to Industry* [online]. 2011, 195–200 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1145/2087756.2087784
- [113] ABBAS, Ali, JoonOh SEO a MinKoo KIM. Impact of Mobile Augmented Reality System on Cognitive Behavior and Performance during Rebar Inspection Tasks. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 2020, **34**(6), 04020050 [vid. 2022-01-22]. ISSN 0887-3801. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000931
- [114] ZHOU, Ying, Hanbin LUO a Yiheng YANG. Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction. *Automation in Construction* [online]. 2017, **82**, 112–121 [vid. 2022-01-22]. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2017.02.007
- [115] FITE-GEORGEL, Pierre. Is there a reality in Industrial Augmented Reality? *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2011* [online]. 2011, 201–210 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2011.6092387
- [116] WEBEL, Sabine, Mario BECKER, Didier STRICKER a Harald WUEST. Identifying differences between CAD and physical mock-ups using AR. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR* [online]. 2007, 281–282 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2007.4538867

- [117] KAHN, Svenja, Harald WUEST, Didier STRICKER a Dieter W. FELLNER. 3D discrepancy check via augmented reality. *9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2010: Science and Technology, ISMAR 2010 - Proceedings* [online]. 2010, 241–242 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2010.5643587
- [118] KAHN, Svenja, Ulrich BOCKHOLT, Arjan KUIJPER a Dieter W. FELLNER. Towards precise real-time 3D difference detection for industrial applications. *Computers in Industry* [online]. 2013, **64**(9), 1115–1128 [vid. 2022-01-22]. ISSN 01663615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2013.04.004
- [119] WASENMULLER, Oliver, Marcel MEYER a Didier STRICKER. Augmented Reality 3D Discrepancy Check in Industrial Applications. *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2016* [online]. 2016, 125–134 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2016.15
- [120] LEE, Jung Min, Kyung Ho LEE, Dea Seok KIM a Chung Hyun KIM. Active inspection supporting system based on mixed reality after design and manufacture in an offshore structure. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2010, **24**(1), 197–202 [vid. 2022-02-08]. ISSN 1738494X. Dostupné z: doi:10.1007/S12206-009-1129-2
- [121] OLBRICH, Manuel, Harald WUEST, Patrick RIESS a Ulrich BOCKHOLT. Augmented reality pipe layout planning in the shipbuilding industry [online]. 2012, 269–270 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR.2011.6143896
- [122] RAMAKRISHNA, Perla, Ehtesham HASSAN, Ramya HEBBALAGUPPE, Monika SHARMA, Gaurav GUPTA, Lovekesh VIG, Geetika SHARMA a Gautam SHROFF. An AR Inspection Framework: Feasibility Study with Multiple AR Devices. *Adjunct Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2016* [online]. 2017, 221–226 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISMAR-ADJUNCT.2016.0080
- [123] HE, Fan, S. K. ONG a A. Y.C. NEE. A Mobile Solution for Augmenting a Manufacturing Environment with User-Generated Annotations. *Information 2019, Vol. 10, Page 60* [online]. 2019, **10**(2), 60 [vid. 2021-11-28]. ISSN 20782489. Dostupné z: doi:10.3390/INFO10020060
- [124] BACKS, Richard W. a Kimberle A. SELJOS. Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: the effects of level of difficulty in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology* [online]. 1994, **16**(1), 57–68 [vid. 2022-01-22]. ISSN 01678760. Dostupné z: doi:10.1016/0167-8760(94)90042-6
- [125] MARINO, Emanuele, Loris BARBIERI, Biagio COLACINO, Anna Kum FLERI a Fabio BRUNO. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. *Computers in Industry* [online]. 2021, **127**, 103412 [vid. 2022-01-22]. ISSN 0166-3615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2021.103412
- [126] BARBIERI, Loris a Emanuele MARINO. An Augmented Reality Tool to Detect Design Discrepancies: A Comparison Test with Traditional Methods. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* [online]. 2019, **11614 LNCS**, 99–110 [vid. 2022-01-22]. ISSN 16113349. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-25999-0\_9

- [127] BRUNO, Fabio, Loris BARBIERI, Emanuele MARINO, Maurizio MUZZUPAPPA, Luigi D'ORIANO a Biagio COLACINO. An augmented reality tool to detect and annotate design variations in an Industry 4.0 approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2019, **105**(1–4), 875–887 [vid. 2022-01-22]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-019-04254-4
- [128] PARK, Je Kang, Woo Hyun AN a Dong Joong KANG. Convolutional Neural Network Based Surface Inspection System for Non-patterned Welding Defects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2019, **20**(3), 363–374 [vid. 2022-02-20]. ISSN 20054602. Dostupné z: doi:10.1007/S12541-019-00074-4/TABLES/2
- [129] MICHAL KOZÁK, T-Mobile. Automatizace kontroly kvality svaru pomocí neuronových sítí a 5G připojení. *Národní centrum Průmyslu 4.0* [online]. červen 2021 [vid. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.ncp40.cz/aktuality/automatizace-kontroly-kvality-svaru-pomoci-neuronovych-siti-a-5g-pripojeni>
- [130] BARATA, João a Paulo Rupino DA CUNHA. Augmented product information: crafting physical-digital transparency strategies in the materials supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, **112**(7–8), 2109–2121 [vid. 2021-11-21]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-020-06446-9/FIGURES/4
- [131] FUNK, Markus, Thomas KOSCH, Scott W GREENWALD a Albrecht SCHMIDT. A Benchmark for Interactive Augmented Reality Instructions for Assembly Tasks. *Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* [online]. 2015 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1145/2836041
- [132] BORSCI, Simone, Glyn LAWSON a Simon BROOME. Empirical evidence, evaluation criteria and challenges for the effectiveness of virtual and mixed reality tools for training operators of car service maintenance. *Computers in Industry* [online]. 2015, **67**, 17–26 [vid. 2021-11-21]. ISSN 0166-3615. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPIND.2014.12.002
- [133] KHUONG, Bui Minh, Kiyoshi KIYOKAWA, Andrew MILLER, Joseph J. LA VIOLA, Tomohiro MASHITA a Haruo TAKEMURA. The effectiveness of an AR-based context-aware assembly support system in object assembly. *Proceedings - IEEE Virtual Reality* [online]. 2014, 57–62 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1109/VR.2014.6802051
- [134] BOSCH, Tim, Reinier KÖNEMANN, Hans DE COCK a Gu VAN RHIJN. The effects of projected versus display instructions on productivity, quality and workload in a simulated assembly task. *ACM International Conference Proceeding Series* [online]. 2017, **Part F128530**, 412–415 [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: doi:10.1145/3056540.3076189
- [135] DÜNSER, Andreas a Mark BILLINGHURST. Evaluating Augmented Reality Systems. *Handbook of Augmented Reality* [online]. 2011, 289–307 [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-0064-6\_13
- [136] HENDERSON, Steven a Steven FEINER. Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* [online]. 2011, **17**(10), 1355–1368 [vid. 2021-11-21]. ISSN 10772626. Dostupné z: doi:10.1109/TVCG.2010.245

- [137] FUNK, Markus, Thomas KOSCH a Albrecht SCHMIDT. Interactive worker assistance: Comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions. *UbiComp 2016 - Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* [online]. 2016, 934–939 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.1145/2971648.2971706
- [138] SAMINI, Ali, Karljohan Lundin PALMERIUS a Patric LJUNG. A Review of Current, Complete Augmented Reality Solutions [online]. 2021, 49–56 [vid. 2021-12-31]. Dostupné z: doi:10.1109/CW52790.2021.00015
- [139] MARINO, Emanuele, Loris BARBIERI, Biagio COLACINO a Fabio BRUNO. User-Centered Design of an Augmented Reality Tool for Smart Operator in Production Environment [online]. 2022, 125–132 [vid. 2022-01-22]. ISSN 21954364. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-91234-5\_12
- [140] JETTER, Jérôme, Jürgen EIMECKE a Alexandra RESE. Augmented reality tools for industrial applications: What are potential key performance indicators and who benefits? *Computers in Human Behavior* [online]. 2018, **87**, 18–33 [vid. 2021-11-28]. ISSN 0747-5632. Dostupné z: doi:10.1016/J.CHB.2018.04.054
- [141] WANG, X., S. K. ONG a A. Y.C. NEE. Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface. *Advanced Engineering Informatics*. 2016, **30**(3), 406–421.
- [142] RUBIO, Susana, Eva DÍAZ, Jesús MARTÍN a José M. PUENTE. Evaluation of Subjective Mental Workload: A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. *Applied Psychology* [online]. 2004, **53**(1), 61–86 [vid. 2022-01-22]. ISSN 0269994X. Dostupné z: doi:10.1111/J.1464-0597.2004.00161.X
- [143] MAXWELL, Joseph. Understanding and Validity in Qualitative Research. *Harvard Educational Review* [online]. 1992, **62**(3), 279–301 [vid. 2022-02-20]. ISSN 0017-8055. Dostupné z: doi:10.17763/HAER.62.3.8323320856251826
- [144] OLECKÁ, Ivana. a Kateřina IVANOVÁ. *Metodologie vědecko-výzkumné činnosti*. B.m.: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 9788087240335.
- [145] MOLNÁR, Zdeněk, Stanislava MILDEOVÁ, Hana ŘEZANKOVÁ, Radim BRIXÍ a Jaroslav KALINA. Pokročilé metody vědecké práce. nedatováno.
- [146] PROF. RNDR. DANIELA JARUŠKOVÁ, CSc. *Pravdepodobnost\_a\_matematicka\_statistika\_prednasky.pdf*. 2015
- [147] YAP, B. W. a C. H. SIM. Comparisons of various types of normality tests. *Journal of Statistical Computation and Simulation* [online]. 2011, **81**(12), 2141–2155. ISSN 00949655. Dostupné z: doi:10.1080/00949655.2010.520163
- [148] UPENDRA, Siddamsetty, Siddamsetty MAHENDRA a Poli Sivasankar RAO. Two-way ANOVA Calculations Using MS-Excel. *Research Journal of Science and Technology* [online]. 2017, **9**(4), 532. ISSN 0975-4393. Dostupné z: doi:10.5958/2349-2988.2017.00091.2
- [149] ABDI, Hervé a Lynne J WILLIAMS. *Encyclopedia of Research Design* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.utd.edu/~herve>

- [150] DE VALÈNCIA ESPAÑA NORDSTOKKE, Universitat. A New Nonparametric Levene Test for Equal. *Variances Psicológica* [online]. 2010, **31**(2), 401–430. ISSN 0211-2159. Dostupné z: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=16917017011>
- [151] PEREIRA, Dulce G., Anabela AFONSO a Fátima Melo MEDEIROS. Overview of Friedmans Test and Post-hoc Analysis. *Communications in Statistics: Simulation and Computation* [online]. 2015, **44**(10), 2636–2653. ISSN 15324141. Dostupné z: [doi:10.1080/03610918.2014.931971](https://doi.org/10.1080/03610918.2014.931971)
- [152] HART, Sandra G. NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society* [online]. 2006, 904–908 [vid. 2022-01-22]. ISSN 10711813. Dostupné z: [doi:10.1177/154193120605000909](https://doi.org/10.1177/154193120605000909)
- [153] LEWIS, James R. Usability Testing. *Handbook of Human Factors and Ergonomics* [online]. 2006, 1275–1316 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: [doi:10.1002/0470048204.CH49](https://doi.org/10.1002/0470048204.CH49)
- [154] SERDAR, Ceyhan Ceran, Murat CIHAN, Doğan YÜCEL a Muhittin A. SERDAR. Sample size, power and effect size revisited: Simplified and practical approach in pre-clinical, clinical and laboratory studies. *Biochemia Medica* [online]. 2021, **31**(1), 1–27 [vid. 2023-06-13]. ISSN 13300962. Dostupné z: [doi:10.11613/BM.2021.010502](https://doi.org/10.11613/BM.2021.010502)
- [155] STUHLÝ, Jaroslav. Statistika. *Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích*. 2017.
- [156] SUDHA, Sri, Vijay KESHAV KOLLA, Andre SANCHEZ a Peter PLAPPER. *Comparing effectiveness of paper based and Augmented Reality instructions for manual assembly and training tasks* [online]. 2021. Dostupné z: <https://ssrn.com/abstract=3859970>
- [157] OBERMAIR, F., J. ALTHALER, U. SEILER, P. ZEILINGER, A. LECHNER, L. PFAFFENEDER, M. RICHTER a J. WOLFARTSBERGER. Maintenance with Augmented Reality Remote Support in Comparison to Paper-Based Instructions: Experiment and Analysis. *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2020* [online]. 2020, 942–947 [vid. 2023-08-22]. Dostupné z: [doi:10.1109/ICIEA49774.2020.9102078](https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9102078)
- [158] BODE, Max. *Evaluation of an Augmented Reality Assisted Manufacturing System for Assembly Guidance* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [159] LOCH, Frieder, Fabian QUINT a Iuliia BRISHTEL. Comparing video and augmented reality assistance in manual assembly. In: *Proceedings - 12th International Conference on Intelligent Environments, IE 2016* [online]. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, s. 147–150. ISBN 9781509040568. Dostupné z: [doi:10.1109/IE.2016.31](https://doi.org/10.1109/IE.2016.31)
- [160] ALVES, João Bernardo, Bernardo MARQUES, Paulo DIAS a Beatriz Sousa SANTOS. Using augmented reality for industrial quality assurance: a shop floor user study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, **115**(1–2), 105–116 [vid. 2021-11-08]. ISSN 14333015. Dostupné z: [doi:10.1007/S00170-021-07049-8](https://doi.org/10.1007/S00170-021-07049-8)
- [161] DROUOT, Mathilde, Nathalie LE BIGOT, Emmanuel BRICARD, Jean Louis de BOUGRENET a Vincent NOURRIT. Augmented reality on industrial assembly line: Impact on



- effectiveness and mental workload. *Applied Ergonomics* [online]. 2022, **103**. ISSN 18729126. Dostupné z: doi:10.1016/j.apergo.2022.103793
- [162] HANIFF, David J. a Chris BABER. User evaluation of augmented reality systems. In: *Proceedings of the International Conference on Information Visualisation* [online]. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003, s. 505–511. ISBN 0769519881. Dostupné z: doi:10.1109/IV.2003.1218032
- [163] BLATTGERSTE, Jonas, Patrick RENNER, Benjamin STRENGE a Thies PFEIFFER. In-situ instructions exceed side-by-side instructions in augmented reality assisted assembly. *ACM International Conference Proceeding Series* [online]. 2018, 133–140 [vid. 2022-01-22]. Dostupné z: doi:10.1145/3197768.3197778
- [164] HOU, Lei, Xiangyu WANG a Martijn TRUIJENS. Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly: An Experiment-Based Evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering* [online]. 2015, **29**(1), 05014007 [vid. 2022-01-22]. ISSN 0887-3801. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000344
- [165] JEFFRI, Nor Farzana Syaza a Dayang Rohaya AWANG RAMBLI. *A review of augmented reality systems and their effects on mental workload and task performance* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. března 2021. ISSN 24058440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06277
- [166] BANGOR, Aaron, Philip KORTUM a James MILLER. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of Usability Studies*. 2009, **4**, 114–123.
- [167] BROOKE, John. SUS: a retrospective. *Journal of Usability Studies*. 2013, **8**, 29–40.

## Seznam publikovaných prací

[1] Havlíková, K., Hořejší, P., & Kopeček, P. (2023b). Effect of augmented reality support on quality inspection of welded structures. *Applied Sciences*, 13.

[2] Havlíková, K., Hořejší, P., & Kopeček, P. (2023). An Interactive Augmented Reality Tool to Enhance the Quality Inspection Process in Manufacturing—Pilot Study. In A. Visvizi, O. Troisi, & M. Grimaldi (Eds.), *Research and Innovation Forum 2022* (pp. 155–164). Springer International Publishing.

[3] Havlíková, K., Hořejší, P., & Kopeček, P. (2022). Interaktivní aplikace rozšířené reality pro zlepšení procesu kontroly kvality ve výrobě – pilotní studie., *Průmyslové inženýrství 2022: Mezinárodní studentská vědecká konference: 6.-7.říjen 2022, Plzeň*, s. 34-42.

[4] Havlíková, K. (2021). Spojení rozšířené reality a umělé inteligence pro podporu kontroly kvality svařování. *Průmyslové inženýrství 2021: Mezinárodní studentská vědecká konference: 10.-11. listopad 2021, Brno*, s. 30-58.

[5] Havlíková, K. (2020). Augmented Reality in Context of Industry 4.0. *Průmyslové inženýrství 2020: Mezinárodní studentská vědecká konference: 7. října 2020, Plzeň*, s. 44-61.

## Seznam příloh

<b>Příloha 1</b> .....	ii
<b>Příloha 2</b> .....	iv
<b>Příloha 3</b> .....	vii
<b>Příloha 4</b> .....	ix
<b>Příloha 5</b> .....	xi

## **Příloha 1**

**Data TCT a chybovosti získaná z experimentu**

ID	zkušenosti	pohlaví	věk	TCT AR (s)	TCT PAP čistý (s)	TCT PAP celý (s)	chyby AR	chyby PAP
1	S1	m	39	876	1185	1351	0	0
2	S1	m	35	922	1286	1492	0	0
3	S1	m	39	961	1304	1493	0	0
4	S1	ž	36	972	1351	1517	0	1
5	S1	ž	52	1018	1237	1422	1	2
6	S1	m	30	945	1222	1410	0	0
7	S1	m	34	920	1224	1416	0	0
8	S1	m	22	968	1238	1413	1	1
9	S1	ž	51	862	1153	1324	0	0
10	S1	m	29	884	1251	1456	0	0
11	S1	ž	52	995	1258	1481	1	1
12	S1	ž	33	915	1225	1393	0	0
13	S1	m	32	869	1231	1406	0	0
14	S1	m	30	898	1255	1446	0	0
15	S1	m	54	933	1233	1409	0	1
16	S1	m	53	909	1242	1444	0	0
17	S1	m	51	889	1219	1403	0	0
18	S1	m	53	922	1206	1388	0	0
19	S1	m	52	910	1231	1445	0	0
20	S1	m	31	988	1214	1400	0	0
21	S2	ž	41	1050	1448	1650	0	0
22	S2	ž	39	1074	1512	1704	1	2
23	S2	ž	30	1045	1535	1719	0	1
24	S2	ž	51	1086	1520	1703	0	1
25	S2	m	51	1032	1515	1680	0	0
26	S2	m	61	1041	1541	1722	0	0
27	S2	m	43	1005	1501	1689	0	0
28	S2	m	38	1039	1552	1743	0	0
29	S2	m	47	1051	1584	1769	1	0
30	S2	ž	56	1128	1572	1747	2	4
31	S2	ž	36	1081	1534	1723	1	2
32	S2	m	36	1040	1503	1693	0	0
33	S2	m	41	1038	1461	1655	0	0
34	S2	m	33	1084	1550	1741	0	3
35	S2	m	40	1026	1469	1651	0	0
36	S2	m	41	1002	1503	1694	0	0
37	S2	m	30	1039	1522	1727	0	0
38	S2	ž	29	1117	1628	1811	0	2
39	S2	m	45	1022	1485	1672	0	1
40	S2	m	48	1030	1639	1853	2	2

## **Příloha 2**

### **Data NASA TLX získaná z experimentu**

AR přístup

ID	zkušenosti	Mentální zátěž	Fyzická zátěž	Časová zátěž	Výkon	Úsilí	Frustrace	NASA TLX AR TOT
1	S1	5	10	10	5	5	5	40
2	S1	15	15	5	5	5	5	50
3	S1	5	15	10	10	5	5	50
4	S1	15	20	10	10	10	10	75
5	S1	20	5	15	10	15	15	80
6	S1	10	5	5	5	5	5	35
7	S1	5	5	10	5	5	5	35
8	S1	10	5	15	10	10	10	60
9	S1	5	5	5	5	5	5	30
10	S1	15	5	10	5	5	5	45
11	S1	30	10	20	5	10	10	85
12	S1	20	5	5	5	5	5	45
13	S1	15	10	5	5	10	10	55
14	S1	5	5	10	5	10	10	45
15	S1	20	15	15	15	20	10	95
16	S1	10	15	10	10	15	10	70
17	S1	10	5	15	5	10	5	50
18	S1	15	5	5	5	15	5	50
19	S1	25	15	20	10	20	10	100
20	S1	25	10	20	15	25	15	110
21	S2	20	10	20	15	10	10	85
22	S2	35	20	30	20	15	10	130
23	S2	30	20	25	15	10	5	105
24	S2	35	25	25	15	20	10	130
25	S2	20	10	15	15	5	5	70
26	S2	15	10	15	5	10	5	60
27	S2	20	15	10	10	10	10	75
28	S2	15	15	10	10	15	15	80
29	S2	10	20	15	20	15	15	95
30	S2	40	35	35	25	25	20	180
31	S2	20	20	30	20	20	25	135
32	S2	25	20	25	15	15	15	115
33	S2	20	25	20	10	20	10	105
34	S2	35	30	20	25	20	20	150
35	S2	30	30	20	10	10	10	110
36	S2	15	25	15	5	5	15	80
37	S2	10	10	25	10	10	5	70
38	S2	30	5	30	10	15	15	105
39	S2	35	10	25	25	20	20	135
40	S2	20	15	25	5	25	20	110

Konvenční přístup

ID	zkušenosti	Mentální zátěž	Fyzická zátěž	Časová zátěž	Výkon	Úsilí	Frustrace	NASA TLX PAP TOT
1	S1	35	25	40	5	40	35	180
2	S1	30	20	35	5	40	30	160
3	S1	40	30	40	5	40	40	195
4	S1	30	25	45	10	45	40	195
5	S1	40	35	50	15	50	50	240
6	S1	25	20	30	10	35	20	140
7	S1	30	25	20	10	35	15	135
8	S1	35	25	25	15	40	15	155
9	S1	15	15	10	5	10	5	60
10	S1	25	10	20	10	15	10	90
11	S1	45	30	35	15	30	20	175
12	S1	30	15	20	5	15	10	95
13	S1	25	20	30	10	30	15	130
14	S1	30	15	30	10	25	10	120
15	S1	30	25	35	15	30	20	155
16	S1	20	30	40	20	35	15	160
17	S1	35	15	30	10	15	15	120
18	S1	30	15	25	15	20	15	120
19	S1	45	25	35	25	25	20	175
20	S1	45	30	40	15	40	25	195
21	S2	50	30	40	15	40	20	195
22	S2	45	20	50	20	45	30	210
23	S2	40	20	50	10	40	15	175
24	S2	50	25	45	10	40	20	190
25	S2	40	15	30	10	30	15	140
26	S2	35	15	30	10	30	10	130
27	S2	15	20	30	15	45	30	155
28	S2	20	15	25	15	40	25	140
29	S2	15	20	30	15	35	10	125
30	S2	20	35	50	15	40	30	190
31	S2	30	30	45	20	40	35	200
32	S2	35	35	40	20	35	20	185
33	S2	45	25	40	15	30	15	170
34	S2	50	30	45	20	40	25	210
35	S2	45	20	40	15	35	20	175
36	S2	30	25	35	15	20	15	140
37	S2	35	25	30	10	30	30	160
38	S2	60	30	40	15	40	40	225
39	S2	60	40	50	20	50	40	260
40	S2	50	40	55	5	60	45	255



## **Příloha 3**

### **Data SUS získaná z experimentu**

SUS otázky

ID	zkušenosti											SUS	SUS	Grade
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	RAW	FINAL	
1	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
2	S1	5	1	5	1	4	2	5	1	4	2	36	90	A
3	S1	5	1	5	2	5	1	5	1	5	1	39	97,5	A
4	S1	5	1	5	2	5	1	4	1	5	1	38	95	A
5	S1	3	1	4	1	4	1	5	1	4	1	35	87,5	A
6	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
7	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
8	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
9	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
10	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
11	S1	4	1	5	1	4	1	4	1	5	1	37	92,5	A
12	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
13	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
14	S1	5	1	5	2	5	1	5	1	5	1	39	97,5	A
15	S1	4	2	5	1	5	2	5	1	5	1	37	92,5	A
16	S1	4	2	4	1	4	1	5	1	4	1	35	87,5	A
17	S1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
18	S1	4	1	4	2	5	1	4	2	5	1	35	87,5	A
19	S1	4	1	5	2	5	2	4	1	5	2	35	87,5	A
20	S1	5	1	5	2	4	1	5	1	5	1	38	95	A
21	S2	5	1	4	2	5	1	5	1	5	1	38	95	A
22	S2	5	1	5	1	4	1	5	1	5	1	39	97,5	A
23	S2	5	2	4	1	4	1	5	1	5	1	37	92,5	A
24	S2	4	1	5	1	5	1	5	1	5	1	39	97,5	A
25	S2	4	2	5	1	5	1	5	1	5	1	38	95	A
26	S2	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
27	S2	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
28	S2	5	2	5	1	5	1	5	1	4	2	37	92,5	A
29	S2	4	1	4	2	5	1	4	1	5	1	36	90	A
30	S2	4	2	4	2	4	1	5	2	5	2	33	82,5	A
31	S2	5	1	5	1	5	2	5	1	4	1	38	95	A
32	S2	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	40	100	A
33	S2	4	1	5	1	4	2	4	1	5	2	35	87,5	A
34	S2	4	2	4	1	4	2	5	1	4	1	34	85	A
35	S2	5	1	5	1	5	1	5	2	5	1	39	97,5	A
36	S2	4	1	5	1	4	1	5	1	5	2	37	92,5	A
37	S2	5	1	4	1	5	1	5	1	5	1	39	97,5	A
38	S2	5	1	4	2	5	1	4	1	5	2	36	90	A
39	S2	4	1	5	1	5	1	5	2	5	1	38	95	A
40	S2	5	1	4	2	5	1	5	1	5	1	38	95	A

## **Příloha 4**

### **NASA TLX dotazník**



## **Příloha 5**

### **SUS dotazník**

		Strongly disagree				Strongly agree
1. Rád bych systém používal opakovaně.	1. I think that I would like to use this ballot frequently.					
		1	2	3	4	5
2. Systém je zbytečně složitý.	2. I found the ballot unnecessarily complex.					
		1	2	3	4	5
3. Systém se snadno používá.	3. I thought the ballot was easy to use.					
		1	2	3	4	5
4. Potřeboval bych pomoc člověka z technické podpory, abych mohl systém používat.	4. I think that I would need the support of a poll official to be able to use this system.					
		1	2	3	4	5
5. Různé funkce systém jsou do něj dobře začleněny.	5. I found the various parts of this ballot were well integrated.					
		1	2	3	4	5
6. Systém je příliš nekonzistentní.	6. I thought there was too much inconsistency in this ballot.					
		1	2	3	4	5
7. Řekl bych, že většina lidí se se systémem naučí pracovat rychle.	7. I would imagine that most people would learn to use this ballot very quickly.					
		1	2	3	4	5
8. Systém je příliš neohrabaný.	8. I found the ballot very awkward to use.					
		1	2	3	4	5
9. Při práci se systémem se cítím jistě.	9. I felt very confident using the ballot.					
		1	2	3	4	5
10. Musel jsem se hodně naučit, než jsem se systémem dokázal pracovat.	10. I needed to learn a lot of things before I could get going with this ballot.					
		1	2	3	4	5