



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

RAUDBETOON ELEMENTIDE KULUSÄÄSTLIKU TOOTMISE STSENAARIUMI ARENDAMINE AS ALISTRON NÄITEL

DEVELOPING THE LEAN MANUFACTURING PROCESS FOR THE
REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN THE CONTEXT OF AS ALISTRON

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Samuel Pevzner

Üliõpilaskood 182307

Juhendaja: Ergo Pikas

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

10. mai 2023

Autor: Samuel Pevzner

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

22. mai 2023

Juhendaja: Ergo Pikas

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

22.mai 2023

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Samuel Pevzner**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Raudbetoon elementide kulusäästliku tootmis stsenaariumi arendamine AS Alistron näitel**

mille juhendaja on Ergo Pikas

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (allkiri)

10.05.2023

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **SAMUEL PEVZNER**Üliõpilaskood **182307**Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitusmajandus ja juhtimine

Lõputöö teema:

**RAUDBETOON ELEMENTIDE KULUSÄÄSTLIKU TOOTMISE STSENAARIUMI
ARENDAJINE AS ALISTRON NÄITEL**Developing the lean manufacturing process for the reinforced concrete elements in
the context of AS AlistronJuhendaja: **Ergo Pikas**

Ergo.Pikas@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja Perekonnanimi	Kontakt (e-post või telefon)	Allkiri ja kuupäev
Tootmisjuht, Aleksander Škljarov	+372 5150620	22.05.2023

Lõputöö põhieesmärgid:

- Tuvastada raiskamised olemasolevas tootmisprotsessis.
- Koostada kulusäästlikumad tootmisstsenaariumid raudbetoonelementide ja terratso tootmiseks, kasutades digitaalset kaksikut stsenaariumite hindamiseks.

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Teostada olemasoleva tootmisprotsessi ning tootmisetappide raiskamiste analüüs ning koostada hinnang olemasolevale protsessile.	12.12.2022
2. Pakkuda välja stsenaariumid kulusäästlikuma tootmisprotsessi kavandamiseks.	13.03.2023
3. Luua tootmisprotsessile digitaalsed kaksikud stsenaariumite simuleerimiseks ja võrdlemiseks.	20.03.2023
4. Leida optimaalne lahendus tootmisprotsessi parandamiseks.	
5. Kokkuvõtte eesti keeles Kokkuvõtte inglise keeles	24.04.2023

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

10.05.2023

Peale ülevaatuset saab teha väiksemaid korrekture ja üles laadida töö Moodle keskkonda plagiadi kontrolliks.

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1 Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid	10.05.2023

Lõputöö esitamise tähtaeg:

22. mai 2023

Lõputöö ülesanne välja antud: 20.02.2023

Juhendaja: **Ergo Pikas**

Ülesande vastu võtnud: **Samuel Pevzner**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

EESSÕNA.....	10
TABELITE LOETELU	11
JOONISTE LOETELU.....	12
SISSEJUHATUS	14
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	16
1.1 Raudbetoelementide tootmis suundumused ja väljakutsed.....	16
1.1.1 Inimtööjõu kallinemine ja puudus.....	17
1.1.2 Toormaterjali puudus ja kallinemine.....	19
1.1.3 Inimeste roll tootmises ja motivatsioon.....	20
1.1.4 Kulude määramine ja vähendamine.....	21
1.2 Timmitud tootmine (Lean production)	23
1.2.1 Ressursi- ja vootõhusus	24
1.2.2 Tootmise ja timmitud tootmise erinevused	25
1.2.3 Timmitud tootmise meetodite rakendamine	26
1.2.4 Timmitud tootmise tööriistad	26
1.2.5 Six sigma ja timmitud tootmine.....	27
1.2.6 Timmitud tootmise arendamise takistused.....	30
1.3 Digitaalne kaksik (Digital Twin)	31
1.3.1 Digitaalne kaksik tootmises	32
1.3.2 Tootmise planeerimine ja vastuolude vältimine	33
1.3.3 Digitaalne kaksik kui timmitud tootmise kontrollmehhanism	35
1.3.4 Tootmisriskide analüüs digitaalses kaksikus	35
1.4 Lühikokkuvõtte	37
2 UURIMISTÖÖ METOODIKA JA MATERJALID	38
2.1 Uurimistöö etapid ja meetodid.....	38
2.1.1 Olukorra tuvastamine.....	38
2.1.2 Raiskamiste analüüs	41
2.1.3 Lahenduste väljatöötamine.....	41
2.1.4 Testimine ja hindamine	42
2.2 SIMIO digitaalne kaksik kulutõhususe modelleerimiseks ja simuleerimiseks	42
2.2.1 Simio tarkvara valik	43
2.2.2 Digitaalse kaksiku koostamine.....	45
2.2.3 Digitaalse kaksiku valideerimine	49
2.3 Tootmisprotsessid ja tehnoloogia.....	51
2.3.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmistehnoloogia	51
2.3.2 Terratso elementide tootmistehnoloogia	52
2.4 Ettevõtte ja selle äristrateegia kirjeldus	53
2.4.1 Ettevõtte kirjeldus	53
2.4.2 Ettevõtte äristrateegia.....	54
3 JUHTUMIUURING	55

3.1 Olukorra tuvastamine	55
3.1.1 Trepimarsside vaatlusuuringu tulemused	55
3.1.2 Terratso tootmise vaatlusuuringu tulemused.....	62
3.2 Raiskamiste tuvastamine ja analüüs	66
3.2.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmine	67
3.2.2 Terratso elementide tootmine	69
3.3 Stsenaariumite koostamine ja modelleerimine.....	73
3.3.1 Stsenaariumite kirjeldus	73
3.3.2 Terratso tootmisstsenaariumite modelleerimine	75
3.4 Testimine ja hindamine.....	77
3.4.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmine	78
3.4.2 Terratso tootmisstsenaariumite katsetamine.....	79
3.5 Lühikokkuvõtte ja arutelu	81
KOKKUVÕTE	83
SUMMARY	84
KASUTATUD KIRJANDUS.....	85
LISAD	88
Lisa-1. Trepimarsside tootmise vaatlusuuringu tulemused.....	89
Lisa-2. Trepimarsside tootmistehnoloogia	96
Lisa-3. Terratso detailide tootmistehnoloogia.....	100
Lisa-4. Painutatud armatuur elementide hinnavõrdlus.....	105
Lisa-5. Terratso digitaalse kaksiku graafik	107
Lisa-6. Stsenaarium 1- graafikud.....	108
Lisa-7. Stsenaarium 2- graafikud.....	109
Lisa-8. Stsenaarium 3- graafikud.....	111
Lisa-9. Abrasiivlihvimise katse tulemused	113
Lisa-10. Betoonisegu jääkide kasutamine	115

EESSÕNA

Lõputöö eesmärk on hinnata ettevõtte AS Alistron tootmisprotsesside kulusäästlikkust ning koostada stsenaariumid säästlikumaks tootmiseks. Stsenaariumite katsetamiseks ja hindamiseks võeti kasutusele digitaalne kaksik, mis koostati tarkvaras Simio.

Töö käigus hinnati raudbetoonist trepimarsside ja terratso elementide tootmisprotsessi. Kõige suuremad raiskamised tuvastati terratso tootmises ning teostati katse, mille tulemused võimaldasid likvideerida pahteldamisetapi ning kooskõlas väljatöötatud stsenaariumitega tehti ettevõtte juhatusele ettepanek terratso tootmisvõimekuse tõstmiseks 45% võrra. Raudbetoonielementide tootmises ei esinenud olulisi puudusi, kuid vajab eelkõige materjalijääkide optimeerimist. Betoonijääkide vähendamiseks alustas AS Alistron vundamendiplokkide ja vastukaalude tootmist üleliigsest betoonisegust.

Lõputöö autor soovib tänada AS Alistroni meeskonda, kellega koostöös sai teostatud stsenaariumite analüüsid, testimised ja andmete kogumised olemasoleva protsessi kohta. Samuti soovib autor tänada Ergo Pikast magistritöö juhendamise eest.

Võtmesõnad: digitaalne kaksik, Simio, timmitud tootmine, raudbetoonist trepimarsid, terratso, magistritöö

TABELITE LOETELU

Tabel 1. Timmitud tootmise tööriistad	27
Tabel 2. POS. 1 läbilaskevõimekus tootmispäevadel	56
Tabel 3. POS. 1 tööülesannete täitmise keskmised näitajad vaatlusperioodil 27.09.2022- 11.10.2022.....	58
Tabel 4. Materjalide kasutamine POS. 1 tellimuse valmistamiseks	59
Tabel 5. POS. 2 läbilaskevõimekus vaatlusperioodil	60
Tabel 6. POS. 2 tööülesannete täitmise keskmised näitajad vaatlusperioodil 18.10.2022 - 21.10.2022.....	62
Tabel 7. Materjalide kasutamine POS. 2 tellimuse valmistamiseks	62
Tabel 8. Terratso töötlemisetappide läbilaskeajad	64
Tabel 9. Fikseeritud materjalide transportimise kestus etappide vahel vahetuse jooksul.....	65
Tabel 10. Fikseeritud positsioonide läbilaskevõimekused	66
Tabel 11. Tootmisseisakute maksumus vaatluspäevadel	67
Tabel 12. Olemasolevad läbilaskeajad positsioonides ja simuleeritavad stsenaarium 1-s.....	76
Tabel 13. Armatuur positsioonide hinna võrdlus.....	105

JOONISTE LOETELU

Joonis 1. DMAIC visualiseering.....	28
Joonis 2. Digitaalse ja füüsilise kaksiku andmevoog	32
Joonis 3. Kasutajaliides.....	45
Joonis 4. Tööpäevade graafiku planeerimine.....	46
Joonis 5. Tootmise lähtepunkt ehk "Source"	46
Joonis 6. RateTable1 ehk terratso lahtirakestamise graafik	47
Joonis 7. Server ehk tootmisetappi kirjeldav üksus	48
Joonis 8. Trepimarsside tootmispositsioonide digitaalse kaksiku mudel	49
Joonis 9. Digitaalse kaksiku simulatsiooni tulemus.....	50
Joonis 10. POS. 1 digitaalse kaksiku valideerimine	51
Joonis 11. POS. 2 digitaalse kaksiku valideerimine	51
Joonis 12. Tegevuste keskmine ajaline hõivatus POS. 1 tellimuse tootmiseks vaatlusperioodil 27.09.2022-11.10.2022.	57
Joonis 13. Tegevuste keskmine ajaline hõivatus POS. 2 tellimuse tootmiseks vaatlusperioodil 18.10.2022-21.10.2022.	61
Joonis 14. Tootmisetapp 1. Abrasiivlihvimine.....	70
Joonis 15. Tootmisetapp 4. Pakkimine - tootmisgraafik	70
Joonis 16. Tootmisetapp 3. Poleerimine - tootmisgraafik	71
Joonis 17. Tootmisstsenaarium 1 - mudel.....	75
Joonis 18. Stsenaarium 2 - simuleerimismudel.....	76
Joonis 19. Parameeter, mis koormab abrasiivlihvimist ainult 6 tunniks.....	77
Joonis 20. Teine inimene lisandub pakkimisetappi kell 13.00	77
Joonis 21. Stsenaarium 3 - simuleerimismudel.....	77
Joonis 22. Abrasiivlihvimiskonveieri läbilaskevõimekus	80
Joonis 23. Trepimarsside tootmistegevuste kestused	89
Joonis 24. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 27.09.22	90
Joonis 25. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 28.09.22	90
Joonis 26. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 30.09.22	91
Joonis 27. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 04.10.22	91
Joonis 28. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 06.10.22	92
Joonis 29. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 07.10.22	92
Joonis 30. POS.1- Tegevuste ajaline hõivatus 11.10.22	93

Joonis 31.POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 18.10.22	93
Joonis 32. POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 19.10.22	94
Joonis 33.POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 20.10.22	94
Joonis 25. Trepielementide valmistamise tehnoloogia.....	96
Joonis 26. Terratso tootmistehnoloogia skeem	100
Joonis 27: Tootmisetapp- 2. Pahteldamisetappi tootmisgraafik	107
Joonis 28. Poleerimisetapi tootmisgraafik	108
Joonis 29. Pakkimisetapi tootmisgraafik.....	108
Joonis 30. Olemasoleva abrasiivlihvimiskonveieri tootmisgraafik.....	109
Joonis 31. Lisanduva abrasiivlihvimiskonveieri tootmisgraafik.....	109
Joonis 32.Poleerimisetapi tootmisgraafik.....	110
Joonis 33. Pakkimisetapi tootmisgraafik.....	110
Joonis 34. Olemasoleva seadme Kasins tootmisgraafik.....	111
Joonis 35. Lisanduva seadme Kasins tootmisgraafik.....	111
Joonis 36. Faasimiskonveieri Terzago tootmisgraafik	112
Joonis 37. Pakkimisetapi tootmisgraafik.....	112

SISSEJUHATUS

Käesolevas magistritöös kirjeldatakse monteeritavate raudbetoonist trepielementide ja terratso tootmise tehnoloogilist protsessi ning tootmisega seotud eripärasid ja väljakutseid, millega tuleb sageli kokku puutuda Eesti turul. Sellisteks väljakutseteks on ehitusturu langus, energiaallikate hinnatõus, toormaterjalide kallinemine ja tööjõu puudus. Autor võtab uurimisobjektiks AS Alistroni - raudbetoonelementide ja terratso tootmisettevõtte.

Konkurentsivõimekuse säilitamiseks on vajalik olemasolev tootmisprotsess muuta säästlikumaks, mis tekitaks võimaluse langetada tootmise hinda. Eelkõige on vajalik tuvastada raiskamiste asukohad olemasolevas tootmisprotsessis ning seejärel määrata raiskamise tekkepõhjus. Raiskamiste elimineerimiseks koostatakse tootmisstsenaariumid, mille eesmärk on tootmisprotsesside efektiivsuse tõstmine. Tootmisstsenaariumite hindamiseks ja katsetamiseks koostatakse tootmise digitaalne kaksik, mis moodustab stsenaariumite kontrollmehhanismi.

Digitaalne kaksik annab võimaluse katsetada erinevaid tootmisstsenaariume ilma olemasoleva tootmisprotsessi muutmiseta, tänu millele ei teki täiendavaid kulusid juhul, kui stsenaarium osutub sobimatuks. Digitaalsete kaksikute kasutamine on leidnud laialdast kasutamist, näiteks Dallasse lennujaama terminalide töö katsetamisel, samuti Soome rahvusmuuseumi projekteerimis- ja ehitamisprotsessis.

Lõputööd saab pidada aktuaalseks, kuna digitaalse kaksiku loomist on võimalik kasutada ka teistes ehitusega ja tootmisega seotud protsessides. Paljude muutuvate teguritega protsesside riskide hindamine ja ennustamine muutub raskeks, mis eeldab erinevate prognooside võimalust. Digitaalse kaksiku põhieesmärk on anda parem ülevaade läbivatest protsessidest ja leida kõige efektiivsem teekond optimaalse tulemuse saavutamiseks.

Lõputöö eesmärk on tuvastada raiskamised olemasolevas tootmisprotsessis ning koostada kulusäästlikumad tootmisstsenaariumid raudbetoonelementide ja terratso tootmiseks, kasutades digitaalset kaksikut stsenaariumite hindamiseks. Selleks püstitati uurimistööle neli ülesannet ja uurimistöö küsimust. Ülesanded lähtuvad AS Alistroni vajadustest:

1. Teostada olemasoleva tootmisprotsessi ning tootmisetappide raiskamiste analüüs ning koostada hinnang olemasolevale protsessile.
2. Pakkuda välja stsenaariumid kulusäästlikuma tootmisprotsessi kavandamiseks.
3. Luua tootmisprotsessile digitaalsed kaksikud stsenaariumite simuleerimiseks ja võrdlemiseks.
4. Leida optimaalne lahendus tootmisprotsessi parandamiseks.

Eesmärgi täitmiseks ja ülesannete lahendamiseks püstitati neli uurimistöö küsimust:

1. Millised on raudbetoonelementide valmistamise suundumused ja väljakutsed?
2. Millised on timmitud tootmise ja digitaliseerimise alased parimad teadmised tootmise kulutõhususe parandamiseks?
3. Millised on raudbetoonelementidehase AS Alistron tootmisprotsessi raiskamised ja millest need tekivad?
4. Millised on AS Alistroni tootmisprotsesside kulutõhususe parandamise võimalused ja nende võimalikud mõjud?

Magistritöö on jagatud mitmeks etapiks. Esmalt antakse kirjanduse ülevaade, milles käsitletakse raudbetoonelementide tootmise väljakutseid ja timmitud tootmise põhinõudeid ning reegleid. Järgmisena tehakse olemasoleva tootmisprotsessi analüüs, mille käigus tuvastatakse raiskamised ning raiskamiste põhjused. Kolmandaks etapiks on digitaalse kaksiku koostamine analüüsist saadud tulemuste alusel. Viimaseks etapiks on stsenaariumite koostamine ja simuleerimine ning hindamine digitaalse kaksiku abil.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Selles peatükis kirjeldatakse maailma tootmisarenduse ajalugu ja põhilisi tootmissüsteemide printsiipe. Probleemi täpsemaks kirjeldamiseks ning lahenduse leidmiseks on tarvis keskenduda ajaloolisele tootmissüsteemi arengule ja tootmisrevolutsioonidele, mis võimaldasid murda mitmeid tootmiskriise ja tootmisega seotud probleeme. Sageli on probleemile lahenduse leidmiseks tarvis minna kümneid aastaid tagasi ning suure tõenäosusega on vähemalt üks või mitu probleemi juba ilmnunud ning lahendus probleemile eelnevalt leitud, kuid probleemile lahenduse leidmiseks on tarvis esmalt see probleem tuvastada ning suuta õigesti kirjeldada. Probleemi õige kirjeldamine on pool probleemi lahendusest (John Dewey). Kirjanduse ülevaate käigus otsitakse vastust järgnevatele küsimustele:

Milliseid tegevusi saab pidada väärtust mittelisavateks?

- Kuidas parandada tootmise tõhusust?
- Millised on tootmise digitaliseerimise võimalused ning kuidas neid kasutada protsesside parandamiseks?

1.1 Raudbetoelementide tootmis suundumused ja väljakutsed

Tootmine on kaupade tekkimine seadmete, inimtööjõu, masinate, tööriistade ning keemilise või bioloogilise formuleerimise abil. Tootmine eeldab üldjuhul tooraine(te) modifitseerimist või kombineerimist sellisel kujul, et lõpptoote väärtus on suurem kui kasutatavatel toorainetel. Lõpptoode saab olla nii eraldi kasutatav valmistoode, nagu mobiiltelefon, või vajalik koostisosa teisele tootele, nagu raudbetoonist trepielement, mis on vajalik hoone funktsionaalseks kasutamiseks. Sõna „manufacturing“ pärineb ladinakeelsest sõnast „manu“- käsi ja „factura“- töötamine, mis otsetõlkes tähendaks käsitööd. Nüüdisaja tootmine on astunud oluliselt edasi käsitöö formaadist, mis väljendub mitte ainult käsitöö kasutamises, vaid ka erinevate kombineeritud meetodite kasutamises, nagu keemiline või masintöötlemine ja palju muud, mis muudab tootmisprotsessi säästlikumaks ja efektiivsemaks. [1] [2] Käesolevas töös käsitletakse raudbetoelementide tootmisega seonduvaid raskusi ja väljakutseid, kuid olenemata sellest on enamik levinumaid tootmisega seonduvaid probleeme ja paradokse piisavalt universaalsed, et leida analooge ja sarnasusi kõikide tootmissektorite vahel. Selline sarnasus tähendab ka seda, et lahendused, mida on pakutud või kirjeldatud varem, on samuti sobilikud raudbetoelementide tehase kontekstis.

Monteeritavate raudbetoelementide valmistamine on kiiresti arenev ehitussektori osa. Tulenevalt olukorrast, kus ehitusehind pidevalt kasvab, tekib vajadus ehitushinda vähendada. Ehituse hinna vähendamise efektiivseteks meetoditeks on vähendada materjali kulu ja ehituse kestust. Ehituse kestuse ja materjali kulu vähendamine on muutunud lihtsamaks tänu nn tehasele ehitamisele, mis võimaldab saata ehitusplatsile tehases ettevalmistatud elemendid, mis monteeritakse kohapeal. [3]

Raudbetoelementide tootmisettevõtted võimaldavad teostada toorainetest valmiselemente, mis on pärast tehast väljumist valmis kiireks monteerimiseks ehitusplatsil. Valmiselementi kasutamise eeliseks monoliitelementi ees on väiksem materjali- ja ajakulu, mis mõjutab positiivselt nii ühiku kui ka lõpptoote maksumust. Raudbetoelementide tootmisettevõtted on pidevas konkurentsisis ning enda konkurentsieeliste säilitamise nimel peavad nad suutma hakkama saada järgmiste raskuste ja väljakutsetega: [4]

1. Pidev ja tihe hinnakonkurents
2. Tootmise jalajälje ranged nõuded
3. Toormaterjalide puudus ja kallinemine
4. Inimtööjõu kallinemine ja puudus
5. Energiaallikate kallinemine

Nimetatud raskustega hakkama saamiseks rakendatakse tootmisettevõtetes erinevaid tootmise optimeerimise kontseptsioone. Et oleks võimalik välja töötada optimeerimise kava, peab olema arusaam, milline tootmisetapp vajab optimeerimist.

Et oleks võimalik luua selline optimeerimisstsenaarium, mis kataks kõik viis mõjutegurit, on tähtis koostada tegurite hinnang ning valida, millised on primaarsed ning millised sekundaarsed. Arvestades Eesti raudbetoelementide tootmise turuseisu, pakuvad kõige suuremat väljakutset tootmisele energiaallikate kallinemine, inimtööjõu kallinemine ja puudus ning toormaterjalide puudus ja kallinemine. [5]

1.1.1 Inimtööjõu kallinemine ja puudus

Raudbetoelementide tootmine on kitsalt seotud käsitöö ja inimressurssiga. Kui leiab aset ehitusturu kasv, tekib sageli kohe inimressurssi puudus. Eestis on aastatega tekkinud tendents, kus Eesti tööjõudu kasutati rohkelt Soome ja Rootsi turgudel ning seoses sellega tekkis tööliste puudus, mida suudeti kompenseerida välismaa tööjõudu kasutades. Kuni 2022. aastani oli Eesti turul levinud peamiselt Ukrainast pärinev tööjõud, mida täiendasid töötajad Moldaaviast, Rumeeniast ja ka teistest riikidest.

Pärast Ukraina kriisi algust olid paljud Ukraina töötajad sunnitud Eestist lahkuma ning tööjõupuudus hakkas avaldama negatiivset mõju tootmisgraafikutele. [6]

Vaatamata sellele, et lisatööjõudu on võimalik teatud aja jooksul leida või kasutada renditööjõudu, tekib olukord, kus uut töötajat peab koolitama ja õpetama kasutama raudbetooni tootmises kasutatavaid seadmeid, tegema teatud töötappide spetsiifilist tööd ja andma töötajale algsed teoreetilised teadmised, miks asju just niimoodi tehakse. Töölise juhendamine ja väljaõpe tähendab alati väärtust mittelisavaid tegevusi ning samuti ka täiendavaid rahalisi kulutusi, lisaks tootmistempo ja toote läbilaskeaja vähenemist, mis on tingitud töötaja kogemuse puudusest konkreetse töö tegemisel. [7] Oluline on ka see, et suureneb puudulike toimingute arv, mis avaldab mõju kvaliteedile, ja olukorra parandamiseks on tarvis kulutada ajalist ja rahalist ressursi töö ümbertegemiseks.

Kogenenud töötajad on tootmisettevõttele oluline ressurss. Sellistel töötajatel on nii praktilisi oskusi kui ka teoreetilisi teadmisi, tänu millele suudavad hoida optimaalset läbilasketempot enda töökohtadel. Arvestades inflatsiooni ja töötajate vajadusi, tekib olukord, kus teatud aja jooksul on ettevõtte sunnitud suurendama töötajate palka, vaatamata sellele, kas ettevõttel on selleks piisavalt ressursi. [6]

Nendest asjaoludest tingituna on hakanud tootmisettevõtted otsima viise tootmisprotsessi tõhustamiseks ja automatiseerimiseks. Tootmine ei ole võimalik ilma inimese sekkumiseta protsessi, kuid tänapäeva tootmise tendents liigub selles suunas, et asendada käsitöö etapid võimalikult maksimaalselt masinatega. See tendents tuleneb sellest, et protsesside teostamisel masinatega ei ole tootmisprotsess nii palju sõltuv inimteguritest. Inimtööjõu asendamine mehhanismiga minimeerib tootjal inimvea tekkimise võimaluse või seisakud, mis on samuti tihti tingitud inimteguritest. Käsitööga ei ole tihti võimalik saavutada nõutud tootmistempot, kvaliteeti ja täpsust ning sellises olukorras on tarvis analüüsida, kui palju muudab olukorda masina kasutuselevõtt.

Tootmismasinad ja -mehhanismid on seadmed, mida kasutatakse tootmisprotsessis, mis võimaldavad otseselt toorainest saavutada lõpptoodet. Tänapäeva masinaehitus võimaldab tellida ja kasutada väga mitmesuguseid tootmismehhanisme. On võimalik tellida nii tootmismehhanismide standardlahendusi kui ka eritellimusi, mis võimaldavad teostada väga spetsiifilist ja eripärast tööd. [8]

Enne uusi investeeringuid seadmetesse peab olema veendunud, et olemasolevad seadmed on maksimaalselt efektiivses ja optimaalses kasutuses. Efektiivne kasutamine tähendab masina maksimaalset tootmisvõimekuse saavutamist. Ei ole ratsionaalne osta lisaseadet ilma veendumata, et olemasoleva seadme ressurss on täielikult ära

kasutatud. Tihti on selline veendumine üks kõige keerulisemaid tegevusi, sest eeldab tootmisprotsessi ja tootmisliini põhjaliku analüüsi. [9]

Raudbetoelementide tootmine ei ole tänapäeval võimalik täiesti autonoomselt, kuid pidevalt tekivad turule uued seadmed, mis võimaldavad automatiseerida betooni silumist, armeerimist, vibreerimist või mõnda muud protsessi, kuid tihti on piiranguks elemendi kuju või kaal. Igal raudbetooni tootmistehasel on olemas kindel tootmistehnoloogia ja kindel tootevalik, millele on tehas spetsialiseerunud. Eelkõige tuleb enne mingi asenduse tegemist olla veendunud, et inimtööjõu asendamine on selles etapis võimalik ning on tarvis aru saada, kas masin suudab asendada inimtegevust täielikult, osaliselt või peab jääma inimese ja seadme koostöö. Tänapäeval ei ole võimalik rääkida täielikust automatiseerimisest raudbetoelementide tootmises, sest nimetatud protsess nõuab liiga suuri investeeringuid ning saavutatav tulemus ei ole sellist investeeringut väärt. [9]

1.1.2 Toormaterjali puudus ja kallinemine

Raudbetoelementide tootmisel on ülimalt oluline stabiilsete toormaterjalide ja kulumaterjalide tarneahelate olemasolu. Toormaterjalideks on raudbetooni tootmises tsement, paekillustik, graniitkillustik, armatuur, liiv. Lisaks suur hulk kulumaterjale, nagu erinevad vineeriliigid, saematerjalid, kruvid ja keemilised betoonilisandid.

Enamik tootmislepinguid sõlmitakse fikseeritud maksumusega, neli ja rohkem kuud enne tootmise algust ning sellises olukorras on suur roll toor- ja kulumaterjalide õigeaegsel tarnel ja materjalihindade stabiilsusel, kuna elemendi hind koosneb eelkõige kasutatavate materjalide maksumusest ja tööjõukuludest. Kui tööjõukulu on prognoositav, siis materjalihindade kallinemine võib toimuda iga päev ning sellises olukorras on tehas tulenevalt lepingulisest kohustustest sunnitud tootma elemente alla pakutud hinna. [10]

Veel kriitilisemaks muutub olukord, kus mingi konkreetne materjal, mis on vajalik tootmiseks, kaob turult ning sellised olukordi on ülimalt raske prognoosida. Materjali asendamine analoogiga või hoopis teistsugusega tähendab tootmistehnoloogia muutmist või täiendamist. Sellises olukorras peab eelkõige asuma otsima analoogset

toodet ning seejärel leidma viisi, kuidas analoogne toode kasutusele võtta ilma lõpptoote kvaliteeti mõjutamata ning toote läbilaskeaega suurendamata. [10]

1.1.3 Inimeste roll tootmises ja motivatsioon

Kaupa ei ole võimalik toota ilma inimeste sekkumiseta, mistõttu on töötajad ettevõttele väga oluline ressurss, millel omakorda on suur roll ettevõtte edukuses. Inimene veedab 45% enda päevast töökohal ning ettevõttele on oluline tagada töötajatele mitte ainult stabiilne ja konkurentsivõimeline palk ning sobilikud töövahendid, vaid ka motiveerida inimest tööd tegema. Töötajatele peab selgelt tekitama arusaama, et nad on lahutamatu osa ettevõtte missioonist, tänu millele tunnevad nad end väärtuslikumalt ja on rohkem tööle pühendunud, sest tunnevad suuremat kohustust ettevõtte missiooni edukamas täitmisel. Samuti avaldub töötajate arusaam, et nende töö mõjutab ettevõtte tulevikku, mis tähendab ka nende töökoha säilitamist, positiivselt tehtavas töös. [11] [12]

Igal meeskonnaliikmel on enda oluline ja väärtuslik roll tootmisprotsessis ning tulenevalt sellest, et kõik tootmisetapid on omavahel seotud, peavad töötajad olema head meeskonnamängijad tootmisprotsessi tõhususe säilitamise nimel. Kohusetundlikkus enda tööloigus teiste töötajate ees on see, mida peab kollektiivis harjutama ja õppima. Töökollektiivi efektiivsuse eest kannab vastutust eelkõige tööandja, rakendades korrektseid ja sobilikke juhtimissüsteeme ja strateegiaid, mis võtaksid arvesse enamiku töötajate vajadusi. Personalijuhi või tootmisjuhi üks olulistest ülesannetest on luua toimiv ja koordineeritud meeskond, mis suudaks tänu koostööoskustele tõhusalt ja säästlikult töötada nii enda tuleviku kui ka ettevõtte missiooni täitmiseks. Personalijuhtimist on tootmisettevõtte kontekstis võimalik defineerida järgmiselt - pidev kollektiivi mõjutamise protsess, kollektiivi tegevuste koordineerimine tootmise käigus eesmärgiga jõuda maksimaalse tulemuseni minimaalsete kuludega. [11] [12]

Töötaja motiveerimiseks on olemas erinevaid viise, millest kõige efektiivsemaks on töötaja rahaline premeerimine, mis tekitab töötajas täiendavat soovi maksimaalselt töösse panustada. Premeerimise kord peab olema ettevõttes kindlalt paika pandud ning reeglid peavad olema kõikidele töötajatele selged ning premeerimise eeskirjas ei tohi olla erandeid - personalisise konflikte vältimiseks ning võrdsete töötingimuste säilitamiseks. [11] [12]

Samuti on inimkäitumise psühholoogia alusel tõestatud, et isegi inimese suuline kiitmine avaldab positiivset mõju tema töö efektiivsusele ning kui on märgatud, et inimene on kiidusõnu väärt, ei tasu seda varjata. Samuti peab ettevõtte juhtivpersonal olema valmis konstruktiivse kriitika ja tagasiside andmiseks. Tihti on vajalik korraldada

töötajatega tagasiside andmise vestlusi, kus arutada nii töötaja tugevaid kui ka nõrgemaid külgi, tänu millele suudab töötaja enda tegevusi korrigeerida. [11] [12]

Sama oluline kui töötajale tagasiside andmine tema tehtud tööst on ka töötaja arvamus tööandja kohta. Töötaja võib teada tootmisprotsesse viimse detailini ning anda konstruktiivset arvamust teatud etappide kohta, st mida tehakse õigesti ja mida saaks teha tulevikus paremini ja efektiivsemalt ning mis on hetkeseisuga puudu ideede elluviimiseks. [11] [12]

1.1.4 Kulude määramine ja vähendamine

Üks peamisi aspekte, mis tänapäeva ehitusturul võimaldab olla konkurentsivõimeline, on toote hind. Tootmisprotsessi tõhususe tõstmise üks põhilisi eesmärke on ka toodete hinna vähendamine. Eestis ja muudes Skandinaavia riikides on väga tugev raudbetoonelementide hinnakonkurents ning konkurentsipüsümise tagamiseks peab ettevõtte leidma sellise lähenemise tootmisprotsessile või mõnele tootmisetapile, mis annaks võimaluse toota elementi maksimaalse kasuteguriga. Nagu eelnevalt nimetatud, koosneb raudbetoonelemendi tootmisprotsess erinevatest etappidest ning nende etappide arv, kestus, tõhusus ja ressursivajadus määratlevad toote hinna. Toote maksumuse vähendamise põhiprintsiibi kohaselt on protsessi hinna langetamiseks tarvis langetada üksikute tootmisetappide hinda. [13]

Alati on maksumuse vähendamist mõistlik alustada väiksematest muudatustest ja jälgida, milliseid kulusid oleks võimalik vältida ilma tootmisprotsessi tehnoloogiasse sekkumiseta. Väiksemad muudatused rahatarkuses ja kuluridades annavad esimesed vihjed, kuidas muuta protsess rahaliselt efektiivsemaks. Järgnevalt vaadeldakse tootmisprotsessi hinna vähendamise klassikalisi samme, millest tuleks alustada kulusäästliku tootmise suunas liikumisel. Kulude vähendamine peab alati algama põhjalikust analüüsist ning veendumisest, et tootja teab kõiki enda kuluridu. Kuluridade audit annab ülevaate, milliste kuludega ettevõtte igakuiselt kokku puutub, nagu seadmete rent, haldusteenused, kindlustusmaksed, kontoritarbed, palgad, remondid jne. Kulude täieliku ülevaate olemasolul tekib arusaam, millist kulu on võimalik lihtsamalt kõrvaldada, näiteks sõlmides pikaajalisi lepinguid puhastusfirmaga, mis teatud juhul on odavam kui palgata eraldi koristaja [14].

Iga tootmine on seotud kulumaterjalide kasutamisega ja ostmisega, mille hinnal on märkimisväärne roll toote lõppmaksumuses. Kulumaterjalide hindu vähendades on võimalik vähendada toote lõppmaksumust. Tihti kasutatakse ühe ja sama tarnija tooteid

mitmeid aastaid ilma veendumata, et turul on konkurentsivõimelisemaid alternatiive. Materjalide soodsama hinna leidmiseks on erinevaid viise: [14]

1. Sõlmida tarnijatega pikaajalised tarnelepingud fikseeritud hinnaga. Sellises olukorras on tarnijad tihti nõus ühikuhindu langetama, tänu millele suurendab tarnija enda käivet.
2. Paljud tarnijad on nõus tegema allahindlusi enda toodetele tingimusel, et materjali eest tasutakse enne tarnimist – kreditarvete vältimiseks.
3. Materjali on osta odavam hulgihinnaga ning suure koguse korraga väljaostmise korral vähenevad ühikuhinna maksumus ning tarnekulud. Selle lähenemise eelduseks on materjali ladustusala/-ruumi olemasolu ja materjali ladustamistingimuste tagamise võimalus.
4. Turuolukord muutub pidevalt, seega ei ole põhjust olla ühes tarnijas kinni, mõistlik on võtta alati mitmeid hinnapakumisi ning lähtuda mõistlikumast variandist, mitte püsida mugavustsoonis.

Tootmisprotsess koosneb erinevatest etappidest ning tootmist efektiivsemaks muutes suudab tootja vähendada kulusid ja langetada tootmishinda. Igas tootmises on võimalik leida tegevusi, mida on võimalik vältida või mingil moel kombineerida teiste etappidega, tänu millele vähendatakse inimtöötunde ja muude ressursside kulutamist. Oluline roll on seadmete ja mehhanismide õigeaegsel hooldusel. Seadme katkiminek tähendab suuremat remondikulu ja pikemat tööde seisakut. Õigeaegne hooldamine aitab vältida remondikulud ning hooldust on võimalik planeerida, mis tähendab, et on võimalus seda arvestada tootmisgraafikutes. [14]

Materjalide efektiivsem kasutamine on eelduseks püsikulude vähendamisel. Paljud materjalid võimaldavad uuesti kasutamist samal etapil või täita abifunktsiooni järgnevatel etappidel. Töötaja üldjuhul ei arvesta, et mõnda materjali saab korduvalt kasutada, kuna mugavam on töötada uuega. Mõnikord on mõistlikum osta kallim materjal, mille ressurss võimaldaks materjali elutsükli pikendada ning selliselt hoitakse kokku materjali soetamise kulu, vähendatakse jääke ning toodetakse kaupa keskkonnasäästlikumalt. [15] [14]

Materjalijääke on tarvis sorteerida. Teatud materjalide (nt saematerjal, pakkematerjalid) jääke, ajutisi kinnitustarvikuid on võimalik taaskasutada. Sorteeritud jääkide utiliseerimine on ettevõttele oluliselt soodsam. [15] [14] Toote hind sisaldab ka tarnekulusid kliendile, mis tähendab, et tarnekulude vähendamisega on võimalik vähendada toote maksumust, mis on omaette konkurentsieelis turul. Tarne hind moodustub kauba massist, gabariitidest, tarnekaugusest ja marsruudi keerukusest. Tarnekaugust ei suuda tootja mõjutada, kuid tarnete korrektne logistika suudab efektiivsemalt ja odavamalt korraldada toodete transportimist. Ebaefektiivselt kasutatav

veoauto ruum või kauba gabariidi ja massi suurendamine liigse pakkimisega, mida oleks võimalik vältida ning mis ei too täiendavat kasu, on mitteväärtuslik ressursside kasutamine ning selle vältimisega on võimalik vähendada toote maksumust või suurendada kasumit. [14] [16]

Energiatarbimine on samuti märkimisväärne kuluallikas tootmisprotsessis. Etappide ja töökohtade energiatarbimise analüüsiga on võimalik kokku hoida kulusid, vähendades energiatarbimist seal, kus puudub selle järele vajadus tootmisprotsessi tehnoloogiast tulenevalt. Iga seade ei ole pidevas töös ning ei tasu jätta seda vooluallikasse ühendatuna siis, kui sellega tööd ei tehta. Pikemas perspektiivis energia kokkuhoidu jälgides, lihtsamaid energiatarbimise reegleid täites (nt valgustuse välja lülitamine töövahetuse lõpus) võib saavutada märkimisväärselt väiksemad energiaarved.

Energiaallikate hinnamuutuste tõttu on mõistlik investeerida erinevate energiaallikate kasutamise võimalusse. Tulenevalt turuolukorra muutustest saab tootmisüksus vahetada näiteks soojusenergiaallikat ja kütmistehnoloogiat ning vastavalt ühikuhindadele kasutada soodsamat energiaallikat. [14]

1.2 Timmitud tootmine (Lean production)

Kulusäästliku tootmise kontseptsioon tekkis tänu raamatule „Masin, mis muutis maailma“, kus kirjeldatakse, kuidas Toyota suutis saavutada efektiivse tootmise, ning raamatus kirjeldatakse kulusäästlikku tootmist üldistatud kujul järgnevalt - tehase timmitud tootmine on inimestele parim viis asjade valmistamiseks. See pakub paremaid tooteid suuremas valikus madalamate kuludega. Oluline on ka see, et timmitud tootmine pakub töötajatele rohkem väljakutseid, kuid samas rahuldust teostatud tööga igal tasandil alates tehast kuni peakontorini. Sellest järeldub, et kogu maailm peaks võtma kasutusele säästliku tootmise ja seda nii kiiresti kui võimalik. [17] Selle raamatu autorid osalesid uurimistöös, mille käigus teatati neljast põhilisest timmitud tootmise

edu teguritest: meeskonnatöö; kommunikatsioon; ressursside tõhus kasutamine ja raiskamise kõrvaldamine; pidev täiustamine.

Lähtuvalt selle edu teguritest koostasid 1996. aastal Womac ja Jones juhendi, mis kirjeldab, mida peab ettevõtte tegema, et olla kulusäästlik: [18]

- Määra väärtus lõppkliendi seisukohalt.
- Määra väärtusahel ja kõrvalda kõik sammud, mis väärtust ei lisa.
- Pane väärtust loovad sammud voolama, et toode liiguks sujuvalt kliendi poole.
- Kui vool on loodud, lase kliendil väärtust ühe etapi haaval ülesvoolu tõmmata.
- Kui sammud 1–4 on täidetud, hakkab protsess otsast peale ning kestab lõpmatuseni.

Timmitud (kulusäästlik) tootmine on kontseptsioon, mille eesmärk on optimeerida tootmisprotsessi, kõrvaldades kõik etapid ja tegevused, mis ei lisa tootele väärtust. Põhiprintsiip koosneb pidevas tootmisprotsesside arendamises. Eesmärk on saavutada tootmismeetod, mis on kulusäästlik ja piisavalt paindlik, et suuta alati katta kliendi muutuvaid vajadusi. Varude tootmine, ooteaegade ja tööde seisakute tekkimine on ettevõttele täiendav kulu, mis ei lisa väärtust tootele ega kliendile ning kulusäästlikkuse mõistes on raiskamine kõik, mis ei lisa väärtust või tekitab täiendavaid kulusid. [19]

Raiskamise likvideerimine tähendab tootmisettevõttele eelkõige tootmisliini ooteaegade kaotamist, kuna aeg, mille jooksul toode ei saavuta täiendavat väärtust, on ettevõttele täiendav kulu, mida klient ei ole nõus kompenseerima. Ooteajad tekivad eelkõige ületootmise puhul. Tootmisetapid peavad olema üksteise suhtes, tootmisvõimekuse suhtes tasakaalustatud, millega välditakse pudelikaela efekte etappides. Pudelikaela efekti vältimiseks peab tootmine vähendama toote läbilaskeaega ning samas säilitama kvaliteedinõuetele vastavuse.

1.2.1 Ressursi- ja vootõhusus

Ressursitõhusus on näitaja, mis iseloomustab ressursi kasutamismahtu teatud aja vältel. [20] Ettevõtte investeerib ressurssidesse raha ja muid väärtusi ning tihti keskendutakse sellele, et see investeering oleks pidevalt töös; põhiidee seisneb selles, et ressurss ei tekitaks alternatiivkulu. Alternatiivkulu tekib ressursside mittetäielikust ärakasutamisest.

Toote läbilaskeajaks nimetatakse ajavahemikku toote valmistamise algusest kuni toote või kauba kliendini tarnimist. Selle aja jooksul saavutab toode kliendi jaoks väärtuse ning mida kiiremini toode väärtuse saavutab, seda odavam on väärtuse loomine tootja jaoks. Toote läbilaskeaja vähendamiseks tuleb eemaldada tootmisprotsessist kõik tegevused, mis ei lisa tootele täiendavat väärtust. Väärtust mittelisavad tegevused

hõivavad ettevõtte ressursse ning tekitavad lisategevuste vajaduse, mis avaldab negatiivset mõju toote maksumusele, mistõttu väheneb konkurentsivõimekus. Selleks, et ettevõtte suudaks enda tegevused korraldada sellisel viisil, et tegevused lisaksid maksimaalselt väärtust etappidele, peab suutma ettevõtte kombineerida ja hõlmata ka protsesside vootõhususe.

Vootõhusus on väärtust lisavate tegevuste ajakulu summa ja läbilaskeaja suhe. [21] Toote valmimise käigus läbib toode erinevaid etappe ning aeg, mille jooksul saab toode valmis, on esimene oluline komponent vootõhususe saavutamiseks; teiseks oluliseks näitajaks on etapid, mis lisavad väärtust toote valmimisele. Juhul kui mõned etapid ei lisa väärtust toote valmimisele või pikendavad läbilaskeaega, vähendavad need vootõhususe näitajat.

Ressursitõhusus keskendub eelkõige ressursside optimaalsele kasutamisele ehk et ressurssid oleksid pidevalt tööga hõivatud, samas kui vootõhusus kirjeldab kogu protsessi summaarset efektiivsust. Kui ressurssid on pidevas kasutuses, on see ühtepidi hea, kuid jällegi ainult ressursside ärakasutamisele keskendudes võib ettevõtte tekitada endale täiendavaid raiskamisi, mis väljenduvad pudelikaelade tekkimises. Kulusäästlikkus tähendab ressursi ja vootõhususe kombineerimist, mis tähendab optimaalse tootmisstsenaariumi valimist, milles ressursse kasutatakse täpselt nii palju, et tootmine oleks vootõhus.

1.2.2 Tootmise ja timmitud tootmise erinevused

Traditsioonilise ja timmitud tootmise kontseptsioonid on kaks erinevat lähenemist. Traditsiooniline tootmine keskendub pidevalt toodetavale mahule ning eelkõige seab prioriteediks tootmismahtude suurendamise eeldusel, et mida rohkem varu on toodetud, seda rohkem suudetakse välja müüa, või et tänu lihtsamatele operatsioonidele saab toodetud kauba omadusi muuta ning samuti kliendile müüa. Timmitud tootmine vaatleb toodetud varu kui organisatsiooni ressursside raiskamist. Turu olukorrad muutuvad pidevalt ning muutuvad ka turu vajadused. Kui ettevõtte keskendub varude tootmisele, siis tulenevalt turuolukorra muutustest on tootja sunnitud rakendama lisategevusi tootest lahtisaamiseks. Turu muutuste dünaamika tundmine on ülimalt oluline tootjatele ning kui soovida üle minna timmitud tootmisele, peab õppima turgu tundma, et toota seda, mida klient vajab, ning just nii palju, kui klient seda soovib. [22]

Tänapäeval on jõutud arusaamisele, et toote väärtus on määratletud kliendi, mitte tootmissisesest vaatenurgast; et klient oleks huvitatud kauba ostmisest, peab kliendi

jaoks valmistootte väärtus olema suurem kui kauba tootmise väärtus. Selleks, et seda arusaama realiseerida tootmisprotsessis, on tarvis elimineerida kõikvõimalike ressursside raiskamised ja pakkuda kliendile valmistoodet maksimaalselt kiiresti ning võimalikult odavalt. Sellist tootmisfilosoofiat nimetatakse timmitud tootmiseks. [22]

1.2.3 Timmitud tootmise meetodite rakendamine

Timmitud tootmine eeldab protsessi pidevalt arendamist ja parandamist ning juhul, kui tootmises ei ole varasemalt kulusäästlikke (timmitud) tootmismeetodeid rakendatud, on esimese asjana vajalik rakendada järgnevalt nimetatud neli etappi.

1. Esimeseks etapiks timmitud tootmise loomisel peetakse ressursside raiskamiste tuvastamist. Ressursside raiskamine võib seisneda materjalide ebaefektiivses kasutamises, mille tagajärjel tekib suur kogus jääke, või tegevustes, mis ei lisa tootele väärtust. Raiskamise liike on palju, mille tõttu peab eelkõige mõistma, millises etapis raiskamine tekib. [22]
2. Jõudmine arusaamani, millist ressursi raisatakse, kui palju ning kui oluliselt see mõjutab kogu protsessi, mis põhjusel selles etapis ressursi raiskamine tekib. Timmitud tootmise kontseptsioon pooldab arvamust, et kõiki raiskamiskohti on võimalik minimeerida ja eemaldada. [22]
3. Raiskamiste põhjuste likvideerimise stsenaariumite genereerimine ning stsenaariumite mõjuanalüüs kogu protsessiga seoses. Stsenaariumite katsetamine ning tulemuste hindamine. [22]
4. Kulusäästliku ehk timmitud tootmise kasutuselevõtu viimaseks etapiks on testitud lahenduste kasutuselevõtmine ning järgnevalt protsessi pidev täiustamine. [22]

1.2.4 Timmitud tootmise tööriistad

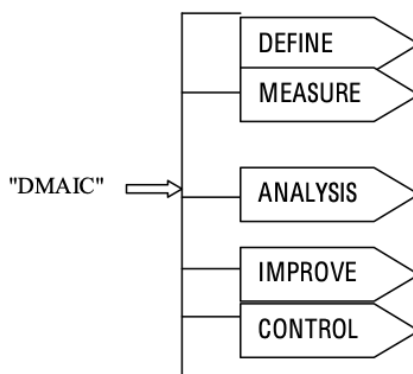
Timmitud tootmise rakendamine tähendab õigupoolest konkreetsete töövõtete ja tööriistade kasutamist. Tööriistade kasutuselevõtu eesmärk on protsesside optimeerimine, raiskamiste elimineerimine ja protsesside parandamine. [22] [23]. Järgnevalt esitatakse timmitud tootmise tööriistad tabeli kujul. (vt Tabel 1)

Tabel 1. Timmitud tootmise tööriistad

Tööriist	Funktsioon
JIT (Just in time) – eduka detailse planeerimise edu pant. [24]	Tooted läbivad tootmisprotsessi vastavalt kliendi ja turu vajadustele. Toota tuleb lähtuvalt konkreetsest vajadusest, mitte toota kaupa tootmisprotsessi säilitamiseks ja varude tekitamiseks.
Kaizen – Jaapanist pärit termin, mida kasutatakse pideva arengu kirjeldamiseks	Tootmise pidev arenemine paranemise suunas. Pidev areng on edu pant.
VSM (Value stream mapping)- väärtust lisavate protsesside väljaselgitamine	Kulude kokkuhoid tänu protsessi kiiremale kulgemisele. Protsessi põhjalik planeerimine ja plaani järgimine. Kõrvalekalded plaanist on lisakulu ja tulu kaotamine
MRP (Material requirement planning)- materjalide vajaduse planeerimine	Lõpptoodete vajadus paneb paika toormaterjalide ja kulumaterjalide vajaduse. Detailne toormaterjalide ja kulumaterjalide vajaduste planeerimine lähtuvalt toodetava kauba kogusest.
Kanban - simple parts movement system. Mida lihtsam on tootmisetappide vaheline logistika, seda efektiivsem on ressursside kasutamine.	Toodete liikumine tootmissüsteemis etappide vahel toimub vastavalt vajadustele. Toode liigub järgmisesse tootmisetappi ainult siis, kui selleks on vajadus ja valmidus. Nii elimineeritakse materjalide vaheladustamine tootmisliinil, millest tulenevalt kaob lisategevuste ja -operatsioonide vajadus.
5S (Sorting, Set in order, Shine, Standardize and Sustain)	Tootmisprotsessi ja tootmisasutuse eeskujulik korrashoid. Tööohutu keskkonna tekitamine töötajatele.
Waste elimination – jääkide elimineerimine.	Väärtust mittelisavate protsesside elimineerimine süsteemist. Kliendi seisukohalt on kõik, mis ei lisa väärtust huvipakkuvale tootele, tema jaoks kulu (waste).

1.2.5 Six sigma ja timmitud tootmine

6 σ +Lean (Six Sigma + timmitud tootmine) – pideva arengu kontseptsioon koostöös kontrollitud meetoditega ja vahenditega tootmis- ja äriprotsesside parandamiseks. See kontseptsioon on orienteeritud kliendi vajadustele ja kvaliteedi kontseptsioonile, mis ühendab mõlema osapoole vajadusi. 6 σ +Lean kontseptsiooniline eesmärk on tagada kliendile vajalik kvaliteet, samas säilitada tootmisprotsessi kulu ja ressursi säästlikkus. [25]. Antud magistritöö kontekstis on mõistlikum vaadelda Six Sigmat kui klassikalist timmitud tootmise täiendavat kontseptsiooni, mis vaatab kulusäästlikkust mitte tootmisfilosoofiana, vaid rohkem praktilise rakendamise kontekstis. Kui rakendada Six Sigmat tootmisettevõtte kontekstis, saab sõnastada põhieesmärgi - finantsiliselt efektiivne ja kasumlik tootmine tootmisprotsessi ja valmistoote defektide elimineerimisega. Six Sigma rakendamisel tootmisprotsessi parandamiseks on kõige mõistlikum võtta kasutusse viieastmeline mudel, mis on tuntud lühendiga DMAIC (Define, Measure, Analysis, Improve, Control) (vt Joonis 1.)



Joonis 1. DMAIC visualiseering

Selle mudeli rakendamisel tootmisettevõttes on tarvis läbida viis etappi [26]:

1. Selgitada välja probleemsete etappide või tegevuste asukohad, mis eeldatavasti mõjutavad kogu protsessi läbiviimist, ehk kestus, maksumus, ressursside otstarbekas kasutamine ja lõpptoote kvaliteet.
2. Põhiliste mõjutegurite mõõtmine, mis mõjutavad kogu protsessi kulusäästlikkust. See etapp võimaldab leida protsessid, mille ülesehituse loogikat või teostamise tehnoloogiat on vajalik muuta.
3. Saadud andmete analüüsimine, et pakkuda välja hüpoteetilisi stsenaariume olukorra muutmiseks.
4. Tuginedes läbiviidud analüüsidele ja katsetustele, parandusmeetmete rakendamisele olemasolevas protsessis või olenevalt parandusmeetmete rakendamise otstarbekusest protsessi uus ülesehitamine. Seda etappi

rakendades on võimalik avastada lisavariante ja -stsenaariume protsessi parandamiseks, mida ei olnud võimalik prognoosida või katsetada.

5. Parandatud protsessi või etapi jälgimine eelneva olukorra tekkimise vältimiseks.

DMAIC-mudeli rakendamine eeldab kogu tootmise üksikasjalikku, nii protsessi kui terviku kui ka iga protsessietapi uurimist. Kui teada protsessi viimse detailini, on võimalik alustada parandusettepanekute tegemist. Tulles tagasi Six Sigma põhieesmärgi juurde, siis selle eesmärgi saavutamiseks on tarvis elimineerida defektid nii tootmisprotsessis kui ka valmistootes. DMAIC-mudeli rakendamisel on defekte võimalik tuvastada etapis nr 2, kuid võib tekkida arusaamatus, mida lugeda defektiks tootmisprotsessis? Tulles tagasi timmitud tootmise teooria juurde, siis defektiks võib lugeda kõiki tegevusi, mis ei lisa väärtust valmistootetele ja toote kasutajale. Jõudes sellele järeldusele, toimub etapis nr 2 väärtust lisavate protsesside ja väärtust mittelisavate protsesside määratlemine. Olukorras, kui väärtust mitte lisavad etapid või tegevused on välja selgitatud, toimub liikumine etappi nr 3, kus analüüsitakse alternatiive väärtust mittelisava tegevuse asendamiseks, minimeerimiseks või elimineerimiseks sellisel viisil, et toote kvaliteet suudaks endiselt katta kliendi vajadusi ja nõudeid. See etapp eeldab eelkõige katsetusi, kuna kõike ei ole võimalik prognoosida ja hinnata. Iga muudatuse tegemine eeldab uute riskide tekkimist. Riskid võivad avalduda toote kvaliteedis, mille tagajärjel kaotab klient huvi toote vastu. Katsetamine annab võimaluse riske maandada ning kui protsessi muudatused ja alternatiivid on läbi katsetatud, on võimalik alustada parandusmeetmete rakendamist ehk etappi nr 4. Katsetuste tegemine on võimalik etappides muudatusi tehes, et näiteks aru saada, kas mingi konkreetse tegevuse asendamine või töötehnoloogia muutmine mõjutab kvaliteeti ning vähendab toote läbilaskeaega, kuid enamik protsesse võivad koosneda mitmekümnest etapist ning alati ei pruugi olla võimalik prognoosida, kas säästmine ühes etapis ei avalda negatiivset mõju n+1 etapile hiljem. Üks variantidest seda olukorda vältida on teha näidis või proovikatsed kogu protsessile ning jälgida protsessi läbiviimist ja lõpptulemust ehk katse ja eksituse meetod. Selline meetod ei pruugi alati olla säästlik ning selle meetodi rakendamine läheb vastuollu timmitud tootmise printsiibiga. Protsessi muutmine võib eeldada suurt ressursi panustamist, nii rahalist kui ka ajalist, ning kui katse ja eksituse meetodi järeldusel selgub, et tehtud muudatus oli ekslik ning

tootmisdefekti vältimine ebaõnnestus või uus defekt tekkis teises kohas, võib rääkida ebaõnnestunud investeeringust. [26]

Tänapäeva digitaaltehnikad võimaldavad läbi viia katsetusi timmitud tootmise printsiipi säilitades. Üks võimalik variant võib olla digitaalsete kaksikute kasutamine (digital twin) (vt 1.3).

Etapis nr 4 on vajalikud muudatused defektide vältimiseks ellu viidud ning kogu protsess toimub säästlikumalt, kiiremini ja optimaalsemalt. Viimane etapp nr 5 tähendab muudetud protsessi jälgimist. Kui defektid olid olemas varasemalt kasutuses olevas protsessis, siis need defektid võivad tekkida ka uues seoses sellega, et uue kontseptsiooni säilitamiseks on tarvis alguses rohkem panustada.

1.2.6 Timmitud tootmise arendamise takistused

Timmitud tootmise kontseptsioonist arusaamine ei tekita raskusi, kuid selle kontseptsiooni realiseerimine tootmises on rohkesti väljakutseid pakkuv protsess. Timmitud tootmist juurutades muutuvad ettevõtte kultuur ja toimimismehhanismid. Sellised muudatused ettevõtte filosoofias on peamiseks takistusteks innovatsiooni juurutamisel. Muudatused avaldavad eelkõige suurimat mõju ettevõtte personalile ning töötajal, kes on aastakümneid teinud tööd ühtmoodi, on äärmiselt raske muutuda ja uute tingimustega kohaneda. Töökultuuri ja töötajate hoiakute muutmiseks on vaja korraldada pikaajaline kohanemisperiood ning alustada tuleb personaliga suhtlemisest. Personaliga suhtlemine ja õpetamine tekitavad töötajates arusaama, miks muudatusi on vaja ja millist väärtust see kaasa toob. Need teadmised tekitavad töötajates motivatsiooni ja huvi ning kui töötaja on huvitatud muudatustest ja uue kontseptsiooni filosoofia on arusaadav ja muudatuste vajadus on tõestatud, saab alustada praktiliste muudatuste sisseviimisega. [22] [27]

Järgmiseks takistuseks saab pidada ettevõtte finantsressursside puudust. Innovatsiooni juurutamine ja muudatuste sisseviimine on alati seotud rahaliste investeeringutega ning eriti väiksematel tootmisettevõtetel võib tekkida raskusi finantsressursi olemasolu ja leidmisega. Tootmine ei muutu timmituks kahe või kolme muudatusega, tegemist on pikaajalise protsessiga. Iga etapp ei vajagi rahalist investeeringut; tänu sellele, et tegemist on uue tootmiskultuuri rakendamisega, tekib ettevõttel piisav aeg, et leida finantsressurss, ning aega, kui otsitakse finantsilist võimekust muudatuste elluviimisele,

saab kasutada väiksemate kontseptsiooni põhialuste täitmiseks, mis ei vaja raha, kuid vajavad aega. [22]

Ajalise ressursi puudus ehk ettevõtte ei ole võimeline muudatusi tegema seoses suurte tootmiskoormustega või ettevõtte töötajate ülekoormusega. Mõni innovatsioon eeldab mitte ainult inimressursi ehk töötajate ajalist panust, vaid ka tootmisseisakuid. Nimetatud takistusest ülesaamine seisneb ettevõtte tootmise planeerimise oskuses. Eeldades, et muudatused on läbimõeldud ning stsenaariumite katsetamised ja tulemuste analüüsimine tehtud, on võimalik planeerida tootmisseisakut, ning seda kasutades saab vajalikud tegevused timmitud kontseptsiooni suunas ära teha. [22]

Kulusäästlik tootmine lähtub klientide ja turu vajadustest ning põhiline eesmärk on kujundada tootmine, kus valmistoote väärtus kliendile on oluliselt suurem kui tootmise väärtus. Timmitud tootmise ülesanne on likvideerida raiskamised, tänu millele muutub kogu protsess efektiivsemaks ja odavamaks. Kui timmitud tootmist rakendatakse õigesti, on võimalus rääkida sellistest muudatustest nagu ajalise ressursi raiskamise vähenemine, samaväärse või parema kvaliteedi saavutamine, inimressursside efektiivsem kasutus, hooldus-, esindus- ja ülalpidamiskulude vähenemine ning tänapäeval vägagi aktuaalne keskkonnasäästlikum tootmislahenduste kasutamine. [22] [28]

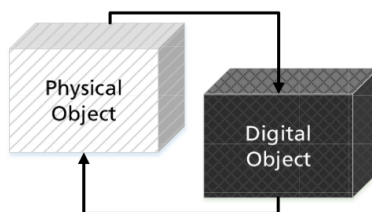
1.3 Digitaalne kaksik (Digital Twin)

Digital Twin (DT) ehk digitaalne kaksik leidis tutvustamist esimest korda 2002. aastal toote elukaare kontekstis. [29] Digitaalset kaksikut defineeritakse kui digitaalset kujutist oletatavast või olemasolevast tootest, süsteemist või protsessist, mis on eristamatu digitaalne analoog, mida kasutatakse praktiliste eesmärkide täitmiseks, nagu mudeldamine, integreerimine, testimine ja jälgimine. Esialgu oli digitaalne kaksik mõeldud toote elukaare ja elutsükli jälgimiseks, alustades toormaterjalide käsitsemisest, kokkupanekust ning seejärel valmistoodangu kasutamisest ja kuni utiliseerimiseni. Tihti tekib digitaalne kaksik enne füüsilist toodet. Digitaalse kaksiku valmimine enne füüsilist toodet annab võimaluse mudeldada erinevaid stsenaariume, kuidas toodet efektiivsemalt ja säästlikumalt toota, kuidas efektiivsemalt seda kasutada ning tekitab arusaama, millist ja kui palju ressursi selle toote valmistamine nõuab.

Digitaalne kaksik on tootmise kontekstis kogu protsessi simulatsioon, arvestades kõikvõimalikke konkreetse toote tootmisetappide eripärasid ning võimalikke kõrvalekaldeid tootmisnormist, mida nimetatakse varieerumisteks. Et digitaalne koopia oleks maksimaalselt täpne ning kajastaks protsessi võimalikult täpselt, on tarvis seda pidevalt täiendada ja kalibreerida, mida saab teha ainult siis, kui tootmist on alustatud.

Mida rohkem infot ja tootmise tendentse digitaalne kaksik sisaldab, seda paremini saab kasutada seda tootmise planeerimises, kuna mudel muutub teatud aja jooksul piisavalt täpseks, et arvestada võimalikke kõrvalekaldeid, mis tulenevad tootmise spetsiifikast. Kõrvalekalded tekivad inimteguritest, mida on võimalik prognoosida uuringutele ja statistikale tuginedes, nagu inimeste haigestumussagedus, puhkuste perioodid ja töövahetuse tootlikkuse varieerumine. Kõrvalekalded tekivad ka tehnilistest aspektidest, mida on võimalik välja selgitada - seadmete hooldusvälp, masinate remont ja palju muud. Korrektse ja täpse simulatsiooni ehk digitaalse kaksiku olemasolul ning piisavalt paljude statistiliste andmete sisaldumisel on kasutajal ehk protsessi haldajal võimalus hakata täiendama olemasolevat protsessi ning selles sisalduvaid etappe vajalike muudatuste või täiendustega.

Selle eelduseks on innovatiivse idee tekkimine, simulatsioon ja tulemuse analüüsimine. Tulemuse analüüs loob haldajale arusaama, kas innovatsioon või muudatus teatudkohas avaldab positiivset mõju kogu protsessile kui tervikule ning üks kõige olulisem DT eelis on võimalus anda mõjule arvvärtus ja mõõtühik. Kui on mõõdetav väärtus ja hinnang mõjule, tekib võimalus teha õige otsus, kas muudatus on väärt rakendamist ehk kas vajalik panus (nii rahaline kui ka ressursiline) on seda väärt ehk kas riskid on õigesti hinnatud ja piisavalt maandatud. Seda protsessi saab kirjeldada nõnda - protsess täiendab mudelit ning seejärel vastavalt vajadusele mudel täiendab protsessi, mida iseloomustabki digitaalse kaksiku andmevoo põhimõte ehk „Data flow in digital twin“. (vt Joonis 2) [29]



Joonis 2. Digitaalse ja füüsilise kaksiku andmevoog

1.3.1 Digitaalne kaksik tootmises

Digitaalse kaksiku kasutusvaldkonnad ei ole piiratud, kuna kõik on seotud eelkõige eesmärgiga, milleni soovitakse jõuda. Tootmise kontekstis on digitaalse kaksiku kasutamise eesmärgiks saavutada kulusäästlik ja efektiivne tootmine kas olemasolevat ressursi kasutades või lisaressursi vajadust ja otstarbekust analüüsid. Efektiivne ressursikasutus tähendab protsessi hinna vähenemist, mis avaldab positiivset mõju nii tootele kui ka kliendile. Tootmisprotsessi saab kirjeldada nagu ahelat, mis koosneb

lülidest; ahela tugevuse ja konkurentsivõimekuse määrab kõige nõrgem lüli ning kui selgitada välja kõige nõrgema lüli asukoht ning teada selle lüli elimineerimise või parandamise viise, muutub kogu ahel võimsamaks. Selles näites on tootmisprotsess ahelaks ning ahela lülid on etapid, millest protsess koosneb. [30] Digitaalne kaksik võimaldab pidevalt leida defektseid lülisid, leida võimalust mingit lüli parandada või elimineerida ning annab ülevaate, kuidas muudatus selles etapis mõjutab n+1 etappi hiljem. Lisaks tootmisprotsessi defektide väljaselgitamisele pakub digitaalne kaksik ka palju muid võimalusi, millest tuleb juttu järgnevatel alapeatükkides.

1.3.2 Tootmise planeerimine ja vastuolude vältimine

Tootmisettevõtte peab ressursside omamisel tagama mitte ainult vootõhusa, vaid ka ressursitõhusa tootmiskontseptsiooni ning selle tagatiseks on ülimalt oluline pideva töö ehk tellimuste olemasolu. Tihti on ettevõttele kasulikum pakkuda enda toodangut alla omahinna või nullkasumiga ning selle põhjuseks on tööde seisakute vältimine ja kahjumi minimeerimine. Tööde seisak tähendab tootmisettevõttele palkade, maksude, arvete ja muude ülespidamiskulude katmist, sealjuures null sissetulek ning selles olukorras isegi alla omahinna pakutud töö aitavad säilitada rahalist käivet ning vähendada kahjumit. Vaatamata kriisisituatsioonidele, kus turg ei suuda pakkuda piisavalt tööd ja ressursi vootõhusa tootmise säilitamiseks, on tihti tegemist pikkade perioodidega, kus turul on tööd rohkem kui ettevõtte tootmisvõimekus suudab täita, eriti kui sellised turuolukorrad langevad samaaegselt kokku Eesti, Soome, Läti ja Rootsi turul. Sellises olukorras tekib olukord, kus ettevõtte on üle koormatud ning ei suuda tellimustega hakkama saada ning siinkohal tundub, et olukorrale on olemas lihtne lahendus - mõnest hankest tuleb loobuda. Kahjuks ei saa tootmisturu spetsiifika lubada mõnest tellimusest loobumist, eriti kui tegemist on suure ja püsikliendiga, kellega on koostööd tehtud kümneid aastaid. Sellistest tellimustest loobumine tähendab kliendi kaotamist ning klient on sunnitud pöörduma konkurentsettevõtte poole, mille tagajärjel on mõnes olukorras võimalus kaotada klient pikaks ajaks või täielikult. Keerukamaks muutub olukord siis, kui sellised tellimused püsiklientidele langevad kokku. [31]

Selles olukorras ei saa tootja kindlasti lubada ühtki viga enda tootmistempode planeerimises ning siinkohal saavad päästerõngaks tootmise simulatsioonid ja tootmisetappide üksikasjalik planeerimine, mida on võimalik teha virtuaalse tehasemudeli ehk digitaalse kaksiku kasutamisega.

Tänapäeval kasutab enamik raudbetooni tootmisettevõtteid planeerimiseks 2D-lähenemist ehk mahtu ja ressursside võimekust teades sisestatakse kogemuslikult tootmise algus- ja lõppkuupäev, kuid sellise lähenemise korral suureneb vea

tekkeprotsent proportsionaalselt tellimuste arvu suurenemisega. Nagu eelnevalt nimetatud, on raudbetootoodete valmimine kitsalt seotud inimtöödega ja seadmetega ning tulenevalt tööde mahu suurendamisest tekivad etappide sees ja vahel suuremad variatsioonid ja vastuolud ning 2D-lähenemine ei suuda seda olukorda vältida ja ette näha, mis tähendab tootmisgraafikust mahajäämist. [32]

Tootmise planeerimine ja simuleerimine tehase digitaalses koopias annab kasutajale võimaluse koostada planeerimiskava arvestades kõiki võimalike varieerumisi, mis tulenevad tootmise spetsiifikast. Samuti tekib võimalus näha ka vastuolusid tootmisetappides, eriti oluliseks muutub see juhul, kui teatud etapis on ressursid piiratud ning läbilaskevõime ja võimekus on väiksemad kui on reaalsuses vaja $n+1$ protsesside paralleelseks toimimiseks. Tulenevalt erinevate tootmisstsenaariumite simulatsioonide tulemustest on võimalik teha detailne tootmisplaan või -kava, mida järgides vähenevad varieerumiste arv, defektide tekkimise olukorrad. Et alati ei pruugi kõik minna plaanipäraselt, siis teatud planeerimata varieerumised võivad ikkagi tekkida ning digitaalse kaksiku abil on võimalus üle kontrollida, millise tagajärje see varieerumine toob, ning katsetada läbi erinevad stsenaariumid olukorra parandamiseks või leevendamiseks; see võimalus 2D-lähenemises puudub. Kõige olulisem on aga rahaline säästmine, mis tuleneb lepingutingimuste täitmisest ja leppetrahvide vältimisest. [33]

1.3.3 Digitaalne kaksik kui timmitud tootmise kontrollmehhanism

Digitaliseeritud tootmisprotsess on füüsilise tootmise peegeldus, mis võimaldab teostada lisaks protsesside planeerimisele ja tootmisvõimekuste katsetamisele ka toimuvate protsesside ja operatsioonide jälgimist ja väga spetsiifiliste andmete kogumist. Kogutavate andmete valik oleneb eesmärgist, milline info on kasutajale vajalik. Tootmise kulusäästlikkuse määrab toote läbitav tootmise elukaar ehk aeg ja etapid, mida toode läbib tootmise algusest kuni kliendini jõudmiseni. Tulevalt tootmise elukaare analüüsist on võimalik koguda erinevaid kulusäästlikkust mõjutavaid andmeid. Digitaalse kaksiku funktsionaalsus võimaldab näiteks järgmiste parameetrite jälgimist: [34]

1. Energiatarbimise analüüs.
2. Tootmisdefektide statistika analüüs ja prognoosimine.
3. Seadmete hooldusvajadused ja seadmete katkimineku prognoosist tulenevate hooldus- ja remondigraafikute koostamine.
4. Lähtuvalt toodetavast kaubast tootmisveisakute analüüs ja kriitilisuse mõju hindamine
5. Inimressursside vajadus erinevatel etappidel, inimressursi töötamise efektiivsus ja töötajate arvu vajadus tootmisetappides.
6. Tootmisetapi olek ja hinnang toote või tellimuse valmidusele.
7. Kasutatavate materjalide varude ja jääkide audit.
8. Tootmispindade kasutamise efektiivsus.

Kulusäästlikkus on pidev areng ning eespool nimetatud andmeid omades on võimalik protsessi pidevalt arendada ja täiendada. Tootmine ei saa olla konstantne ning tulenevalt kliendi muutuvatest vajadustest muutub tootmisstsenaarium. Andmete olemasolu võimaldab teha õigeid ja kaalutletud otsuseid strateegia muutmises ning strateegia õigest valikust oleneb tootmise efektiivsus. Andmed ja statistika võimaldavad üleminekuid ühelt strateegialt teisele teostada operatiivselt ja alustada uut strateegiat õigest kohast.

1.3.4 Tootmisriskide analüüs digitaalses kaksikus

Tootmisprotsess kujutab endast loogilises järjekorras ülesehitatud tootmisetappe, mille läbimisel muutub tooraine valmistooteks. Need loogilised seosed tekivad aastatega, kuid tulenevalt turutingimuste muudatustest on tootmine sunnitud tegema muudatusi enda tootmisprotsessis, millega suudetakse jälgida turu muutuvaid tendentse. Iga

muudatuse sisseviimine on alati seotud suurte riskidega ning ettevõttel võib tekkida raskusi nendest muudatustest tulenevate riskide hindamisega. Muudatused võivad mõjutada protsesside maksumust, tekitada lisaseadmete vajadusi, vajada rohkem inimressurssi või tootmispinda. Tihti ei ole võimalik kõikide riskide tekkimise tõenäosust hinnata või prognoosida ning riskide vale hinnang võib osutada saatuslikuks ettevõtte tulevikule.

Digitaalse koopia olemasolul on võimalik teostada uue kontseptsiooni või muudatuse riskianalüüs, simuleerides muudatustest tulenevaid olukordi ja mõjusid tootmisprotsessi efektiivsusele. Muudatuste simuleerimine võimaldab prognoosida tootmissüsteemi käitumist, mida peab kasutama otsuste tegemisel. [35]

1.4 Lühikokkuvõtte

Raudbetoelementide tootjaid on Eesti ja Balti riikide turul mitmeid ning konkurentsivõimekuse säilitamiseks on tarvis vähendada toodetava kauba maksumust. Maksumuse vähendamiseks on tarvis elimineerida kõik väärtust mittelisavad tegevused tootmisprotsessist. Väärtust mittelisavaks tegevuseks nimetatakse kõike, mis ei lisa täiendavat väärtust tootele või kliendile ning arvestades, et igal tegevusel on olemas oma hind ja klient selle eest ei maksa, tasub sellise tegevuse eest tootja ise, vähendades enda kasumimarginaali, või lisab tootja selliste tegevuste maksumuse hinna sisse, millega tõuseb toote hind ja väheneb konkurentsivõimekus.

Raiskamise allikateks raudbetoelementide tootmise puhul on enamjaolt varude tootmine ja tootmisetappide järjekordade tekkimine. Antud olukorra lahendamisel aitab kaasa „Just in time“ kontseptsioon, mis tuleneb kulusäästliku tootmise kontseptsioonist. Kõige efektiivsem on toota täpselt nii palju, kui turg seda vajab ning sellega ettevõtte vabaneb lisakoormusest, mis väljendub varude haldamises. Tootmisetappide läbilaskevõimekuste ühtlustamine aitab vältida etappides tekkivaid tootmisjärjekordi. Järjekorra haldamine ja kontrolli all hoidmine on samuti ettevõttele täiendav kulu.

Muudatusi teostades peab ettevõtte eelkõige suutma tuvastada raiskamiskohad ja leidma alternatiivseid viise raiskamiste kõrvaldamiseks. Alternatiivne lahendus peab olema planeeritud algusest lõpuni ning juhul, kui tootmine koosneb mitmest omavahel seotud etapist, siis üks muudatus pudelikaela vältimiseks võib tekitada pudelikaela järgmises kohas. Stsenaariumite hindamiseks ja otsuste tegemiseks on tänapäeval võimalus kasutada digitaalseid kaksikuid, mis võimaldavad stsenaariumite katsetamist ja riskide tekkimise prognoosimist.

Õigete ja kaalutud otsuste tegemine on samuti raiskamise vältimise viis ning digitaalne kaksik katsetuste tegemiseks ja jälgimiseks on sobiv, et hinnata tootmise efektiivsust ja riske.

2 UURIMISTÖÖ METOODIKA JA MATERJALID

Lõputöö eesmärgiks on leida kulusäästlikumad stsenaariumid raudbetoonist trepimarsside ja terratso elementide tootmiseks. Eesmärgi täitmiseks ja küsimustele vastamiseks on uurimistöös protsess jagatud kulusäästliku tootmise filosoofia alusel (vt 1.4.4) neljaks etapiks, mida täpsustatakse alapeatükis 2.1.

Vaatamata laiale toodete ja teenuste valikule ettevõttes AS Alistron piirdub käesolev töö raudbetoonist trepimarsside ja terratso elementide tootmisega. See toodang on kõige ressursimahukam ning moodustab käibes kõige suurema osakaalu, mistõttu on nende elementide tootmine ka kõige suurem kuluallikas.

2.1 Uurimistöös etapid ja meetodid

Uurimistöös koosneb neljast etapist:

1. Olukorra tuvastamine - olemasolevate ressursside määramine ja väljaselgitamine. Selles etapis selgitatakse välja, miks tootmisetapid toimuvad selliselt nagu praegu ning milliseid muudatusi on juba proovitud sisse viia. Selles etapis toimub samuti raiskamiskohtade väljaselgitamine ning raiskamise mõõdistamine.
2. Raiskamiste analüüs - väärtust mittelisavate tegevuste põhjuste analüüsimine. Raiskamise mõju kriitilisuse hindamine kogu protsessile. Raiskamiste likvideerimiste prioriteetsuse järjestuse moodustamine.
3. Lahenduste väljatöötamine - raiskamiste likvideerimise prioriteetsuse järjestuse moodustamisel on tarvis genereerida raiskamist likvideerivad tootmisstsenaariumid. Timmitud tootmise stsenaariumite koostamiseks kasutatakse timmitud tootmise tööriistu (vt 1.2.4).
4. Testimine ja hindamine - väljatöötatud lahendused tõhususe tõstmiseks vajavad analüüsimist ja hindamist. Kõige sobilikuma stsenaariumi väljavalimiseks on tarvis testida lahendusi ning tuginedes testide tulemustele antakse lahendusele hinnang.

2.1.1 Olukorra tuvastamine

Lõputöö käsitleb raudbetoonist trepimarsside ja terratso elementide tootmist ning olukorra tuvastamiseks oli tarvis koguda andmed mõlemast tootmisprotsessist. Nende

elementide tootmine ei ole omavahel seotud ning andmete kogumine toimus erineval ajal. Põhiliseks eesmärgiks olukorra tuvastamisel oli määrata järgnevad parameetrid:

- Tootmisjärjekordade tekkimine positsioonidel
- Tööde seisakute sagedus
- Ajakulu varieerumised
- Materjalide kasutamise säästlikkus
- Olemasolevate ressursside kasutamise efektiivsus
- Tootmisetappide läbilaskevõimekused ja ajad
- Liinitöötajatega suhtlemine ja tagasiside saamine

Andmete kogumiseks viidi läbi vaatlusuuringud olemasolevate protsesside analüüsimiseks ja fikseerimiseks, millele lisandus ettevõtte liinitöötajatega suhtlemine. Suur osa andmete kogumisel oli tootmisjuhiga suhtlemisel, kellel oli ligipääs materjalide ostuarvetele ja koostatud hinnapakumistele.

Trepimarsid:

Raudbetoonist trepimarsside tootmine AS Alistronis toimub eraldi tsehhis nr 1, mille kogupindala on 370 m². Tsehh on jagatud viieks tootmispositsiooniks. Kolm tootmispositsiooni on mõeldud sirgete trepimarsside tootmiseks ning kahes valmistatakse pööratud trepielemente. Trepimarsside tootmistsehhis on iga tootmispositsioon nummerdatud, mille eesmärgiks on tootmistsehhi määratlemine. Järgnevalt on vaadeldud tootmispositsioonid lühendatud - POS. 1 tähendab esimest tootmispositsiooni ning POS. 2 teist tootmispositsiooni.

Igas positsioonis töötab 2 inimest, kes tegelevad raketiste ja armatuurkarkasside ehitamisega, elementide lahtirakestamisega. Positsioonide tööd ei ole omavahel seotud. Betoneerimist ning betooni järelhooldust teostavad teised töötajad. Vaatlusuuringu objektiks võeti sirgete trepimarsside tootmispositsioonid POS.1 ja POS.2. POS.1 päevakava uuring viidi läbi 27.09; 28.09; 30.09; 04.10; 06.10; 07.10; 11.10, POS.2 päevakava uuring viidi läbi 18.10; 19.10; 20.10; 21.10.

Vaatlusuuring teostati veebiühendusega kaamerate abil, mis asuvad tsehhis nr 1. Sinna tsehhi oli paigaldatud kokku kolm kaamerat, välditi pimedate nurkade tekkimist ning kõiki tegevusi oli võimalik jäädvustada. Andmete fikseerimise sageduseks võeti 6-7-minutine intervall ning sageduse valiku õigsuse kontrollimiseks toimus 21.10 andmete

fikseerimine 3-4-minutilise intervalliga. Selle kontrolli käigus ei tuvastatud erinevust 7-minutilise intervalliga.

Vaatlusuuringu läbiviimise vahendiks sai valitud veebikaamera, kuna füüsiline kohalolek võinuks mõjutada saadavaid tulemusi. Kõnealuse uurimise käigus said ära fikseeritud erinevate töodeliikide kestused, tööde kestuste varieerumised, materjalide kasutamise säästlikkus ja üldised tööliste suundumused ja lähenemised trepimarsside tootmisele. Üks olulisemaid kriteeriume tootmisprotsessis on etapi läbilaskevõimekus ja läbilaskeaeg. Selle vaatlusuuringu käigus said määratletud ka need näitajad. Majandusnäitajate ja andmete kogumiseks analüüsiti läbi koostatud hinnapakumised trepimarssidele ning materjalide ostuarved. Teades kasutatavate materjalide hinda ning toodete hinnakalkulatsiooni, on võimalik määrata prioriteetsed tööetapid, kus raiskamiste kõrvaldamine peab olema maksimaalne.

Terratso elemendid:

Järgnevalt kirjeldatakse terratso elementide tootmise analüüsimeetodit. Terratso elementide tootmine (vt 2.3.2) koosneb mitmest etapist, mis on omavahel seotud. Suurem osa terratso tootmisest toimub erinevate lihvimis- ja poleerimiseadmete kasutamisega ning et seadmed asusid ja tootmisetapid toimusid erinevates tsehhides, ei olnud võimalust viia läbi vaatlusanalüüsi kaamerate abil, nagu sai tehtud trepimarsside analüüsimisel; andmete kogumine toimus kohapeal.

Terratsopinna tekkimine eeldab töötlemist erinevate seadmetega, kõige olulisemaks parameetrikaks oli seadmete läbilaskevõimekused ja läbilaskeajad. Nende parameetrite fikseerimiseks jägiti tootmisprotsessi ajavahemikus 13.03.2023 – 17.03.2023. Vaatlusuuringu käigus fikseeriti:

- terratso elementide liikumised tootmisetappides;
- läbilaskeajad erinevatel seadmetel;
- seadmete hooldussagedused;
- seadmete kasutamise efektiivsus;
- tööde seisakud;
- tootmisjärjekordade tekkimine erinevatel tootmisetappidel;
- inimressursside jaotamise efektiivsus.

Kuna tootmisetapid asuvad erinevates kohtades, ei olnud võimalik teostada vaatlust veebikaamera abil. Vaatlus sai läbi viidud füüsilise kohalolekuga. Vaatlust alustati kell 07.00 ehk tööpäeva alguses ning jälgiti seadmete ettevalmistust tööpäevaks ning

fikseeriti ettevalmistuste kestused. Samuti sai jälgitud terratso detailide saabumist esimesse tootmisetappi, pärast lahtirakestamist, mis toimus ajavahemikus 07.00 – 08.00. Selles ajavahemikus jõudis terratso lihvimistsehhi 100 detaili. Füüsilise kohalolekuga jälgiti terratso detailide liikumist tootmisetappides ning fikseeriti eelnevalt nimetatud näitajad. Vaatluse käigus õnnestus suhelda etappide töölistega ning saada liinitöötajate arvamus olemasoleva tootmisprotsessi kohta.

2.1.2 Raiskamiste analüüs

Järgmiseks tööetapiks oli kogutud andmete läbitöötlemine ja süstematiseerimine, mille valmimisel tekkis võimalus alustada saadud andmete analüüsimist. Andmete analüüsimise eesmärk oli jõuda arusaamani, millised tegevused tekitasid raiskamist ning kui olulist mõju need avaldasid tootmisprotsessile kui tervikule. Pärast raiskamiskohtade tuvastamist tekkis vajadus määrata nende raiskamiste põhjused. Raiskamiste elimineerimiseks peab aru saama, mis oli raiskamise tekkimise eeldus ning kuidas seda eeldust tulevikus vältida.

Kulusäästlikkus tähendab ressursi- ja vootõhususe (vt 1.2.1) kombineerimist igas tootmisprotsessis ja etapis ning lähtuvalt andmetest, mis koguti vaatluse käigus, sai koostatud olemasolevat tootmisprotsessi kirjeldav digitaalne kaksik.

2.1.3 Lahenduste väljatöötamine

Pärast andmete analüüsimisetapi läbimist koostati erinevad stsenaariumid, mis väldiksid raiskamisi. Lähtuvalt sellest, et tootmisprotsessi või tehnoloogia muutmine olemasolevas tehases võib osutada rahalise ressursi raiskamiseks - juhul kui stsenaarium osutub ebaefektiivseks - simuleeriti stsenaarium tehase digitaalses kaksikus.

Simulatsioonide koostamiseks sai välja valitud programm SIMIO, mis võimaldab koostada digitaalseid kaksikuid tootmisettevõtetest. Korrekse mudeli koostamiseks, mis võimaldaks tulevikus stsenaariumite katsetamist, oli tarvis eelkõige mudeldada olemasolevat tootmisprotsessi kirjeldav mudel ehk koostada digitaalne kaksik. Olemasolevat tootmisprotsessi kirjeldav mudel on stsenaariumite hindamisel üks olulisemaid komponente, kuna see on andmepangaks stsenaariumite katsetamisel. Olemasoleva tootmisprotsessi mudeli koostamisel leidsid kasutust vaatluse käigus kogutud andmed. Digitaalse kaksiku täpsuse kontrollimiseks (valideerimiseks) võrreldi füüsiliselt toodetud elementide koguseid ning elementide liikumisi tootmisprotsessis

ning analoogseid näitajaid digitaalses kaksikus (vt 2.2.3). Kaksikute võrdlemine näitas, et olemasolevat tootmisprotsessi kirjeldav mudel on õige.

2.1.4 Testimine ja hindamine

Selles etapis toimusid stsenaariumite simulatsioonid, praktilised lihvimiskatsetused ning simulatsioonitulemuste hindamine. Tulemuste hindamisprotsessi kaasati tööüksuste töötajad ning tootmisjuht. Tulemuste hindamisel näitas digitaalne kaksik enda perspektiivikust tootmise planeerimises. Sageli tuli simulatsioonide tulemuste analüüsimisel kokku puutuda olukorraga, kus kohapealne raiskamise kõrvaldamise elimineerimine tekitab raiskamisi järgnevates etappides ning ilma digitaalse kaksiku olemasoluta oleks muudatuse mõju kogu tootmisprotsessile raskesti prognoositav.

2.2 SIMIO digitaalne kaksik kulutõhususe modelleerimiseks ja simuleerimiseks

Simio on digitaalsete kaksikute modelleerimiseks ja simuleerimiseks mõeldud tarkvara, mis võimaldab koostada digitaalse kaksiku olemasolevast füüsilisest objektist, mida on võimalik kasutada muudatuste simuleerimiseks ja hindamiseks. Käesoleva töö raames oli füüsiliseks objektiks AS Alistroni tootmisprotsess. Järgnevalt tutvustatakse läbitud samme digitaalse kaksiku mudeli valmimiseks.

1. Digitaalse kaksiku koostamise alustamiseks on mitmeid erinevaid variante. Esimene variant on võtta kasutusse olemasolev Simio pakutav tootmismudeli mall, mida on võimalik seadistada, ning lisada vajalikud parameetrid. Tulenevalt sellest, et kõik Simio pakutavad mallid erinesid oluliselt olemasolevast protsessist, seda võimalust kasutusse ei võetud. Järgmine variant on võtta aluseks eelnevalt koostatud digitaalne kaksik, mida on võimalik korrigeerida. Kuna AS Alistron ei koostanud eelnevalt digitaalset koopiat, oli see variant võimatu. Kolmas variant on alustada mudeli koostamist nullist, mis tähendas simuleerimisprotsessi alguspunkti.
2. Pärast tootmisprotsessi kirjeldavat mudeli loomist tehti algust mudelis sisalduvate etappide seadistamisega. Seadistamine tähendab tootmisetappidele parameetrite määramist. Siinkohal olid parameetriteks seadmete tootlikkused, seadmete hooldussagedused, transporditeede pikkused ja kestused, töövahetuse kestused ja töönäda pikkused; varieerumised käsitöö etappidel. Kõik eelnevalt nimetatud parameetrid saadi uuringu käigus.

- Seadistamisprotsessi lõpetamisel on vaja teha esimene proovisimulatsioon. Proovisimulatsiooni eesmärk on võrrelda digitaalset ja füüsilist kaksikut.
3. Et oleks võimalik võrrelda digitaalset ja füüsilist kaksikut, on vajalik määrata parameetrid, mis hakkavad olema võrdlemise kriteeriumid. Nendeks kriteeriumiteks said valitud vahetuse jooksul valminud toodete arv ja tootmisjärjekorras olevad tooted tootmisetappidel.
 4. Terratso tootmise proovisimulatsiooni käigus saadud tulemused erinesid füüsilisest kaksikust ning järgnevalt alustati mudelis sisalduvate parameetrite korrigeerimise ning lisainfo sisestamisega. Esimesed simulatsioonid näitasid suuremat päevatoodangut ning väiksemaid tootmisjärjekordi positsioonides, mis ei vastanud reaalsele olukorrale. Selle etapi põhiliseks väljakutseks osutus kaksikute tulemuste erinevuse põhjuse leidmine. Selline erinevus tekkis seoses transportimise seisakutega tootmisprotsessis, millega digitaalses kaksikus ei arvestatud.
 5. Selle ebatäpsuse elimineerimiseks oli kaksikusse lisatud täiendav tingimus (triggering event / käivitav sündmus). AS Alistronis on 2 kahveltõstukit, mis on kasutuses terratso tootmisel. Kui kahes etapis toimub transportimine, ei saa kolmas etapp tõstukeid kasutada, mis tähendab, et etapis lisandub transportimise ajale ka tõstuki ooteaeg. Sarnaselt tõstukitele on terratso töötlemistsehhis kaks telferkraanat ning kui kaks telferkraanat on kasutuses, lisandub kolmandasse etappi transpordiajale ka kraana ooteaeg. Transportimise vajaduse määrab Simios maksimaalne võimalik ladustatud detailide arv (capacity). Kui see arv ületatakse, tekib tööde seisak ning alustatakse transportimist.
 6. Pärast mudeli lisaseadistamist olid simulatsiooni tulemused võrdväärset füüsilise protsessi tulemustega. Selles etapis oli võimalus tuvastada raiskamisi ning raiskamiste tekkepõhjuste tuvastamine muutus lihtsamaks.

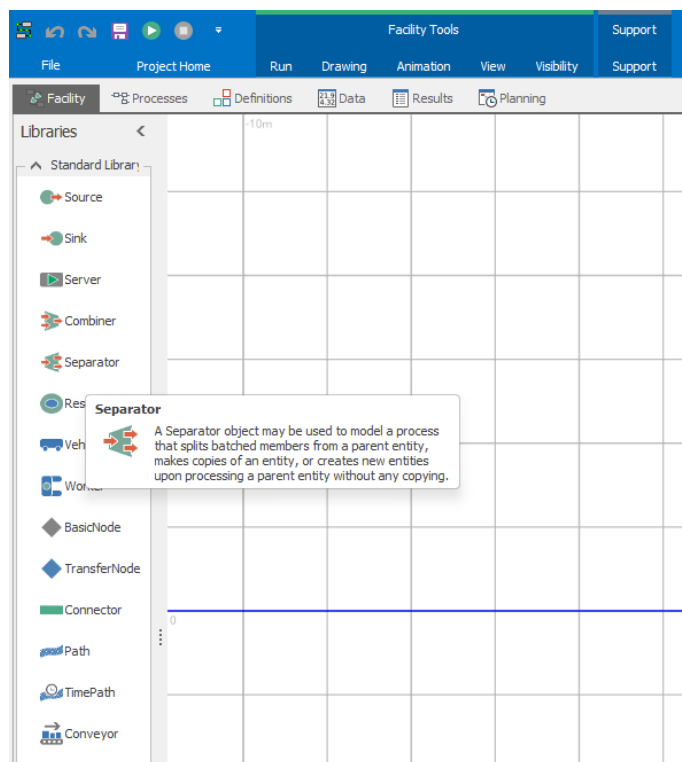
Järgnevalt alustati kulusäästlikumate stsenaariumite katsetamisega, millest on juttu alapeatükis 3.4.2.

2.2.1 Simio tarkvara valik

Digitaalse kaksiku koostamisel on esimeseks sammuks simuleerimistarkvara valimine. Kõige levinumad digitaalse kaksiku modelleerimise platvormideks on Sewio, Ansys, Bentley DT ja Simio. Valiku tegemisel lähtuti eelkõige tarkvara kasutamise maksumusest ja liidese lihtsusest. Tulenevalt sellest, et lõputöö autoril ei olnud eelnevat

kogemust digitaalse kaksiku koostamisega ning programmide kasutamise oskust, sai oluliseks kriteeriumiks ka õppematerjali olemasolu.

Lähtuvalt eelnevalt kirjeldatud kriteeriumitest langes valik Simio tarkvarale. Tarkvaralitsentsi ostmiseks võeti ühendust Simio LLC esindajaga ning teavitati, et tegemist on akadeemilise tööga, mistõttu kohaldati soodushinda - 50% täishinnast. Litsents osteti 900 dollari eest. Järgnevaks otsuse tegemise põhjuseks oli tarkvara kasutusjuhendi ja õppevideote olemasolu. Lisaks erinevatele õppevideotele ja materjalidele võimaldab Simio kliendipoliitika litsentsiomanikel suhelda Simio esindajatega telefonitsi, mille käigus on võimalik arutada erinevaid tehnilisi tõrkeid, mis tulevad simuleerimise käigus ette, ning esitada küsimusi programmi kohta. Simio kasutajaliidese struktuur on maksimaalselt kasutajasõbralik. Suureks eeliseks selle programmi kasutamisel on nuppude kirjalike selgituste olemasolu. Kui suunata hiir nupule, ilmub kohe ette selgitav tekst, mis kirjeldab nupu funktsionaalsust ja otstarvet (vt Joonis 3). Täpsemalt on digitaalse kaksiku koostamist kirjeldatud alapeatükis 2.2.2.



Joonis 3.Kasutajaliides

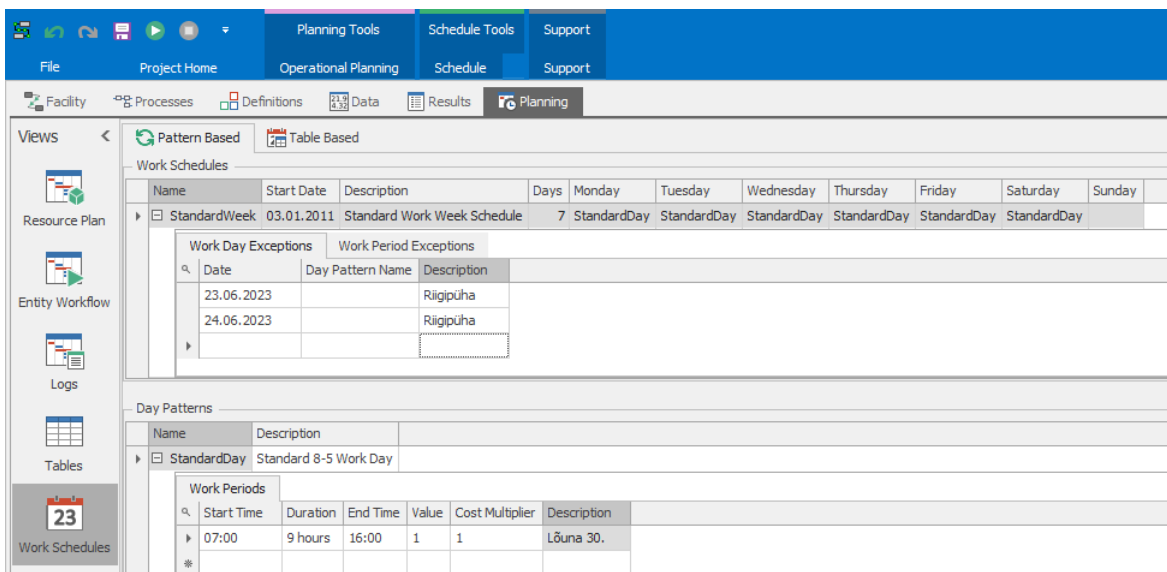
2.2.2 Digitaalse kaksiku koostamine

Terratso tootmine

Olemasoleva olukorra kirjeldamiseks, vaatlusanalüüside tulemuste süstematiseerimiseks ja säästlikumate stsenaariumite katsetamiseks on vajalik olemasolevat tootmisolukorda kirjeldav digitaalne kaksik. Selline digitaalne kaksik on mõeldud lähtematerjalina stsenaariumite väljatöötamiseks ning katsetamiseks. Järgnevalt kirjeldatakse olemasoleva tootmisprotsessi digitaalse kaksiku mudeli valmimist.

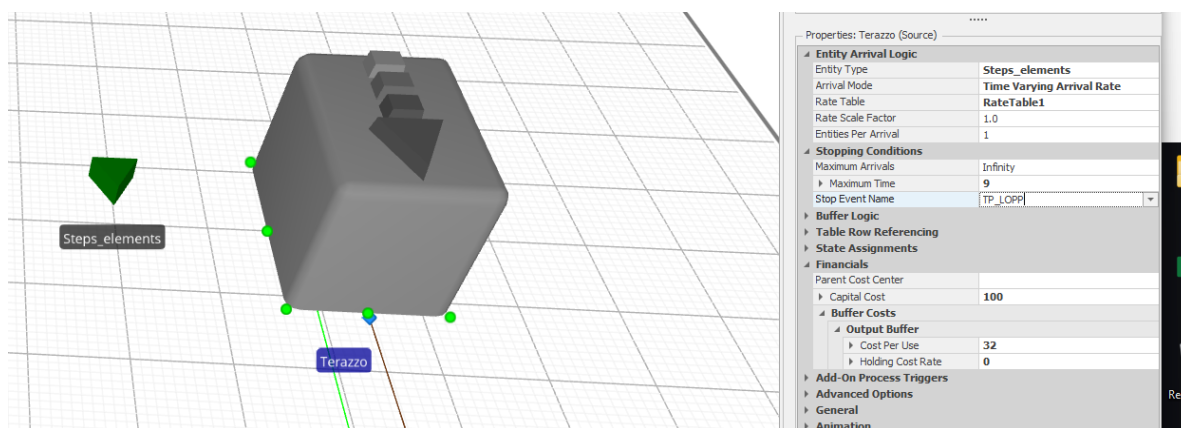
Kaksiku koostamist alustati tootmisetappide loogika väljaehitamisest ehk oli tarvis simuleerida tootmisprotsessi ja tootmisloogikat õiges järjekorras. Kuna digitaalset kaksikut on võimalik kasutada pikaajaliseks tootmise planeerimiseks, on oluline, et

simulatsioon arvestaks tööpäeva kava, töönädala kestust ja vabade päevade infot (vt Joonis 4).



Joonis 4. Tööpäevade graafiku planeerimine

Töönädala graafiku määratlemise järel on vajalik koostada tootmistehnoloogia mudel ehk tootmisprotsessi ülesehituse loogika. Tootmise alguspunktiks sai valitud terratso elementide lahtirakestamine, mis määrati simulatsioonis tootmise lähtepunktiks (Source) (vt Joonis 5).

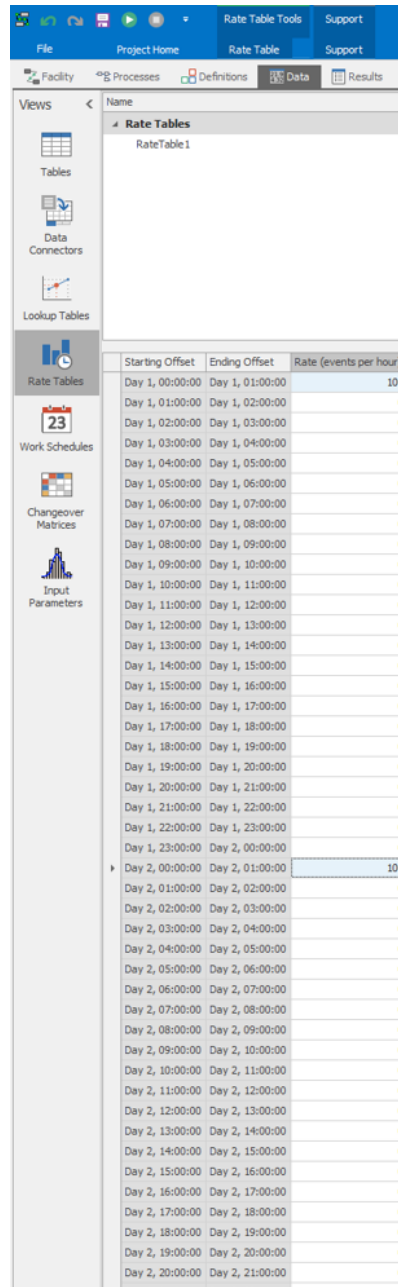


Joonis 5. Tootmise lähtepunkt ehk "Source"

Kuna valitud terratso elementid jõuavad süsteemi teatud loogika järgi, oli tarvis seda loogikat kirjeldada: „Arrival mode“- Elementid jõuavad tootmisesse mitte kaootilises

järjekorras, vaid vastavalt terratso betoneerimistsehhi tootmisplaanile - „RateTable1” (vt Joonis 6).

Terratso betoneerimistsehh rakestab esimesel tööpäeva tunnil lahti 100 terratso detaili ning teostab nende transportimise esimesse tootmispositsiooni. Selle tegevusega algab terratso töötlemise protsess.

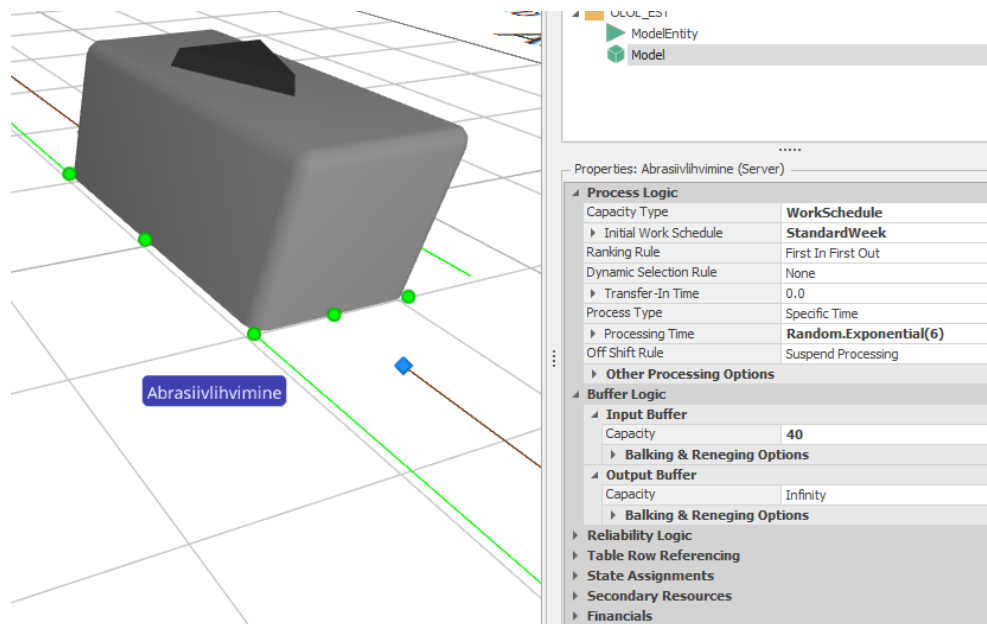


Starting Offset	Ending Offset	Rate (events per hour)
Day 1, 00:00:00	Day 1, 01:00:00	100
Day 1, 01:00:00	Day 1, 02:00:00	0
Day 1, 02:00:00	Day 1, 03:00:00	0
Day 1, 03:00:00	Day 1, 04:00:00	0
Day 1, 04:00:00	Day 1, 05:00:00	0
Day 1, 05:00:00	Day 1, 06:00:00	0
Day 1, 06:00:00	Day 1, 07:00:00	0
Day 1, 07:00:00	Day 1, 08:00:00	0
Day 1, 08:00:00	Day 1, 09:00:00	0
Day 1, 09:00:00	Day 1, 10:00:00	0
Day 1, 10:00:00	Day 1, 11:00:00	0
Day 1, 11:00:00	Day 1, 12:00:00	0
Day 1, 12:00:00	Day 1, 13:00:00	0
Day 1, 13:00:00	Day 1, 14:00:00	0
Day 1, 14:00:00	Day 1, 15:00:00	0
Day 1, 15:00:00	Day 1, 16:00:00	0
Day 1, 16:00:00	Day 1, 17:00:00	0
Day 1, 17:00:00	Day 1, 18:00:00	0
Day 1, 18:00:00	Day 1, 19:00:00	0
Day 1, 19:00:00	Day 1, 20:00:00	0
Day 1, 20:00:00	Day 1, 21:00:00	0
Day 1, 21:00:00	Day 1, 22:00:00	0
Day 1, 22:00:00	Day 1, 23:00:00	0
Day 1, 23:00:00	Day 2, 00:00:00	0
Day 2, 00:00:00	Day 2, 01:00:00	100
Day 2, 01:00:00	Day 2, 02:00:00	0
Day 2, 02:00:00	Day 2, 03:00:00	0
Day 2, 03:00:00	Day 2, 04:00:00	0
Day 2, 04:00:00	Day 2, 05:00:00	0
Day 2, 05:00:00	Day 2, 06:00:00	0
Day 2, 06:00:00	Day 2, 07:00:00	0
Day 2, 07:00:00	Day 2, 08:00:00	0
Day 2, 08:00:00	Day 2, 09:00:00	0
Day 2, 09:00:00	Day 2, 10:00:00	0
Day 2, 10:00:00	Day 2, 11:00:00	0
Day 2, 11:00:00	Day 2, 12:00:00	0
Day 2, 12:00:00	Day 2, 13:00:00	0
Day 2, 13:00:00	Day 2, 14:00:00	0
Day 2, 14:00:00	Day 2, 15:00:00	0
Day 2, 15:00:00	Day 2, 16:00:00	0
Day 2, 16:00:00	Day 2, 17:00:00	0
Day 2, 17:00:00	Day 2, 18:00:00	0
Day 2, 18:00:00	Day 2, 19:00:00	0
Day 2, 19:00:00	Day 2, 20:00:00	0
Day 2, 20:00:00	Day 2, 21:00:00	0

Joonis 6. RateTable1 ehk terratso lahtirakestamise graafik

Kõiki tootmisetappe on kirjeldatud digitaalses kaksikus kui „Server”, mis sisaldab endas vaatlusuuringute käigus saadud infot. Selliseks infoks on etapi läbilaskeaeg (Processing

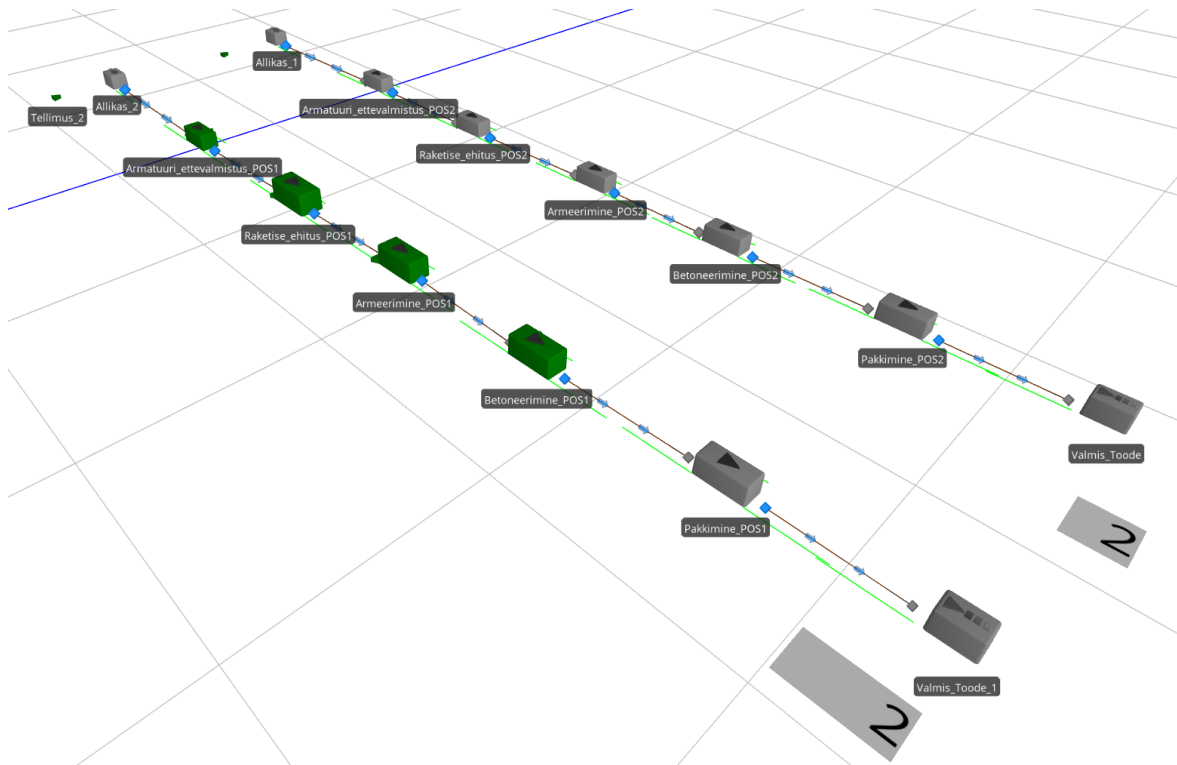
time), seadme hooldussagedus (Off shift rule), töötajate töögraafik (Initial work schedule) ja praaktoodete tekkimise sagedus (Reliability logic). Iga tootmispositsioon sisaldab ka maksimumkoguse detaile, mida on võimalik ladustada tootmispositsiooni ümbruses (Capacity). See info on oluline, et mudel arvestaks detailide transportimise vajadustega ning sellest tulenevate tööde seisakutega (vt Joonis 7). Pärast kõikide serverite seadistamist tekib tootmisprotsessi mudel.



Joonis 7. Server ehk tootmisetappi kirjeldav üksus

Raudbetoonist trepimarsside tootmine

Raudbetoonist trepimarsside tootmise digitaalse kaksiku koostamine toimus analoogselt terratso tootmise digitaalsele kaksikule. Selle mudeli koostamine oli lihtsam, mis tulenes detailide transportimisvajaduse puudusest ning tootmine toimus pidevalt samas positsioonis. Mudeli koostamiseks teostati vaatlusanalüüs ning tootmisetappide seadistamiseks kasutati vaatlusuuringu jooksul saadud tulemust, mida on kirjeldatud alapeatükis 3.1.1. Mõlemaid vaatlusuuringu objektideks olevaid tootmispositsioone simuleeriti ühes mudelis (vt Joonis 8), mis võimaldab tulevikus lisada ka vaatlusest väljajäänud positsioonid ning tekitada tervikmudeli trepielementide tootmistsehhist.



Joonis 8. Trepimarsside tootmispositsioonide digitaalse kaksiku mudel

Analoogselt terratso tootmisele sisaldab tootmispositsioon tootmisgraafikut ning tootmisvajaduse infot. Lisaks viidi mudelisse sisse ka varieerumised (vt 3.1.1) tööülesannete täitmisel, mis tulenevad inimeste tööde seisakutest (puhkepausidest).

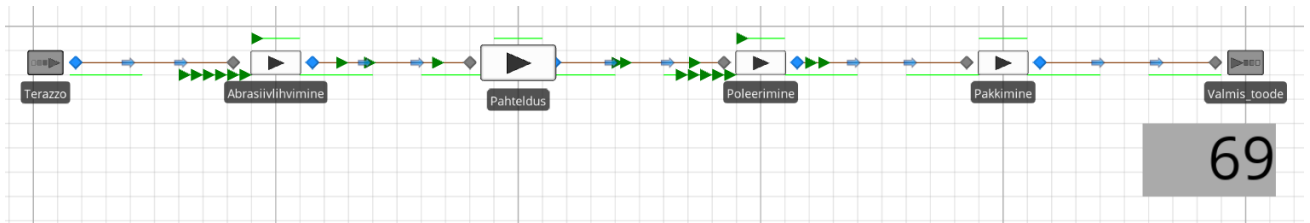
2.2.3 Digitaalse kaksiku valideerimine

Nagu eelnevalt nimetatud, on digitaalse kaksiku õige ja täpne koostamine täpsete stsenaariumite simulatsioonide eelduseks. Digitaalse kaksiku kontrollimiseks võrreldi füüsilist tootmist ja digitaalset kaksikut.

Terratso digitaalne kaksik

Digitaalses kaksikus saadud päevatoodangu kogus pidi olema võrdeline füüsilise kaksiku omaga. Analoogselt toodetavale päevakogusele pidid olema ka võrdelised tootmisjärjekorrad tööpäeva lõpus tootmispositsioonidel, mis samuti osutus õigeks. Digitaalses kaksikus saadi päevatoodanguks 69 terratso detaili (vt Joonis 9) ning tulemuse kontrollimiseks loeti üle füüsilise kaksiku päevatoodang. Füüsilise kaksiku

päevatoodanguks saadi 73 detaili (vt Pilt 1). Sarnaselt päevatoodangule võrreldi ka tootmisjärjekordi, mis samuti olid võrdväarsed.



Joonis 9. Digitaalse kaksiku simulatsiooni tulemus



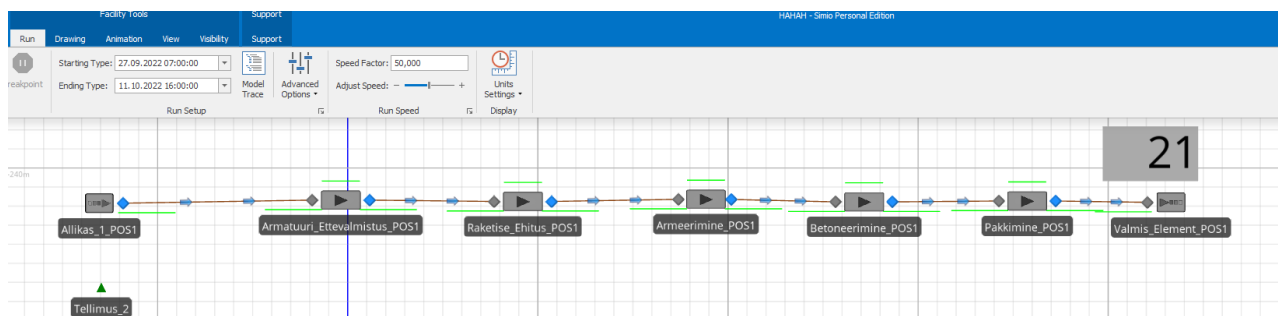
Pilt 1. Reaalne toodang tööpäeva jooksul

Tulenevalt sellest, et kontrollimised klappisid, on võimalik väita, et terratso tootmise digitaalne kaksik koostati piisavalt täpselt ning sellega on võimalik koostada stsenaariumite simulatsioone.

Trepimarsside tootmine

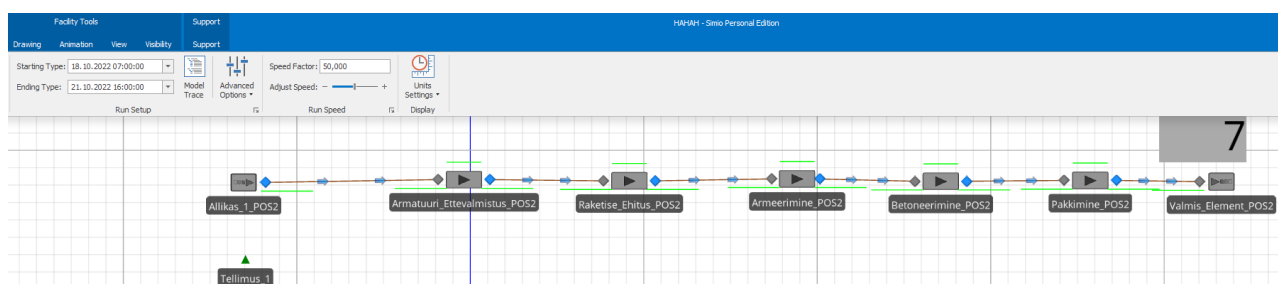
Trepimarsside tootmiskaksiku kontrollimiseks sisestati digitaalse kaksiku mudelisse mõlema tootmispositsiooni tellimused ning kontrolliti, kas tellimuse valmimise lõppkuupäev simulatsioonis ühtis füüsilise objekti omaga või mitte. Mõlema tootmispositsiooni tellimuste valmimise kuupäevad olid identsed füüsilise kaksikuga.

POS. 1 alustas tootmist 27.09 ning lõpetas 11.10.2023. Selles ajavahemikus toodeti 21 trepielementi. Simulatsiooni tulemus oli identne füüsilise tootmisega (vt Joonis 10).



Joonis 10. POS. 1 digitaalse kaksiku valideerimine

Analoogselt võrreldi POS. 2 tootmist ning digitaalse kaksiku valideerimine osutus edukaks, mis on näha alloleval pildil (vt Joonis 11).



Joonis 11. POS. 2 digitaalse kaksiku valideerimine

2.3 Tootmisprotsessid ja tehnoloogia

Käesoleva uurimustöö raames keskenduti raudbetoonist trepimarsside ja terratso elementide tootmistehnoloogia kulutõhususele. Kulusäästlikumate tootmisstsenaariumite moodustamiseks on oluline tunda olemasolevat tootmistehnoloogiat ning kvaliteedinõudeid. Selles peatükis antakse lühiülevaade trepimarsside ja terratso elementide tootmistehnoloogiast ning põhjalikumad tootmisprotsesside kirjeldused sisalduvad lõputöö lisamaterjalides (vt Lisa 2 ja 3).

2.3.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmistehnoloogia

Raudbetoonist trepimarsside tootmine ettevõttes AS Alistron koosneb kuuest põhietapist:

1. **Armatuuri ettevalmistus.** Tootejoonistes esitatud armeerimise spetsifikatsiooni kasutades toimub armatuurlattide lõikamine ja painutamine vastavalt tootejoonistele. Ettevõttes AS Alistron on iga tootmispositsioon varustatud armatuuri lõike- ja painutuspingiga. Igast vajalikust armatuuri

positsioonist tehakse šabloon, mistõttu on järgnevate detailide painutamine ja lõikamine kiirem.

2. **Armeerimine.** Kõige ajakulukam protsess trepielemendi valmistamisel on armatuurkarkassi sidumine. Armatuurkarkassi valmistamine toimub pukkidel ning kogu karkassi valmimisel asetatakse see raketise vormi. Enne armatuurkarkassi asetust raketise vormi toimub taridetailide paigaldus. Enne betoneerimist peavad armeeringud saama kvaliteedjuhi kooskõlastuse. Kvaliteedjuhi ülesanne on veenduda armeeringu vastavuses tootejoonistele, kaitsekihtide olemasolus ning raketise vormi õigetes gabariitides.
3. **Betoneerimine.** Pärast trepielemendi kontrollimist algab detaili betoneerimine. Betoonisegu valmistatakse betoonisegusõlmes ning transporditakse koluga betoneeritava elemendi juurde. Betoneerimist teostab üldjuhul üks inimene, kelle ülesanne on betoonisegu kohaletoomine ja betooni silumine. Tänu sellele, et raketise vorm asub vibrostendidel, ei ole vajalik kohtvibreerimine vibronuiaga. Betoonisegu retsepti valmistab ja korrigeerib vastavalt vajadusele kvaliteedijuht. Igast betoonisegust tehakse vähemalt 6 katsekeha, mida kontrollitakse ettevõtte siselaboris.
4. **Lahtirakestamine.** Lahtirakestamine toimub 12-24 tunni möödumisel. Enne lahtirakestamist võib tootmisjuht teostada Schmidti vasara katse. Lahtirakestamine toimub telferkraanadega, mille külge tropitakse trepielement. Trepielement viiakse telferkraanaga pakkimisalasse.

5. Pakkimine. Ettevõttes AS Alistron nimetatakse viimast tootmisetappi pakkimiseks. Selles pahteldatakse trepielemendi küljed ning kontrollitakse detaili välisilmet. Selle etapi põhiülesanne on valmistada detail objektile saatmiseks ning autokasti asetamine. Mittevastavuste või visuaalsete defektide tuvastamisel tehakse selles etapis vajalikud parandused. Raudbetoonist trepimarsside detailsem tootmistehnoloogia on esitatud käesoleva töö lisamaterjalides. (vt Lisa 2)

2.3.2 Terratso elementide tootmistehnoloogia

Terratso on dekoratiivne betoon, mida kasutatakse viimistlusmaterjaliks erinevatel pindadel. Terratso elemendid valmistatakse tavalisest või värvilisest betoonist vibreerimise ja järgneva töötlemise teel. Jämeda täitematerjalina kasutatakse erinevaid graniidi või marmori tüüpe. Toonimiseks kasutatakse spetsiaalseid betoonipigmente. Terratso valmistamisel on kõige olulisemaks ja aeganõudvamaks protsessiks detailide töötlemine. Terratso pinda eristab tavalisest betoondetailist läikiv ja sile faktuur, milles on eristatav betooni täitematerjal. Et terratso vastaks nõuetele, peavad detailid läbima

neli tootmisetappi. Järgnevalt antakse lühiülevaade terratso detailide töötlemistehnoloogiast.

1. Abrasiivlihvimine ja kalibreerimine. Esimeseks terratso töötlemise etapiks on abrasiivlihvimine, mille käigus lihvitakse maha terratso pinnalt 8-12 mm betoonipiim. Betooniipiima mahalihvimisel avaneb täitematerjali faktuur, mis on üks terratso tunnustest. Lihvimise käigus kalibreeritakse ka terratso gabariite.
2. Pahteldamine. Terratso betoneerimise ja vibreerimise käigus liigub betooni sees olev õhk segust välja ning jätab terratso pinnale avatud poorid. Pooride vältimiseks läbivad terratso detailid pahteldamisetapi, mille käigus hõõrutakse kogu detaili pinda tsemendi ja vee seguga, vajadusel lisatakse pigment. Tsemendi segu seondub sattumisel pooride sisse poori niiskusega, tänu millele jäävad poorid kaetuks.
3. Poleerimine. Kolmandaks töötlemisetapiks on poleerimine. Poleerimine toimub eritellimusel valmistatud poleerimiskonveieril Kasins. Poleerimise käigus eemaldatakse terratso detailidelt pahteldamisjäljed ning antakse detailidele läige.
4. Faasimine ja täkete parandus. Viimast etappi nimetatakse analoogselt trepimarsside tootmisele pakkimiseks. Pakkimisetapil toimub terratso detailide faasimine (teravate servade lihvimine ja poleerimine) ning täkete parandus. Täkete paranduseks kasutatakse epoksiidmastiksit. Selles etapis toimub ka detailide pakkimine euroalustele ning objektile saatmine. Mõned detailid liiguvad trepimarsside valmistustsehhi, kus neid kasutatakse trepiviimistluseks.

Terratso detailide tootmistehnoloogiat on detailsemalt kirjeldatud töö lisamaterjalides (vt Lisa 3).

2.4 Ettevõtte ja selle äristrateegia kirjeldus

Selles alapeatükis kirjeldatakse juhtumiuuringu objekti - tootmisettevõtet AS Alistron. Vaatamata sellele, et lõputöö kontekstis keskendutakse ainult raudbetoonist trepimarsside ja terratsopindade tootmisele, on oluline teada ettevõtte juhtimisstruktuuri, pakutavat teenustevalikut ning ettevõtte põhiväärtusi.

2.4.1 Ettevõtte kirjeldus

AS Alistron loodi 1994. aastal. Algul tootis ettevõtte ehitusmaterjale – mosaiikbetooni ehk terratso trepiastmeid sisetrepidele. Aasta hiljem alustati pesubetoonist trepiastmete tootmist välistrepidele, lisaks ka paigaldusteenuse osutamist. Alates

2008. aastast on tootmises trepielemendid raudbetoonist ja samuti terratso viimistlusega, millest sai ettevõtte põhitoodang.

Ettevõtte põhitoodanguks on:

1. Trepimarsside ja -mademete valmistamine
2. Monoliiterratso põrandate valmistamine
3. Terratsoplaatide hankimine ja paigaldus
4. Terratso hooldus ja restaureerimine
5. Naturaalkivide paigaldus

Ettevõttes on kokku 38 töötajat, kellest 6 on ITP. Raudbetoonelementide ja terratso tootmise eest vastutab tootmisjuht. Eelarvestusosakonnas töötab kaks inimest, kes vastutavad hinnapakkumiste koostamise eest. Tulenevalt sellest, et ettevõtte toodab betooni iseseisvalt, on ITP-meeskonnas tootmistehnoloog, kes jälgib nii ettevõtte toodangu kvaliteedi vastavust ning koostab betoonisegu retsepte. Ettevõtte osutab erinevaid teenuseid ehitusobjektidel ning seotud tööd on projektijuhi vastutusalas. Üldist ettevõtte juhtimist korraldab juhatuse esimees.

AS Alistron järgib oma tegevuses järgmisi standardeid:

1. ISO 9001 alates 2004
2. EVS EN 14843:2008 alates 2008
3. ISO 14001:2004 alates 2011
4. INSPECTA FI alates 2012
5. NORDSERT BBC nr 2256

2.4.2 Ettevõtte äristrateegia

„Äristrateegia määratleb, millist väärtust ettevõtte kliendile pakub ehk millist väärtust klient kaupa või teenust tarbides kogeb. Teostades muudatusi ettevõtte tootmisstruktuuris, on oluline säilitada olemasolev äristrateegia, mis loob väärtust klientidele. [36] Ettevõtte äristrateegiaks on pakkuda arhitektidele, ehitusettevõtjatele ning ehitiste omanikele kõrge kvaliteediga mosaiikbetooni e. terratsot (itaalia k. „terrazzo“) ja pesubetooni lahendusi, mis võivad olla nii elementidena kui ka monoliitsetes vormides. Viimasel ajal valatakse ka erineva pinnaviimistlusega trepimarsse (terratso, pesubetoon, vasardatud pind, vormipind). [36]

3 JUHTUMIUURING

Selle peatüki eesmärk on kirjeldada olemasolevat tootmisolukorda ning selgitada vaatlusanalüüsi käigus saadud tulemusi. Järgenvates alapeatükkides selgitatakse uurimuste tulemustest lähtuvalt välja, millised tegevused või toimingud tekitavad raiskamisi trepielementide ja terratso tootmises.

3.1 Olukorra tuvastamine

Olukorra tuvastamine toimus nii raudbetoonelementide tootmises kui ka terratso elementide valmistamises. Tulenevalt sellest, et nende toodete valmistamine ei ole omavahel seotud ning uurimine toimus erinevalt, kirjeldatakse olukorra tuvastamist erinevates alapeatükkides. Olukorra tuvastamist alustatakse raudbetoonist trepimarssidest.

3.1.1 Trepimarsside vaatlusuuringu tulemused

Vaatlusuuringut alustati raudbetoonist trepimarsside tootmise analüüsimisest ning kõige ajakulukamate tegevuste väljaselgitamisest. Trepielementide tootmispositsiooni läbilaskevõimekuse ja läbilaskeaegade määramiseks sai teostatud nende positsioonide vaatlusuuring. POS. 1 puhul analüüsiti seitset töövahetust ning POS. 2 puhul nelja töövahetust.

Analüüs sisaldas esimest kahte vahetust tellimuse tootmise algusest ning kestis kuni tellimuse kõikide elementide valmimiseni. POS. 1 ja POS. 2 tegelesid mõlemad Rootsist pärit tellimustega, kus toodeti enamik tellitavaid sirgeid trepielemente terratso viimistlusega. POS. 1 toodetavate trepielementide pikkus oli 3,342 m ja laius 1,3 m. POS. 2 toodetavate elementide pikkus olid 4,376 m ja laius 1,04 m. Tellimused erinesid ka terratso viimistluse tooni poolest.

Tööpäevade jooksul fikseeriti kõik tegevused, millega olid nende positsioonide töötajad hõivatud, ning Joonis 23(vt Lisa 2) on võimalik jälgida töötajate tegevuste kestusi ja loogikat.

Joonis 23 (vt Lisa 2) on igale tegevusele määratud värvikood, mille selgitus on leitav graafiku all olevas eksplikatsioonis. Horisontaaltelg näitab iga protsessi kestust ning vertikaalteljel on näha positsiooni töötaja number. Igas positsioonis on 2 töötajat ning mõlemas positsioonis on Töötaja 1 kogenum, üle 10-aastase töökogemusega. Töötaja 2 mõlemas positsioonis on vähem kui 5-aastase töökogemusega raudbetoonist

trepimarsside tootmisel ning on Töötaja 1 alluvuses. Töötaja 1 ja 2 on erinevates positsioonides erinevad inimesed.

POS. 1 tootmise analüüs.

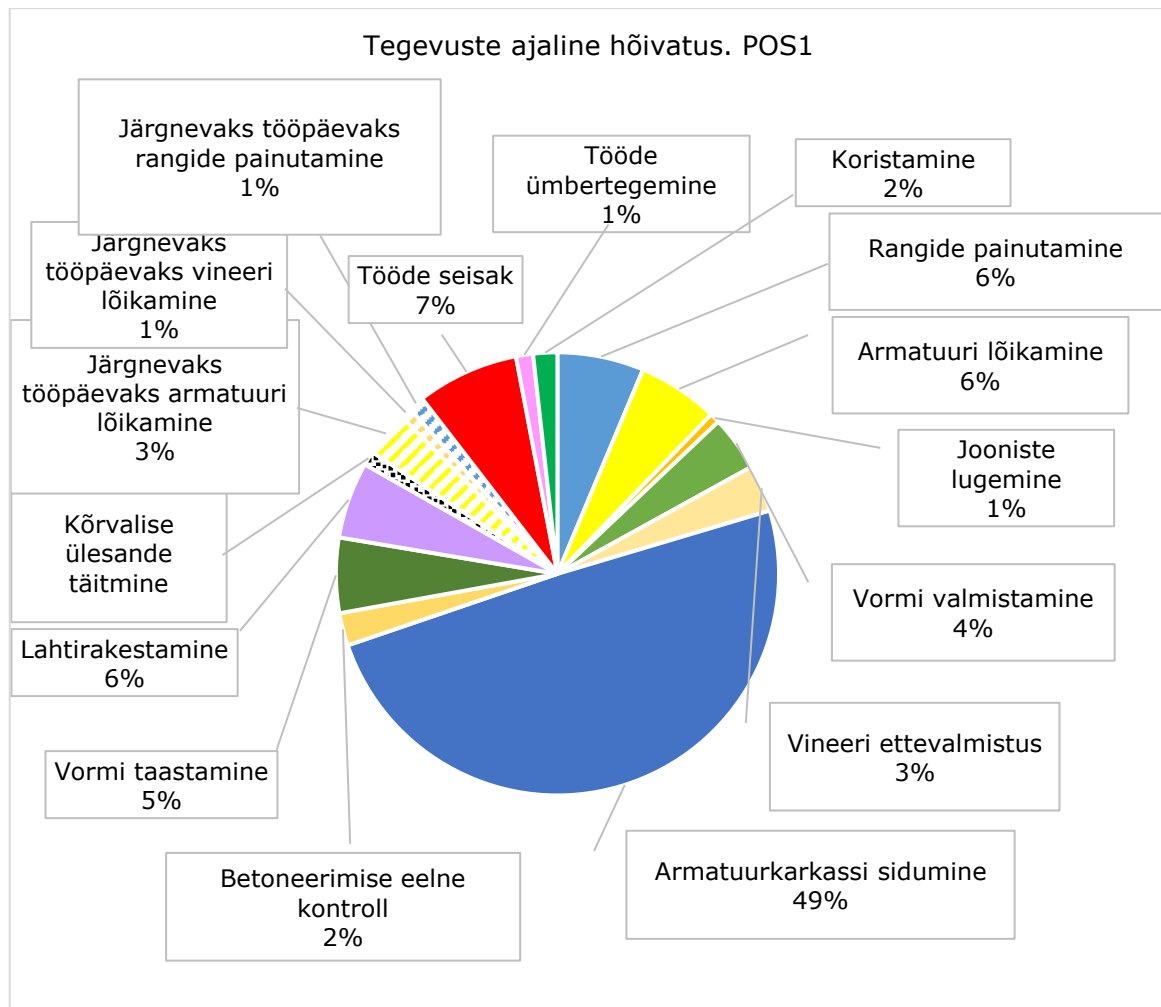
POS. 1 tootmine algas 27.09.2022 ning tellimus sisaldas 21 ühesugust elementi. Tellimuse tootmine selles positsioonis lõpetati 11.10. Positsiooni läbilaskevõimekusi on kirjeldatud allolevas tabelis (vt Tabel 2) ning samuti on ristiga märgitud, millistel tootmispäevadel teostati päeva tegevuste vaatlusanalüüs.

Nagu on näha Tabelist 2, siis väiksem osa tootmispäevi jäi vaatlusanalüüsist välja, kuid vaatamata sellele olid tootmisvõimekused mittejälgitavatel päevadel samasugused kui jälgitavatel.

Tabel 2. POS. 1 läbilaskevõimekus tootmispäevadel

Tootmise kuupäev	Toodetud elemente	Vaatlus-uuring
27.09.2023	1	x
28.09.2023	2	x
29.09.2023	2	
30.09.2023	2	x
03.10.2023	2	
04.10.2023	2	x
05.10.2023	2	
06.10.2023	2	x
07.10.2023	2	x
10.10.2023	2	
11.10.2023	2	x

Joonis 12 kirjeldab, kui suure osa tööpäevast kulutab keskmiselt POS. 1 iga tööliigi tegemiseks. Igapäevaste tegevuste analüüsimiseks loodi sarnased joonised, mis kirjeldavad tootmisprotsessi päevakaupa (vt Lisa 1).



Joonis 12. Tegevuste keskmine ajaline hõivatus POS. 1 tellimuse tootmiseks vaatlusperioodil 27.09.2022-11.10.2022.

Raudbetootreppide valmistamine on suures osas käsitöö ning erinevate inimtegurite tõttu võib ajakulu sarnaste tööülesannete täitmiseks erineda. Sellist erinevust nimetatakse varieerumiseks, millega tuleb arvestada tootmise planeerimisel. Läbiviidud uurimuse põhjal oli võimalik välja selgitada, kui suur varieerumine ühesuguse tööülesande täitmiseks erinevatel tootmispäevadel tekib. Samuti on oluline teada keskmist ajakulu ühesuguse tööülesande täitmiseks (vt Tabel 3). Seda tabelit analüüsid tuleb arvestada, et selle positsiooni tööde planeerimisel arvestatakse 16 inimtunniga, mis tuleneb sellest, et seda tööd ei ole võimalik teostada üksinda ning positsiooni töös on hõivatud 2 inimest. Varieerumiste väljaselgitamine oli vajalik, et määrata tööde teostamise kestused digitaalses kaksikus.

Tabel 3. POS. 1 tööülesannete täitmise keskmised näitajad vaatlusperioodil 27.09.2022-11.10.2022.

Tegevus	Keskmine ajakulu minutites	Keskmine ajakulu %	Varieerumine ülesande tegemiseks minutites	Varieerumine ülesande tegemiseks %
Rangide painutamine	61	6,3%	24,15	2,50%
Armatuuri lõikamine	57	5,9%	26,01	2,69%
Jooniste lugemine	24,5	0,7%	34,65	1,92%
Vormi valmistamine	136,5	4,0%	14,85	6,92%
Vineeri ettevalmistus	57,75	3,4%	11,95	3,31%
Armatuurkarkassi sidumine	477	49,4%	62,93	6,51%
Betoneerimise eelne kontroll	23	2,4%	6,66	0,69%
Vormi taastamine	61,8	5,5%	32,96	3,94%
Lahtirakestamine	63	5,6%	18,25	3,01%
Kõrvalise ülesande täitmine	35	1,0%	49,50	2,74%
Järgnevaks tööpäevaks armatuuri lõikamine	44,8	3,3%	10,62	2,43%
Järgnevaks tööpäevaks vineeri lõikamine	28	0,8%	39,60	2,19%
Järgnevaks tööpäevaks rangide painutamine	38,5	1,1%	4,95	1,96%
Tööde seisak	72	7,5%	31,49	3,26%
Tööde ümbertegemine	42	1,2%	19,80	2,28%
Koristamine	39,7	2,1%	16,17	2,49%

Mõned tegevused Tabel 3 ei ole igapäevased. Raudbetoonelementide valmistamiseks on vajalik ehitada vormid (raketised) ning raketiste ehitamine toimus ainult esimesel ja teisel tootmispäeval. Esimesel tootmispäeval ehitati valmis esimene raketis ning teisel tootmispäeval valmis veel üks vorm. Järgnevalt ei toimunud raketise ehitamist algusest lõpuni, vaid raketise vormi puhastamine betoonijääkidest ja parandused. Tulenevalt raketise pidevast korduvkasutamisest vahetati kulunud raketise elemente vastavalt vajadusele. Vaatlusuuringu perioodil vahetati kaks korda välja mõlemad raketise küljekilbid ning üks kord vahetati trepimarsi vormi ülemine otsakilp. Vaatamata sellele

on raketise valmistamise kestuse statistika oluline esimese kahe tootmispäeva planeerimiseks tulevikus.

Sarnaselt raketise vormi ehitamisega toimus jooniste lugemine ainult esimesel tootmispäeval ning esimesel päeval valmistasid töötajad ette vajalikud märkmed raketise elementide lõikamiseks ning šabloonid painutatud armatuurelementide valmistamiseks.

Nii nagu tootmisettevõtte väärtuseks ja ressursiks on inimesed, on ressursiks ka materjal, mida kasutatakse toodete valmistamiseks. Et oleks võimalik hinnata ja vajadusel parandada materjalide kasutamise efektiivsust ja olla materjalisäästlik, on oluline jälgida materjalide kasutamist. Kõige suuremad materjalikulud tekivad raketisevormide ehitamisel ning armatuuri lõikamisel ja painutamisel. Vaatlusuuringu käigus fikseeriti, kui palju materjali kulus POS.1 kogu tellimuse valmistamiseks (vt Tabel 4).

Armatuurijääkide kogus arutati välja lähtuvalt kasutatud lattide kogustest, jooksva meetri kaaluga. Vineerijäägid arutati välja lähtuvalt terviktahvlite kasutamisest ja nendest tulenevatest jääkidest. Selles alapeatükis kirjeldatud tulemuste analüüs ja hinnang sisalduvad alapeatükis 3.2.

Tabel 4. Materjalide kasutamine POS. 1 tellimuse valmistamiseks.

Nimetus	Kasutatud materjal	Projekti vajadus	Ühik	Maksumus	Kasutamata jääk	Ühik	Jääk %
Lamineeritud vineer d=12 mm	24,8	Määramata	m ²	520,80 €	2,8	m ²	11,3%
Puitpruss 100x50x4800	38,4	Määramata	jm	53,76 €	1,16	jm	3,0%
Armatuur D8;10;16	2370	2207,1	kg	1919,7 €	162,9	kg	6,9%

POS. 2 tootmise analüüs

Järgnevalt tutvustatakse POS. 2 tootmise analüüsi. Selle positsiooni puhul toimus vaatlusuuring perioodil 18.10.2022 – 21.10.2022. Positsioon tegeles Rootsist pärit tellimusega, mis sisaldas 7 trepielementi. Analüüs toimus sarnaselt POS. 1 omale ning

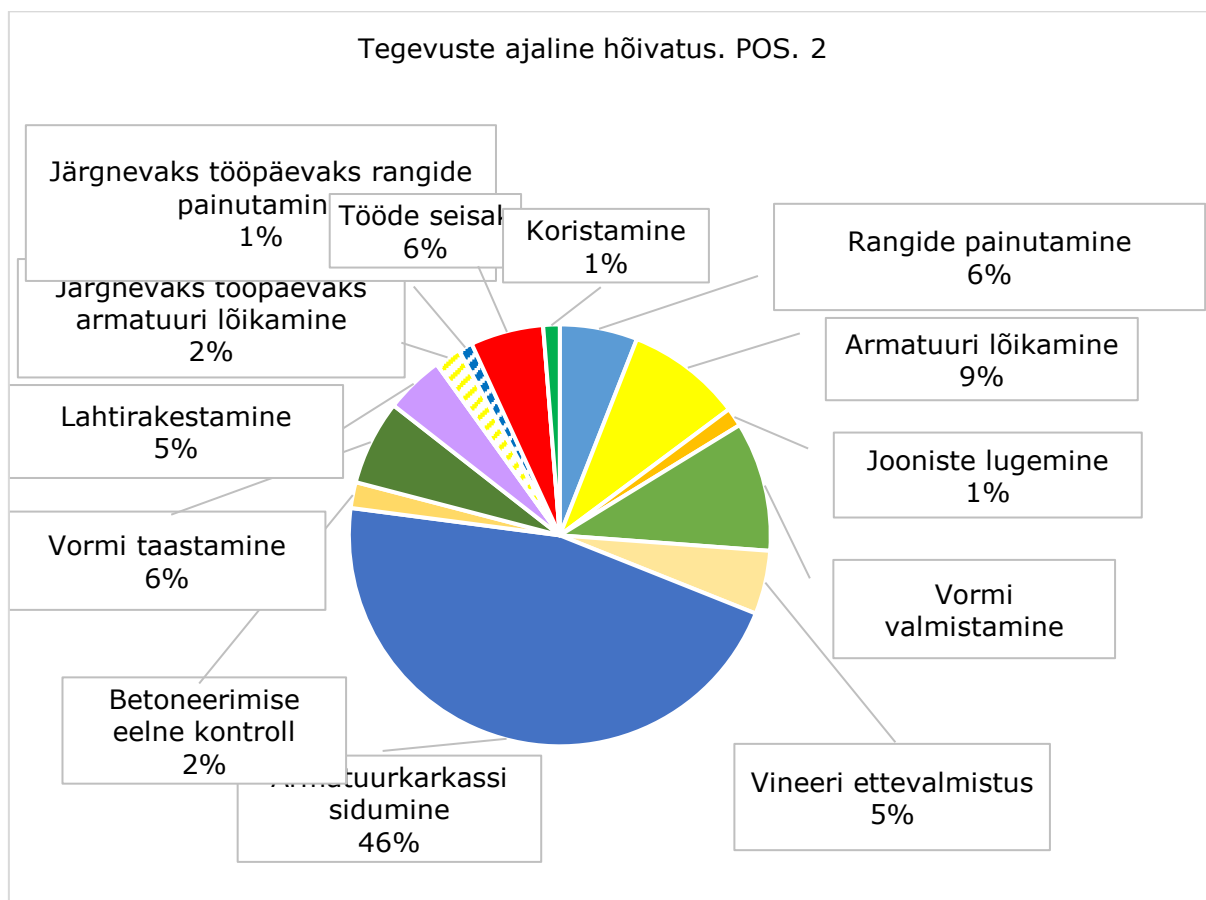
järgnevalt kajastatakse saadud tulemusi. Sarnaselt POS. 1 analüüsile sai määratud POS.2 läbilaskevõimekus ja -aeg (vt Tabel 5)

Tabel 5. POS. 2 läbilaskevõimekus vaatlusperioodil

Tootmise kuupäev	Toodetud elemente	Vaatlus-uuring
18.10.2023	1	x
19.10.2023	2	x
20.10.2023	2	x
21.10.2023	2	x

Kogu tellimuse valmimiseks kulus neli tööpäeva. Sarnaselt POS. 1-le ehitati selle tellimuse valmistamisel esimesel päeval üks raketise vorm ning teisel tööpäeval tehti valmis täiendav vorm elementide armeerimiseks. Selle positsiooni analüüsimiseks

koostati ringdiagramm, mis kirjeldab keskmist ajakulu iga tööülesande täitmiseks (vt Joonis 13).



Joonis 13. Tegevuste keskmine ajaline hõivatus POS. 2 tellimuse tootmiseks vaatlusperioodil 18.10.2022-21.10.2022.

Igapäevaste tegevuste analüüsimiseks loodi sarnased diagrammid, mis kirjeldavad tootmisprotsessi päevakaupa (vt Lisa 1). Selles positsioonis oli toodetava tellimuse maht väiksem, mistõttu raketise kilpide väljavahetamist oli vähem. Vaatluse käigus tuvastati, et üks kord toimus raketise küljekilbi vahetus ning kolm korda vahetati välja raketises trepimademe alusvineer.

Järgnevalt määrati POS. 2 tööülesannete täitmise kestuste varieerumised. Töökorraldus ja -tavad olid sellel brigaadil sarnased POS. 1 töötajate omadega ning Tabel 6 näitab fikseeritud varieerumisi tööülesannete täitmisel ja keskmisi kestusi. Samamoodi antakse ülevaade nende positsioonide materjalikasutuse näitajatest (vt Tabel 7).

Tabel 6. POS. 2 tööülesannete täitmise keskmised näitajad vaatlusperioodil 18.10.2022 - 21.10.2022.

Tegevus	Keskmine ajakulu minutites	Keskmine ajakulu %	Varieerumine ülesande tegemiseks minutites	Varieerumine ülesande tegemiseks %
Rangide painutamine	57,75	6,0%	45,48	2,39%
Armatuuri lõikamine	85,75	8,9%	34,95	1,24%
Jooniste lugemine	56	1,4%	28,00	2,90%
Vormi valmistamine	192,5	10,0%	87,46	11,60%
Vineeri ettevalmistus	47,25	4,9%	48,98	3,62%
Armatuurkarkassi sidumine	446,25	46,2%	195,76	5,50%
Betoneerimise eelne kontroll	19,25	2,0%	13,99	0,69%
Vormi taastamine	84	6,5%	0,03	5,12%
Lahtirakestamine	58,3	4,5%	0,03	3,67%
Järgnevaks tööpäevaks rangide painutamine	42	1,1%	0,03	2,17%
Tööde seisak	54,25	5,6%	27,97	3,04%
Tööde ümbertegemine	0	0,0%	0,00	0,00%
Koristamine	16,3	1,3%	0,00	0,91%

Tabel 7. Materjalide kasutamine POS. 2 tellimuse valmistamiseks.

Nimetus	Kasutatud materjali	Tegelik vajadus	Ühik	Maksumus	Kasutamata jääk	Ühik	Jääk %
Lamineeritud vineer d=12 mm	9,7	Määramata	m ²	203,70 €	1	m ²	10,3%
Puitpruss 100x50x4800	14	Määramata	jm	19,60 €	1,16	jm	8,3%
Armatuur D8;10;16	1001	946,4	kg	810,81 €	54,6	kg	5,5%

3.1.2 Terratso tootmise vaatlusuringu tulemused.

Terratso elementide tootmisesse on kaasatud palju masinressurssi ning enamik tehase pindalast ja tsehhidest on mõeldud terratso detailide töötlemiseks.

Terratso detailide tootmine algab terratso valamisest ning see positsioon väljastab igapäevaselt keskmiselt 70–120 terratso detaili. Kõige levinumad AS Alistroni

toodetavad terratso detailid, mida kasutatakse nii trepielementide viimistluseks kui ka põrandakatte materjalideks, on mõõtmetega 1,2 x 0,25 m ja 0,9 x 0,75 m. Vaatamata suurele gabariidi- ja kujuvalikule toodetavate terratso elementide hulgas keskendutakse käesolevas lõputöös terratso kõige levinumale kujule. Nende terratso detailide keskmine tootmisvõimekus valutsehhis on 100 tk vahetuses (vt Pilt 2), mis tuleneb valu aluslaudade pinna kasutamise efektiivsusest. Vaatluse ja andmete kogumise ajal tegeles tehas Soomest pärit tellimusega, mis sisaldas 900 terratso elementi põrandakatete viimistluseks ja 312 elementi treppide viimistluseks.



Pilt 2. Terratso valutsehhi toodang vahetuses - 100 detaili

Uurimise eesmärgiks oli tuvastada raiskamised terratso elementide töötlemise protsessis. Esimeseks vaatluse eesmärgiks selles uurimistöös püstitati erinevate terratso töötlemiseadmete läbilaskevõimekuste ja -aegade määramine, mida kasutatakse digitaalse kaksiku koostamisel. Et terratso tootmine vajab ka käsitsi tööd

(pahteldus, faaside lihvimine, poleerimine, tākete parandus), uuriti ka nende etappide võimekusi.

Järgnevalt tutvustatakse terratso tootmisesse kaasatud etappide läbilaskeaegu, mis fikseeriti kellas oleva stopperi abil (vt Tabel 8) .

Tabel 8. Terratso töötlemisetappide läbilaskeajad.

Etapi nimetus	Ajakulu ühe detaili valmistamiseks minutites
Abrasiivlihvimise konveier	6 minutit
Pahteldus	6 minutit
Poleerimiskonveier	5 minutit
Faasimine, tākete parandus, pakkimine	4 minutit

Tulenevalt sellest, et tootmisetapid asuvad erinevates tsehhides, lisandub täiendav ajakulu elementide etappide vaheliseks transportimiseks. Iga tootmisetapi ümbruse ruumi pindala materjalide ladustamiseks on erinev, alati ei ole võimalik ladustada elemente otse töötlemisetapi tsoonis ning tekib vajadus elementide vaheladustamiseks hoovis (vt Pilt 3) olevas ladustusalas, mis omakorda mõjutab detailide transportimise kestust. Järgnevalt sai fikseeritud, kui palju kulutatakse aega materjalide transportimiseks etappide vahel (vt Tabel 9).

Tabel 9 näidatud transportimise aeg sisaldas töötaja ooteaega kahveltõstuki vabanemiseks, kahveltõstukiga sõitmist tootmisetapi alasse, aluse troppimist ja fikseerimist, aluse vedamist tootmisetapist vaheladustusalasse või tootmisetappi ning seejärel tõstuki parkimist. Transportimist järgmisesse tootmisetappi teostas alati eelneva etapi töötaja. Transportimise ajal detailide töötlemist ei toimunud.

Kõige suuremad tööde seisakud tuvastati ajavahemikus 13.00-13.40, kuna selles ajavahemikus tekkis detailide vedamise vajadus poleerimisetapist pakkimisetappi ning pahteldamisetapist vahelattu, mille tõttu ei olnud võimalust transportida eelnevast töövahetusest jäänud detaile vaheladustusalast abrasiivlihvimisse.



Pilt 3. Terratso detailide vaheladustamine hoovis

Tabel 9. Fikseeritud materjalide transportimise kestus etappide vahel vahetuse jooksul.

Transportimise suund	Transportimise kestus minutites vahetuse jooksul	Transpordivahend
Abrasiivlihvimiskonveier - pahteldus	29	Kahveltõstuk
Pahteldus - poleerimiskonveier	15	Kahveltõstuk
Poleerimiskonveier - faasimine/pakkimine	15	Kahveltõstuk

Terratso tootmistempo säilitamiseks on äärmiselt oluline hoida mehhanismid pidevalt töökorras ning selleks on tarvis teostada pidevaid hooldus- ja korrashoiutöid. Kasutatavad seadmed vajavad abrasiivkivide vahetust ning tootmistempode

planeerimiseks ja tootmisplaanide koostamisel on oluline arvestada nende vajadustega. Samuti toimub igapäevaselt tootmiseseadmete ja tootmispositsioonide ümbruse pesu. Järgnevalt määratleti, mitu detaili suutis iga tootmisetapp läbi lasta tööpäeva jooksul. Betoneerimistsehhist jõudis töötlemisse 100 detaili ning järgnevalt kirjeldatakse, mitu detaili töödeldi igas etapis ning mitu detaili jäid ootama järjekorda (vt Tabel 10).

Tabel 10. Fikseeritud positsioonide läbilaskevõimekused

Etapi nimetus	Läbilastud detaile vahetuse jooksul	Detaile tootmisjärjekorras vahetuse lõpus
Abrasiivlihvimiskonveier	81 tk	19 tk
Pahteldus	77 tk	4 tk
Poleerimiskonveier	71 tk	8 tk
Faasimine, tākete parandus, pakkimine	69 tk	2 tk

Tabelis 10 esitatud andmed kajastavad tootmise esimest päeva. Järgnevatel päevadel hakkasid tootmisjärjekorrad suurenema.

Abrasiivlihvimiskonveieri õlitamine, määrimine ja pesu toimus igapäevaselt töövahetuse alguses - algus kell 07.00 ning lõpp kell 07.30. Abrasiivkivi vahetus oli vajalik iga 11 m² järel ja see kestab 2-3 minutit.

Poleerimiskonveier (Kasins) teostab abrasiivotsakute vahetust automaatselt ning abrasiivide vahetuse sageduseks uuringu läbiviimise ajaks oli seadistatud iga teine tund (kestus 2 minutit)

3.2 Raiskamiste tuvastamine ja analüüs

Raiskamiseks nimetatakse kõiki tegevusi, mis ei avalda täiendavat väärtust toodetavale detailile või elemendile ning nende etappide väljaselgitamine ning tekkepõhjuse määramine on oluline samm tootmise tõhususe parandamiseks.

Kulusäästlik tootmine tähendab ka tootmiseks vajalike materjalide läbimõeldud kasutamist. Materjalide ebaefektiivne kasutamine tähendab raiskamiste tekkimist ning

järgnevates peatükkides analüüsitakse jääkide tekkimise kriitilisust ning võimalike stsenaariume jääkide vähendamiseks.

Raiskamiste tuvastamiseks kasutati „Lean manufacturing tools“ filosoofiat ning vastavalt nendele parameetritele toimub olemasoleva olukorra tuvastamine (vt 1.2.4).

3.2.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmine

Tootmise eripärad

Järgnevalt toimub raiskamiste tuvastamine trepielementide valmistamise protsessis. Päevakava uuringut analüüsid on kohe märgata selliseid raiskamisi ehk väärtust mittelisavad tegevusi nagu tööde seisakud ja ümbertegemised. POS. 1 keskmine tööde seisak vaatlusperioodil oli 7% ja POS. 2 puhul 6%. Tööde seisaku ajal tegelesid töötajad kõrvaliste tegevustega, mis ei avalda positiivset mõju toote valmimisele. Kõige sagedam kõrvaline tegevus nendel positsioonidel oli mobiiltelefoni kasutamine ja kohvi joomine. Ettevõttele on see täiendav kulu, mille peab ta kinni maksma ning seda kulu saab välja arvutada vaatluspäevade kaupa (vt Tabel 11)

Tabel 11. Tootmisseisakute maksumus vaatluspäevadel

Tootmise kuupäev	Seisak minutites	Seisaku maksumus
27.09.2023	126	44,10 €
28.09.2023	21	7,35 €
30.09.2023	70	24,50 €
04.10.2023	56	19,60 €
06.10.2023	84	29,40 €
07.10.2023	77	26,95 €
11.10.2023	70	24,50 €
18.10.2023	56	19,60 €
19.10.2023	14	4,90 €
20.10.2023	63	22,05 €
21.10.2023	84	29,40 €
	Summa	252,35 €

Tabel 11 on näidatud seisakute kestus positsioonis ning töötajate tunnitasu teades saab tuvastada nende seisakute maksumused. Nimetatud raiskamist analüüsid tuleb arvestada, et trepielemendi valmistamine on raske füüsiline töö. Töötajad peavad käsitsi hakkama saama armatuurvarraste pideva käsitlemisega, raketisekilpide ja vineertahvlite tõstmisega ning teiste füüsiliste töödega.

Analüüsid tööpäeva tegevuste graafikut (vt Joonis 23), on näha, et suurem osa tööde seisakuid tekib päeva teises pooles, mis on selgitatav töötajate füüsilise väsimusega tööpäeva lõpus. Tootmisjuhi üks ülesannetest on takistada tootmisseisakuid, kuid

arvestades, et töötaja on ettevõttele oluline ressurss, tuleb teda hoida. Pidev tööle sundimine võib avaldada negatiivset mõju tööülesannete teostamisajale ning tekitada rohkem ümbertegemisi, mis tähendab ettevõttele nii täiendavat inimitunni kulu kui ka suuremat materjalikasutust.

Mõlemas positsioonis olid tootmise esimesed ja teised päevad läbilaskevõimekuse poolest väga erinevad. Tootmise teisel päeval oli märgata läbilaskevõimekuse kahekordset kasvu. Esimesel päeval tehti 1 raketis ning armatuurkarkass, kuid teisel päeval rakestati lahti eelmise päeva valu, ehitati teine raketise vorm ning valmistati ette kaks armatuurkarkassi. Teisel päeval oli iga tööetapi läbilaskeaeg väiksem ning tööde teostamise kasutegur kahekordne. Antud juhul on võimalik hinnata esimest tootmispäeva tööaega mitte säästvaks ning tekib õigustatud küsimus, miks ei olnud võimalik ehitada esimestel tööpäevadel kahte vormi ning armatuurkarkassi? See küsimus edastati nii tootmisjuhile kui ka nendel etappidel töötajatele. Selle tootmisplaneerimise stsenaariumi valiku põhjenduseks toodi eelnev kogemus raudbetontreppide valmistamisel. Esimene tootmispäev tähendab uue projektiga ja tellimuse eripäradega tutvumist. Kahjuks ei ole kõik projektid identsed ning leidub erinevusi võrreldes eelnevatega, mis väljenduvad erinevates taridetailide asukohtades ja erinevates taridetailide tüüpides. Erinevad ka trepielemendi toetumise viisid podestidele ning armeerimise nõuded.

Uurimus näitas, kui tempokalt kulges mõlemas positsioonis teine tootmispäev ning arvestades, et töötajatel oli kogemusi selle tellimuse valmistamiseks, said elemendid valmis betoneerimiseks täpselt tööpäeva lõpus. Kui mõelda, et esimesel tootmispäeval oleks tarvis valmistada kaks elementi ilma eelneva kogemusega ja šabloonideta, on selgelt näha, et antud juhul liiguks elementide valmimine betoneerimiseks järgneva tööpäeva esimesse poolde ning tulenevalt sellest, et elementide betoneerimine toimub alates kell 15.30, oleks tekkinud tootmispositsioonil pinna ebaefektiivne kasutamine. Mõlemas positsioonis sai tuvastatud, et elementide valmidus betoneerimiseks saavutati tööpäeva lõpus ning tulenevalt sellest algas iga uus tööpäev lahtirakestamisega ja uue elemendi valmistamisega. Sellist ilmingut nimetatakse JIT (Just in time) tootmiseks.

Materjalide kasutamise säästlikkus

Nagu eelnevalt nimetatud, on põhilisteks kulumaterjalideks trepielemendi valmistamisel lamineeritud vineer ja puitprussid. Lisaks nendele on raketise karkassi ehitamiseks vajalikud erinevad kinnitustarvikud. Vaatluse käigus sai fikseeritud pidev raketise vormi taaskasutamine järgneva elemendi valamiseks, mis oli võimalik tänu raketise kilpide määrimisele raketise õliga. Tänu terratso viimistlusele sai vältida trepimademetete ja -

astmete raketamist uue vineeriga, kuna terratso element moodustas tõusud ja astmed. Viimistlusdetailide toetamiseks kasutati eelnevatest tellimustest jäänud aluskarkassi. Vineerijäägid mõlemas positsioonis olid 10% ja 11% vahel, mis tegelikkuses ületab tehases ettenähtud ülekulu piiri - 5%.

Kõik kinnitustarvikud, mida kasutati raketise ehitamiseks, olid välitingimuste keskkonnaklassiga C3 ning nende korduvkasutamist ei täheldatud. Kuna raketis on ajutine konstruktsioon, mille ehitamine ja kasutamine toimub sisetingimustes, on säästlikum kasutada C2- või C1-materjale. Hinnavahe moodustaks 35-40 % ning samuti ei ole säästlik iga kord kruvisid ja nurgikuid välja vahetada uute vastu, kuna ajutise konstruktsiooni ehitamiseks on võimalik korduvkasutada kruvisid ning kindlasti ka nurgikuid.

Armatuuri ülekulu on 5,5% ja 7% vahel ning armatuurijääkide tekkimise protsess on loomulik. Tehas arvestab armatuuri ülekuluks 5%, kuid arvestades armatuuri jääkide korduvkasutust, on see tulemus vastuvõetav.

3.2.2 Terratso elementide tootmine

Pudelikaelad

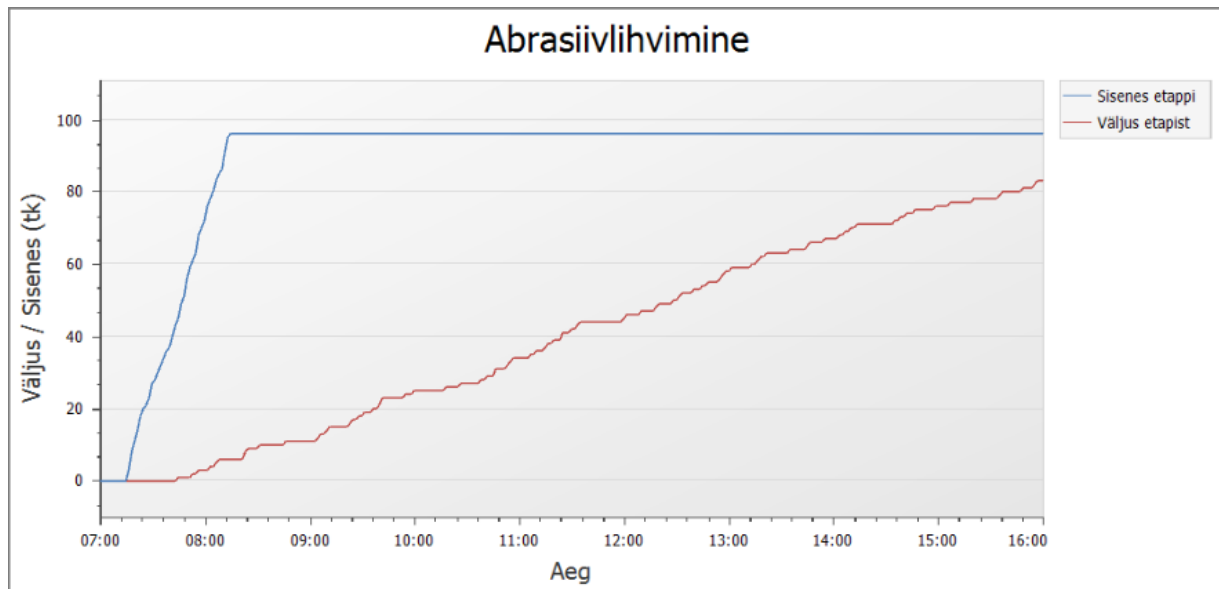
Raiskamiste tuvastamiseks kasutatakse tootmisprotsessi digitaalset kaksikut (vt 2.2.2). Digitaalne kaksik hõlmab kõiki vaatlusuuringu käigus (vt 3.1.2) saadud tulemusi ning on samaväärne füüsilise kaksikuga. Raiskamiste tuvastamine digitaalse kaksiku abil on efektiivsem, sest kirjeldab tervikpilti, arvestades kogu tootmisprotsessi, mitte lokaalseid etappe.

Raiskamiste tuvastamist alustatakse tootmisprotsessi pudelikaelte määramisest ehk selgitatakse välja, millistes tootmisetappides tekivad kõige suuremad tootmisjärjekorrad ning hinnatakse selle mõju kogu tootmisprotsessile.

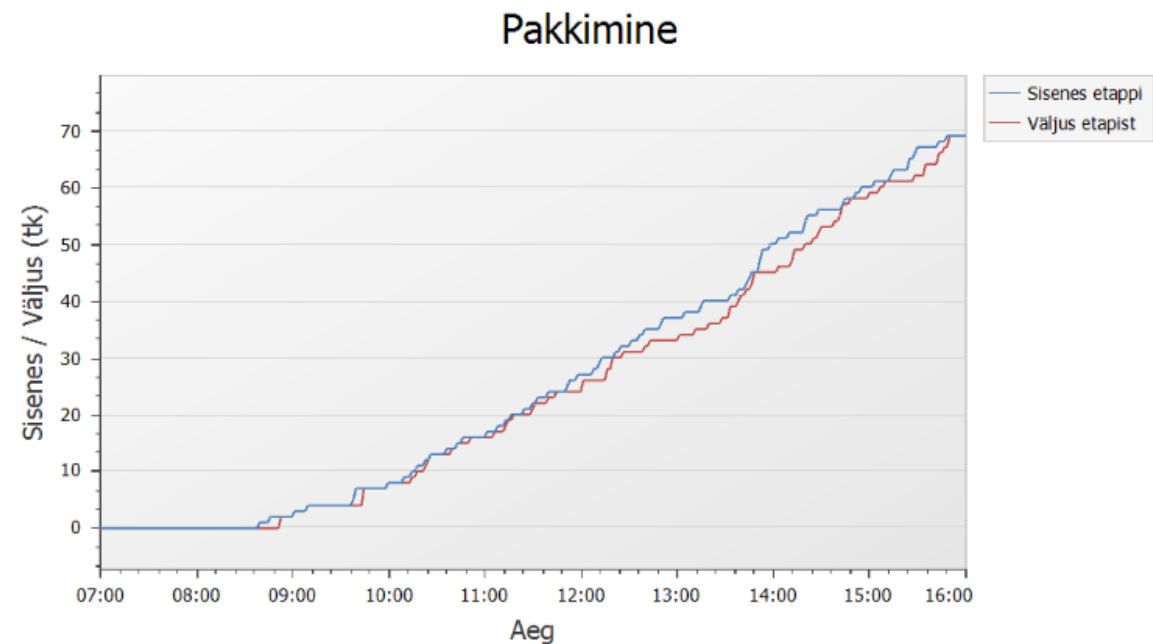
Terratso betoneerimistsehhist saabub igapäevaselt terratso töötlemisse keskmiselt 100 detaili. Esimeseks tootmispositsiooniks terratso valmistamisel on abrasiivlihvimine ning kõige suurem pudelikael tekib selles positsioonis (vt Joonis 14). Ajavahemikus 08.00 – 09.00 laekub sellesse positsiooni rohkem detaile kui suudetakse päeva jooksul läbi lasta, mille tõttu on see positsioon koormatud lisaks lihvimisele detailide vedamisega ja ümberladustamisega. Pudelikaela tekkimine selles positsioonis on tuvastatav ka digitaalse kaksiku simulatsiooni tulemustest. Simulatsiooni tulemuste järgi toimub materjalide vedu ajavahemikus 09.30 – 10.30 ja 14.00 – 14.30 (vt Joonis 14; 15; 16).

Tööpäev algab kell 07.00, kuid tulenevalt seadme igapäevasest hooldusvajadusest algab tootmine alles kell 07.40, mille tõttu alustas viimane tootmisetapp number 4 (pakkimine, vt Joonis 15) vaatluspäeva toodangu töötlemist alles kell 08.30.

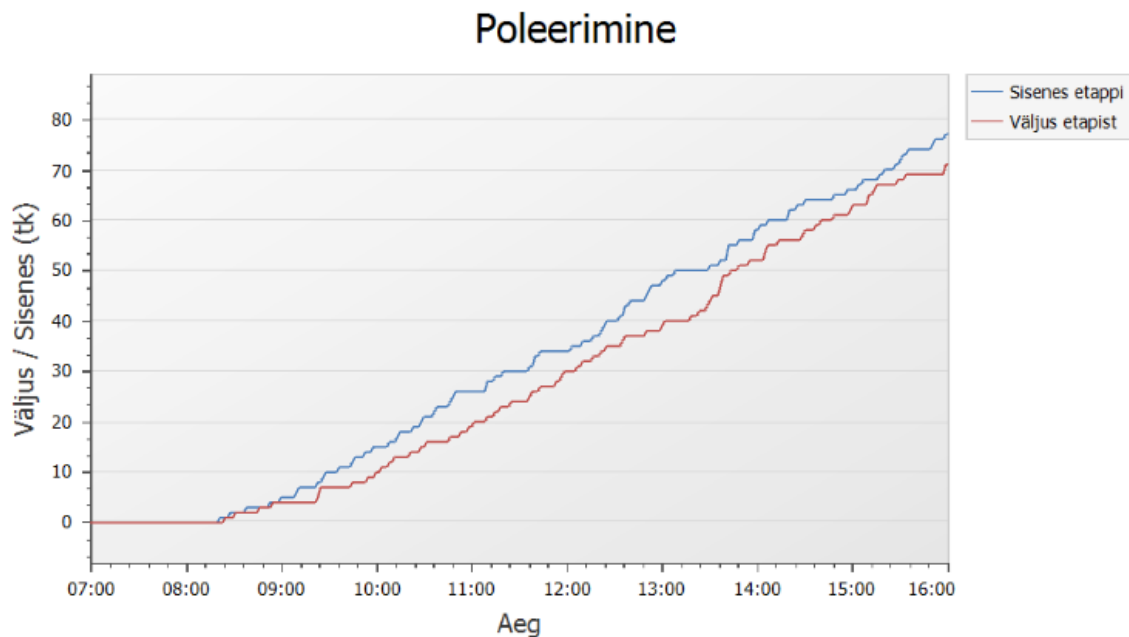
Analoogselt abrasiivlihvimiskonveierile tuvastatakse tootmisjärjekord (pudelikael) tootmisetapis number 3 (poleerimine). Sellesse etappi saabub tööpäeva jooksul rohkem detaile kui tootmispositsioon suudab päeva jooksul töödelda, mistõttu tekib tööpäeva lõpus selles etapis järjekord (vt Joonis 16)



Joonis 14. Tootmisetapp 1. Abrasiivlihvimine



Joonis 15. Tootmisetapp 4. Pakkimine - tootmisgraafik



Joonis 16. Tootmisetapp 3. Poleerimine - tootmisgraafik

Need graafikud loodi digitaalse kaksiku abil ning vastavad reaalsele olukorrale. Pahteldamise tootmispositsiooni kirjeldavad graafik asub käesoleva töö lisamaterjalides. (vt Lisa 5)

Ressursside raiskamised

Eelnevalt nimetatud raiskavad tegevused seisnesid tootmisjärjekordade tekkimises, mis toob kaasa väärtust mittelisava tegevuse - materjalide transportimise, mis omakorda tekitab tööde seisakuid, mis väljenduvad tootmisvõimekuse languses ja inimressursi raiskamises.

Vaatluse käigus sai pööratud tähelepanu tootmisetapile number 2 - pahteldamine (vt 2.3.2). Selle etapi töötlemistehnoloogia tekitab materjalide liigset raiskamist. Kui pahteldada terratso detaile tsemendiseguga ning seejärel seda puhastada, tekib suur kogus materjali jääki (vt Pilt 4). Olukorra parandamiseks sai püstitatud eesmärk, mis seisnes pahteldamisetapi elimineerimises tootmisprotsessist. Selle etapi elimineerimine võimaldab vähendada jääkide tekkimist ning vabastab täiendava tootmisressursi, milleks on tootmistsehh ning selles positsioonis hõivatud töötaja. Selle etapi elimineerimiseks oli vajalik leida alternatiivne lahendus, mis väldiks pooride olemasolu. Alternatiivse lahenduse tutvustamine ning katsetamine on kirjas

alapeatükis 3.3.1. Selles alapeatükis nimetatud raiskamiste elimineerimiseks koostati erinevad tootmisstsenaariumid, mille katsetamine toimus digitaalse kaksiku abil.



Pilt 4. Tsemendijäägid pärast pahteldamisprotsessi

3.3 Stsenaariumite koostamine ja modelleerimine

Uurimistöö käigus tuvastati raudbetoonist trepimarsside ja terratso tootmisprotsessis raiskamised ning nende elimineerimiseks koostati stsenaariumid, mille rakendamine tooks kaasa säästlikuma tootmisprotsessi. Raudbetoonist trepimarsside tootmisprotsess ei sisaldanud suuri raiskamisi (vt 3.2.1). Protsessi tõhustamiseks on vajalik sisse viia lokaalsed muudatused, mis teeks trepielementide valmistamise veelgi säästlikumaks; nende kirjeldus on alapeatükis 3.4.1.

Terratso tootmises tuvastati suuremad raiskamised (vt 3.2.2). Olukorra parandamiseks oli vajalik koostada tootmisstsenaariumid, mis sisaldasid globaalseid muudatusi tootmistehnoloogias. Järgnevalt tutvustatakse võimalike tootmisstsenaariumite sisu ning stsenaariumite modelleerimise protsessi. Stsenaariumite simuleerimise tulemused on esitatud alapeatükis 3.4.

3.3.1 Stsenaariumite kirjeldus

Raudbetoonist trepimarsid

Vaatlusuurimus näitas, et suure osa tööajast hõivab armatuurrangide painutamine ja armatuuri lõikamine. Seda olukorda on võimalik parandada, kui tellida valmispainutatud rangid ja lõigatud armatuurvardad vastavalt projekti spetsifikatsioonile. Kui välistada tootmisprotsessist armatuuri lõikamise ja painutamise, on võimalik ennustada suuremat läbilaskevõimekust ning läbilaskeaja vähendamist. Selle stsenaariumi testimiseks koostati hinnapäring ettevõttele Exmet AS, mis tegeleb armatuurelementide müügiga, ning küsiti hinnapakumist painutatud elementidele. Tuginedes koostatud hinnapakumisele on võimalik kontrollida, kas valmiselementide kasutamine on ettevõttele soodsam kui oma ressursside kasutamine või mitte. Samuti analüüsitakse, milliseid riske võib valmiselementide kasutamine kaasa tuua.

Kasutatavate materjalide jääkide tekkimine on loomulik protsess, kuid kulutõhusus tähendab materjalijääkide tekkimise minimeerimist. Trepielementide betoneerimine ei kuulunud vaatlusuuringu formaati, kuid võis täheldada, et osa betoonist, mida kasutatakse elementide betoneerimiseks, jääb üle ning see utiliseeritakse spetsiaalsesse mahutisse. Pärast kivinemist viiakse see jäätmejaama. Betoonijääkide tekkimine on loomulik, kuna betooni toodetakse alati vähemalt 3% varuga, mille eesmärk on vältida betooni puudust betoneerimise ajal. Kui betoneerimise ajal tekib betooni puudus, on minimaalne toodetav kogus betoonisegusõlmes 0,25 m³. Võimalik variant sellise betooniraiskamise likvideerimiseks on vundamendiplokkide valmistamine

betonijääkidest. Vundamendiplokk ei vaja mahulist armeerimist ning tõsteaasu saab valmistada armatuuri jääkidest.

Selle stsenaariumi kontrollimiseks laenatakse vundamendiplokkide betoneerimiseks mõeldud metallraketis ning antakse betoneerimismeeskonnale juhised valada kõik tekkivad betooni jäägid antud vormi sisse. Kui vundamendiploki valmistamine õnnestub, võetakse see lahendus kasutusse. Järgnevalt tutvustatakse terratso tootmise stsenaariume, mille testimiseks kasutatakse digitaalset kaksikut.

Stsenaarium 1

Selle stsenaariumi idee koosnes pahteldamisetapi elimineerimises tootmisprotsessist. Pahteldamise eesmärk on katta lahtised poorid terratso pinnal, mis tekivad terratso detailide vibreerimisest. Vibreerimise ajal tõuseb betoonisegus olev õhk üles ning jätab betooni pinnale lahtised poorid. Selle etapi elimineerimiseks püstitati hüpotees: kui lihvida maha terratso detaili nähtavalt külgedelt paksem betoonikiht, on lahtiseid poore võimalik vältida. Selle ettepaneku kontrollimiseks tehti proovilihvimised, mille käigus selgitati välja vajaliku lihvimise sügavus ning täiendav ajakulu. Katsetus toimus abrasiivlihvimiskonveieril. Katsetuse tulemusi on kirjeldatud alapeatükis 3.4.2.

Samuti tuvastati, et abrasiivlihvimiskonveieri igapäevane hooldus toimub hommikuti, mille tõttu tekib ajaline viivitus terratso tootmises. Selles stsenaariumis viiakse igapäevased hooldused tööpäeva lõppu, mille eesmärk on likvideerida viivitus tööde alustamisel. Kõik selles stsenaariumis tehtud muudatused ja ettepanekud kandusid üle stsenaariumisse 2 ja 3 ning järgnevad stsenaariumid tekivad tulenevalt tuvastatud puudustest.

Stsenaarium 2.

Olemasolevate ettevõtte ressursside hindamise käigus selgitati välja, et ettevõtte omanduses on ka teine abrasiivlihvimiskonveier, kuid praegu ei ole see kasutuses ning asub laos. Nimetatud seadme kasutamine lõpetati ning tootmisjuhi põhjendus sellele seisnes selles, et seadmele ei ole võimalik pidevalt tööd tagada. Valmidus selle seadme paigalduseks on olemas. Lisaks täiendava abrasiivlihvimiskonveieri lisamisele elimineerib see stsenaarium analoogselt stsenaariumile 1 pahteldamisetapi. Katsetuse käigus on vajalik selgitada välja, kas täiendava abrasiivlihvimiskonveieri paigaldus tekitaks pudelikaela järgnevas positsioonis või mitte.

Stsenaarium 3

Analoogselt stsenaariumile 1 ja 2 on selles stsenaariumis elimineeritud pahteldamisetapp. Tootmisetapis number 3 olev seade (Kasins) on praegu kasutuses ainult detailide poleerimiseks, kuid tegelikkuses võimaldab selle funktsionaalsus ka detailide kalibreerimist (abrasiivlihvimist). See muudatus ei vaja täiendavat

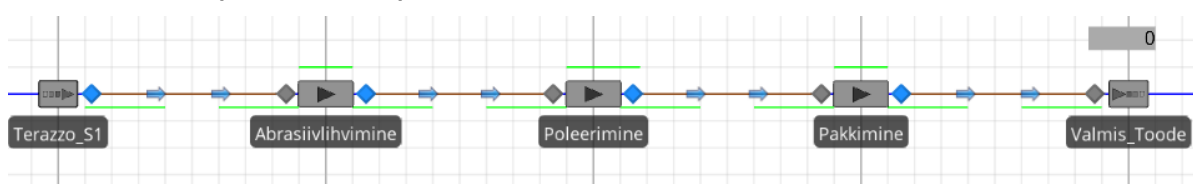
katsetamist, sest seadet on juba eelnevalt proovitud kasutada abrasiivlihvimiseks. Kui teostada kahte töötappi ühel seadmeh, suureneb läbilaskeaeg, mille tõttu tekib pudelikael. Pudelikaela elimineerimiseks lisatakse samasugune seade, mis praegu ettevõttes puudub, kuid lisainvesteeringute abil oleks võimalik seda osta.

Olemasolev terratso tootmistehnoloogia näeb ette detailide käsitsi faasimist käsitööriistade abil. Vaatamata sellele on ettevõtte soetanud ka faasimiskonveieri (Terzago), mida kasutatakse enamjaolt terratso plaatide faasimiseks ning faasimisprotsess toimub selle seadme puhul kiiremini. Sellel seadmeh on võimalik teostada ka terratso monoliitdetailide faasimist, kuid tuleb arvestada täiendava elektri- ja veekuluga. Selles stsenaariumis kasutatav läbilaskeaeg faasimiskonveierile Terzago lähtus töötajate kogemusest seadmeha töötamisel.

3.3.2 Terratso tootmisstsenaariumite modelleerimine

Terratso tootmiseks pakutakse välja kolm stsenaariumi, mille katsetamine toimus digitaalse kaksiku abil. Järgnevalt tutvustatakse stsenaariumite modelleerimise protsessi.

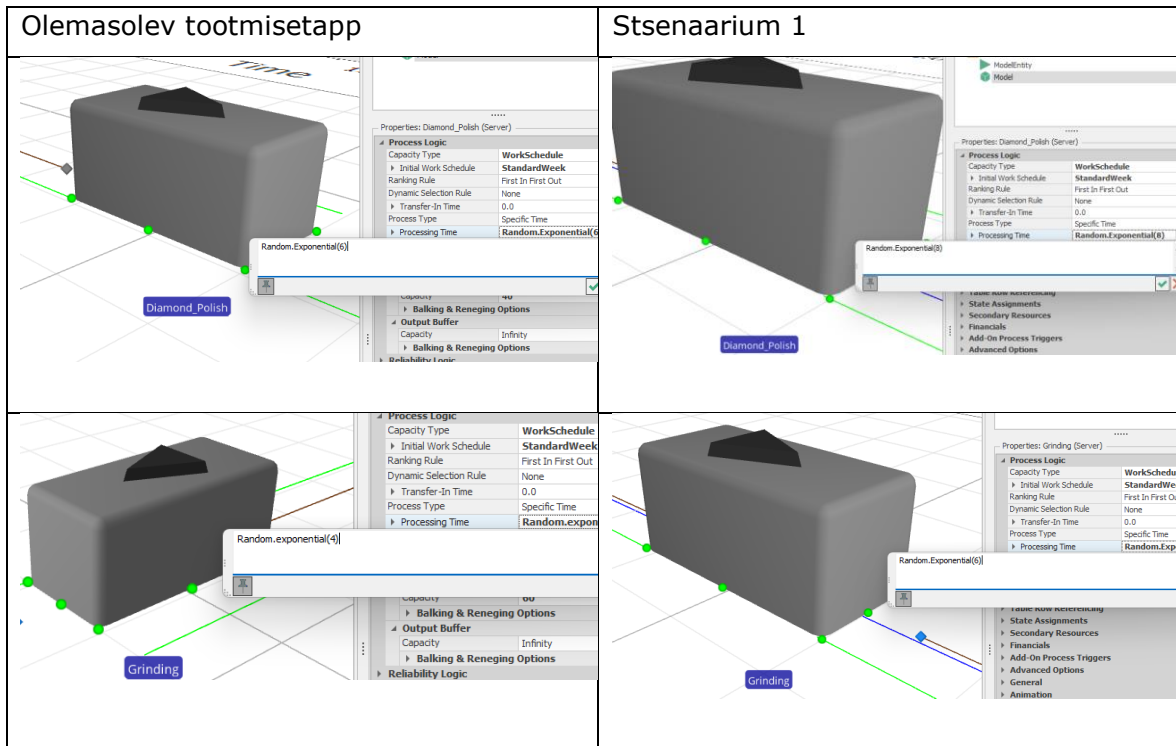
Stsenaarium 1 (vt Joonis 17)



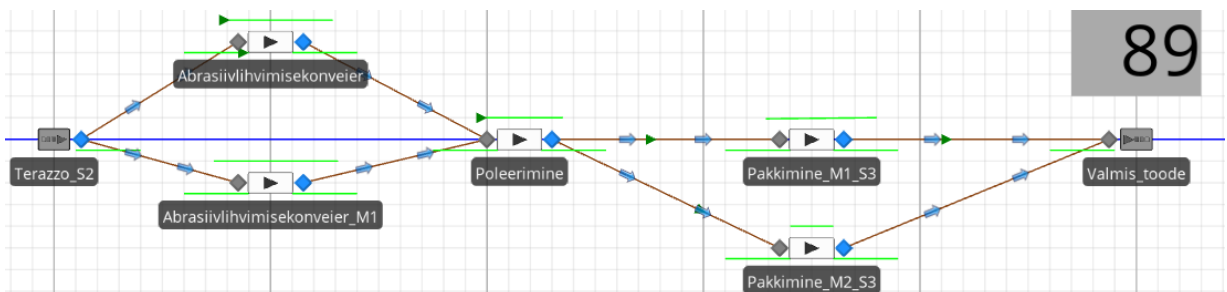
Joonis 17. Tootmisstsenaarium 1 – mudel

Pahteldamise elimineerimine tekitab suurema läbilaskeaja abrasiivlihvimises (Diamond_Polish) ning pakkimise/faasimise (Grinding) etapis. Selles olukorras on nende positsioonide läbilaskeajad 6 ja 4 minutit, aga stsenaarium 1-s on nendeks aegadeks 8 ja 6 minutit. Tabel 12 on näidatud läbilaskeajad olemasolevas olukorras ja stsenaarium 1-s. Samuti sai muudetud abrasiivlihvimiskonveieri igapäevase hoolduse aega - see viiakse tööpäeva algusest tööpäeva lõppu.

Tabel 12. Olemasolevad läbilaskeajad positsioonides ja simuleeritavad stsenaarium 1-s.

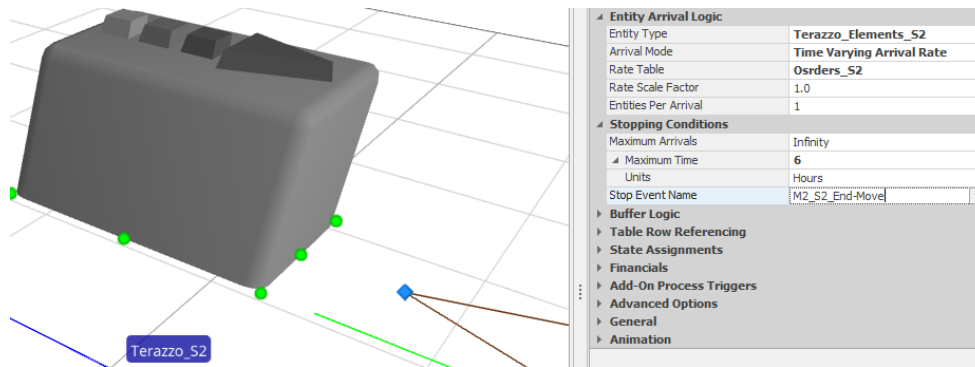


Stsenaarium 2 (vt Joonis 18)

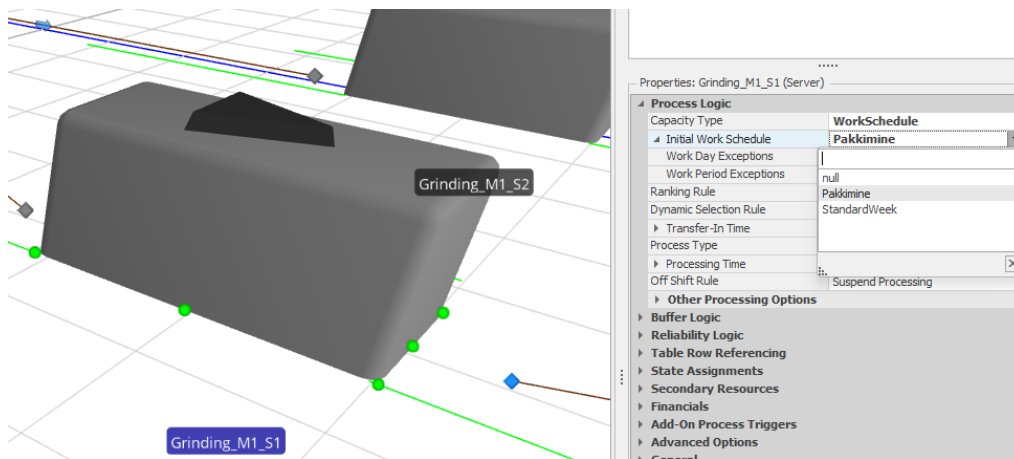


Joonis 18. Stsenaarium 2 – simuleerimismudel

Selles stsenaariumis lisati täiendav abrasiivlihvimiskonveier, mis saab sellise koormuse, et selle etapi töö lõpeb kell 13.00. Selle positsiooni töötaja suundub abistama pakkimisetappi alates kell 13.00, kuni tööpäeva lõpuni. Selle muudatuse simuleerimiseks viiakse sisse vastavad parameetrid. Täiendavasse abrasiivlihvimiskonveierisse saadetakse detaile ainult kuueks töötunniks (vt Joonis 19) ning pakkimisetapis alustatakse töödega kell 13.00, mis on määratud etapi töögraafikuga (vt Joonis 20).

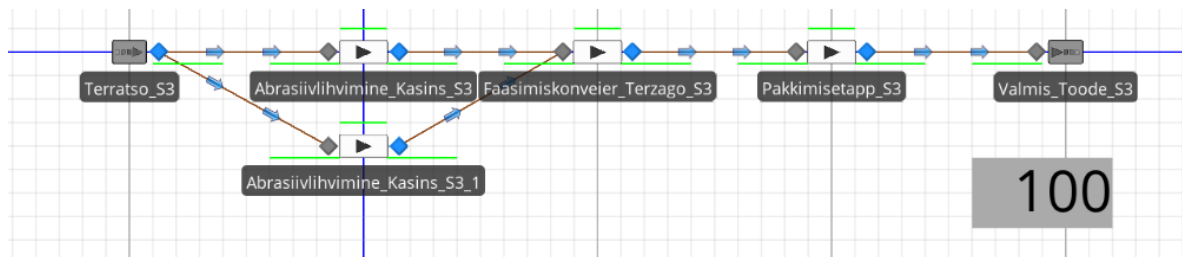


Joonis 19. Parameeter, mis koormab abrasiivlihvimist ainult 6 tunniks



Joonis 20. Teine inimene lisandub pakkimisetappi kell 13.00

Stsenaarium 3 (vt Joonis 21)



Joonis 21. Stsenaarium 3 – simuleerimismudel

Seda stsenaariumi kirjeldati alapeatükis 3.3.1 ning seadmete simulatsiooni põhimõtted jäid samaks kui stsenaariumis 1 ja 2.

3.4 Testimine ja hindamine

Tuginedes juhtumiuuringu tulemustele, ei tekita raudbetoonist trepimarsside tootmisprotsess ja tehnoloogia liigseid raiskamisi. Iga tootmisprotsess vajab pidevalt arendamist ja täiendamist ning sellest lähtuvalt arutatakse järgnevalt vajalike samme protsessi tõhususe suurendamiseks. Käesoleva lõputöö raames koostati digitaalne

kaksik ka raudbetoonist trepimarsside tootmisest, kuid tulenevalt sellest, et see tootmisprotsess ei vaja enda struktuuri muutmist, testitakse tõhusust suurendavaid stsenaariume analüütiliselt, mitte digitaalse kaksiku abil.

Rohkem raiskamisi tekitab terratso elementide tootmine ning põhjus seisneb pudelikaelte tekkimises erinevatel tootmispositsioonidel ja liigeses transportimises. Tootmisprotsessi tõhususe suurendamiseks pakutakse välja kolm erinevat stsenaariumi, mida testitakse digitaalse kaksiku abil. Lähtuvalt testide tulemustest hinnatakse stsenaariumi sobimist.

3.4.1 Raudbetoonist trepimarsside tootmine

Armeerimine

Tabel 13 (vt Lisa 4) on võrreldud, kas painutatud armatuurelemendi valmistamise maksumus on soodsam iseseisval valmistamisel või on soodsam tellida painutatud armatuurelement tehases? Võrdlus teostati lähtuvalt painutatud elementide vajadusest üheks tööpäevaks, mille jooksul valmistatakse kaks trepielementi. Omahind ehk iseseisva valmistamise maksumus sisaldab armatuuri hinda ning töötaja tunnitasu elemendi valmistamiseks. Ajakulu iga armatuuri positsiooni painutamiseks ja lõikamiseks sai arvestatud vastavalt töötajate hinnangule. Töötajatelt küsiti positsiooni valmistamise aega ning lähtuvalt töötajate arvamusest arvutati välja omahinnad. Tuginedes Tabel 13 kajastatud tulemustele on näha, et ettevõttel on odavam valmistada painutatud elemente iseseisvalt kui tellida valmistoode. Arvestades tootmisjuhi arvamust, ei ole hinnavahe suur, kuid valmis armatuurelementide kasutamine võib tekitada täiendavaid tegevusi. Valmis armatuurelementide tellimine ei välista täiendavat painutamist ja armatuuri lõikamist kohapeal. Tulenevalt sellest, et tegelik painutatud elemendi kuju võib erineda projekti spetsifikatsioonist, võib tekkida täiendava modifitseerimise vajadus. Töötajate arvates ei ole alati võimalik kasutada identsete gabariitidega range või muid painutatud positsioone ning vajalik gabariit võib teiseneda. Kui töötaja valmistab ette armatuuri positsioone, siis tuleb teada, millises kohas on vajalik suurendada või vähendada painutusnurka või näiteks teha pikem ülekate. Valmiselemendi muutmiseks on vajalik alguses element tagasi sirgeks painutada ning painutamine uuesti teha, mis kokkuvõttes võtab rohkem aega kui iseseisev valmistamine. Valmis armatuurelementide kasutamise stsenaarium sai välistatud ning stsenaarium ei leidnud võimalust rakendamiseks.

Materjalide jäägid

Järgnevalt tuuakse välja vaatlusuuringu käigus märgatud positiivsed ja negatiivsed tegurid jääkide käitlemises.

AS Alistron teostab materjalijääkide sorteerimist, tänu millele on jäätmete utiliseerimine soodsam. Pikemad armatuurvarraste jäägid leiavad rakendamist terratso elementide armeerimises ning analoogselt taaskasutatakse vineeri- ja prussijääke terratso tootmises.

Betoonvundamendiploki proovi valmistamine õnnestus (vt Lisa 10, Pilt 22) ning järgnevalt on betoonijääkide vähendamiseks vajalik soetada vundamendiploki valmis raketis. Samuti on vajalik tegeleda turundusega, et potentsiaalne tellija oleks teadlik vundamendiplokkide soetamise võimalusest.

3.4.2 Terratso tootmisstsenaariumite katsetamine

Stsenaariumite katsetamisel võeti aluseks eelnevalt koostatud digitaalne kaksik ning iga katse simuleerimise tulemused ning antakse hinnang stsenaariumi sobivusele või mittesobivusele. Stsenaariume kirjeldavad graafikud asuvad lõputöö lisamaterjalides.

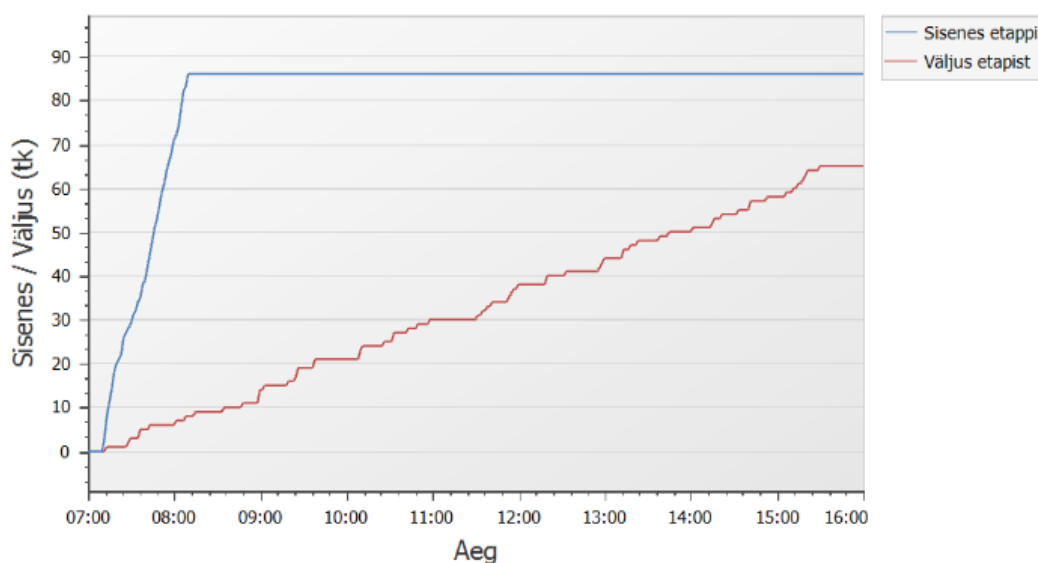
Stsenaarium 1 ja pahteldamise elimineerimise katse (vt 3.3.1)

Lahtiste pooride vältimiseks tehti katsetus, mille käigus lihviti terratso pinnalt maha 2,2 cm betooni (tavaliselt 1,5 cm). Katse õnnestus ning betooni pind sisaldas vähem lahtiseid poore. Tulenevalt sellest, et betooni lihviti kauem ning madalamate abrasiividega, tekkis betoonipinnale rohkem tükkeid, mille tõttu vajab detail 1 minut rohkem aega tükete parandamiseks. Katse teostamise ajal fikseeriti abrasiivlihvimiskonveieri läbilaskeajaks 8 minutit. Tulenevalt suurema kihi mahalihvimisest lisandub aeg poleerimisele ja pakkimisele - pluss 1 minut. Pahteldamisetapi elimineerimise korral vähendab ettevõtte materjalijääkide kogust, mis tulenevad pahteldamisprotsessist, tekib täiendav tootmisruum ning vabaneb täiendav töötaja, mis on eriti oluline tänapäeval tööjõupuudust arvestades.

Pahteldamisetapi elimineerimine tootmisprotsessist tõi kaasa veelgi suurema pudelikaela tekkimise abrasiivlihvimise etapis (vt Joonis 22) - põhjuseks suurem läbilaskeage selles positsioonis. Tulenevalt tootmisjärjekorra suurenemisest suurenes detailide transportimise aeg, mis tähendab rohkem tööde seisakuid. Simulatsiooni

tulemuseks saadi päevatoodanguks 62 detaili (praeguse olukorras toodetakse päevas 73 detaili ning digitaalses kaksikus 69). Seda stsenaariumi saab pidada läbikukkunuks.

Abrasiivlihvimine



Joonis 22. Abrasiivlihvimiskonveieri läbilaskevõimekus

Vaatamata sellele avaldas positiivset mõju ka seadme igapäevase hooldusaja muutmine. Tulenevalt sellest, et abrasiivlihvimiskonveieri hooldust teostatakse tööpäeva lõpus, alustasid järgnevad positsioonid töödega varem, tänu millele vähenes tööde seisakute arv (vt Lisa 6).

Stsenaarium 2 (vt 3.3.1)

Selle stsenaariumi tootlikkus on 89 detaili päevas, mis on 22% võrra rohkem kui olemasolev olukord. Stsenaariumi teostamine ei vaja täiendavaid rahalisi investeeringuid seadme ostmiseks, kuna teine seade on juba olemas. Lisa on olemas valmidus seadme paigalduseks ning tööd on võimalik teostada ettevõtte kollektiivpuhkuse ajal 17.07.2023 - 31.07.2023. Kui teostada seadme paigaldus ja seadistamine kollektiivpuhkuse ajal, saab vältida tööde seisakuid seadme transportimise ajal.

Tootmisjärjekordade tekkimine on oluliselt vähenenud, mis on näha seadmete tootmisgraafikutelt (vt Lisa 7)

Stsenaarium 3 (vt 3.3.1)

Selle stsenaariumi rakendamine eeldab ettevõtte täiendavaid investeeringuid poleerimiseseadme (Kasins) soetamiseks ning olemasolevate abrasiivlihvimiskonveierite

demonteerimist. See stsenaarium osutus kõige efektiivsemaks ning katsetamise käigus ei tuvastatud tööpäeva jooksul tööde seisakuid, mis tuleneksid tootmisjärjekordade tekkimisest. Päevatoodanguks selle stsenaariumi rakendamisel kujunes 100 detaili. Kõik töötlemise protsessid toimuvad automatiseeritult ning käsitöö etappidest jäi alles ainult pakkimine. Tulenevalt käsitöö etappide elimineerimisest väheneb praaktoodangu arv ning inimteguritest tulenev varieerumine. Tootmisetappide graafikutel (vt Lisa 8) on täheldatav JIT (just in time) tootmine, mis on esimeseks sammuks konveiertootmise põhimõttele.

3.5 Lühikokkuvõte ja arutelu

Raudbetoontreppide valmistamisprotsess on üles ehitatud kooskõlas timmitud tootmise tööriistadega (vt 1.2.4). Protsessis toimuvad kõik etapid vastavalt vajadusele ning ei tekitata varusid. Ettevõtte on investeerinud ressursse, et kõikide tegevuste läbiviimine oleks võimalikult kiire, tänu millele hoitakse kulusid kokku. Sellisteks investeeringuteks olid näiteks vibrostendide soetamine, kõikide positsioonide varustamine painutus- ja löikepinkidega jne.

Suurem osa trepimarsside tootmisest toimub ühes positsioonis, tänu millele on minimeeritud transportimise vajadus etappide vahel. Positiivseks saab lugeda ka tootmisprotsessi pidevat arenemist, mis väljendub pidevas tootmisprotsesside tõhustamises. Ettevõtte täiendab tootmist, investeerides raha tööriistadesse, valmis raketise vormidesse ja vibrostendidesse. Trepimarsside tootmispositsioonid on hästi organiseeritud ning korrashoiu tase on kõrge, tänu millele on tootmine ohutu; pidev korrashoid aitab kaasa tööde planeerimisele. Trepimarsside tootmisprotsess peab jätkama arenemist ning järgnevateks arendussammudeks on plaanitud:

1. Vundamendiplokkide valmistamine betoonijääkidest
2. Soodsamate kinnitustarvikute kasutamine raketise ehitamisel ning kinnitustarvikute korduvkasutus.

Terratso elementide tootmisprotsess vajab globaalseid muudatusi. Suur hulk lisategevusi, mis tulenevad tootmisetappide tasakaalu puudumisest tootmisvõimekustega seoses, tekitab ettevõttele endale lisategevusi, milleks on pidev transportimine, laoplatside korrashoid, tõstukite hooldamine ja tööde seisakud.

Olukorra parandamiseks sai koostatud 3 stsenaariumi, mis suurendavad tootmise tõhusust. Pahteldamise elimineerimine toob kaasa materjalide säästlikuma kasutuse, kuid samas kasvatab läbilaskeaega esimeses töötlemise etapis. Sellel põhjusel täiendati Stsenaarium 1 lisanduva abrasiivlihvimiskonveieriga, mis tasakaalustas tootmisvõimekusi. Vaatamata sellele ei piisanud sellest tootmisvõimekusest, et täielikult vältida tootmisjärjekordade tekkimist. Stsenaarium 3 elluviimine vajab ligikaudu 170

000 eurost investeringut, mis on alla 6% ettevõtte aastakäibest ja ettevõtte juhatuse aktsepteeritav summa, kuid eeldab pidevat tellimuste olemasolu. Pidevale tellimuste olemasolule aitab kaasa konkurentsivõimeline hind, mille saavutamiseks on vajalik teostada Stsenaarium 3-s kirjeldatud tegevused. Selles stsenaariumis on ühendatud nii voo- kui ka ressursitõhusus ning läbiviidud simulatsioonile tuginedes on selle stsenaariumi rakendamine otstarbekas.

Käesoleval töö on palju edasiarendamise võimalusi AS Alistroni kontekstis. Töö käsitleb ainult sirgete trepimarsside ja sirgete terratso detailide tootmisprotsessi, kuid reaalse toodete valik on oluliselt suurem. Selleks, et võtta digitaalne kaksik kasutusse kogu tehase tootmise jälgimiseks, on vajalik teiste tootmisetappide analoogne uurimine ja analüüsimine ning täiendavad investeringud tehase digitaliseerimiseks.

Timmitud tootmise kontseptsiooni säilitamiseks on vajalik jätkata digitaalse kaksiku arendamist AS Alistronis. Vajalik on koostada digitaalne kaksik kõikidest tootmisprotsessidest, tänu millele tekkiks ettevõtte põhine tervikmudel. Kogu tootmisprotsessi digitaalse kaksiku tervikmudel võimaldaks analoogselt lennukitootjale Airbus, kes on digikaksiku kasutusele võtnud, jälgida tootmisprotsessi reaajas, ning koheselt tuvastada raiskamisi protsessis [37]. Tervikumudeli koostamiseks on samuti vajalikud lisainvesteringud.

Investeeringud seisneksid eelkõige andurite ja laserite paigalduses tootmistsehhides, mis annaks digitaalsele kaksikule võimaluse koguda iseseisvalt andmeid töötajate liikumistest ja töö etappide edenemisest. Simio-programmi potentsiaal lubab analüüsida ka tootmise finantsnäitajaid, nagu inimtundide kulu, kasutatud materjalide maksumus ja ressursside ülalpidamise kulud. Nende näitajate seadistamine annab ettevõttele võimaluse kasutada digitaalset kaksikut hinnapakumiste koostamiseks ning tellimuste kasumimarginaali täpsemaks kalkuleerimiseks.

Sammud, mida läbiti käesolevas magistritöös, on ainult algus digitaalse kaksiku sisseviimises tootmisprotsessi. Edaspidi on kavas koostada täielik tehase mudel, kus sisalduksid kõikvõimalikud tootmist kirjeldavad andmed. Digitaalne kaksik tootmises võimaldab tootmisprotsessi hinna langetamist, tänu millele saavutatakse suur konkurentsieelis võrreldes teiste raudbetoonelementide tootjatega.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgi, milleks oli tuvastada AS Alistroni olemasoleva tootmisprotsessi raiskamised ning koostada kulusäästlikumad tootmisstsenaariumid, täitmiseks kasutati digitaalset kaksikut stsenaariumite hindamiseks. Selleks püstitati uurimistööle neli ülesannet ja uurimistöö küsimust. Põhilisteks väljakutseks raudbetoonelementide valmistamisel on tänapäeva turuolukorras inimtööjõu puudus ja kallinemine, mistõttu peab tootmisprotsess olema maksimaalselt kulusäästlik ja timmitud. Sellega välditakse täiendavaid kulusid, mis tulenevad tööjõu kasutamise raiskamistest ning välditakse täiendavat tööjõuvajadust.

Tootmisprotsessi timmimiseks ja parandamiseks on tänapäeval üks efektiivsemaid lahendusi tootmisprotsesside digitaliseerimine ja digitaalsete kaksikute kasutamine. Digitaalse kaksiku koostamine annab ettevõttele võimaluse ressursse efektiivselt plaanida ja kasutada. Tänapäeva ehitusturg on ka väga muutuv vajaduste poolest ning digitaalse kaksiku olemasolu annab võimaluse tootmisprotsessi säästlikult ja kiiresti viia vastavusse kliendi vajadustega ilma täiendavate raiskamiste tekkimiseta.

Lõputöö raames viidi läbi raiskamiste tuvastamine ja analüüs raudbetoonelementide ja terratso tootmisettevõttes AS Alistron, mille käigus tuvastati globaalne raiskamine terratso tootmisprotsessis. Raiskamine seisnes tootmisjärjekordade tekkimises tootmisetappidel, mis põhjustasid täiendavaid väärtust mitte lisavaid tegevusi.. Sellisteks tegevusteks olid transportimised ladustusalade vahel. Olukorra parandamiseks likvideeritakse pahteldamisetap tootmisprotsessist. Stsenaariumite simulatsiooni käigus osutus kõige efektiivsemaks Stsenaarium 3, mis täielikult vältis tootmisjärjekordade ja raiskamiste tekkimist. Selle stsenaariumi kasutamine tõstab terratso tootmisprotsessi tootlikust vähemalt 45 % võrra. Stsenaariumi elluviimise investeeringuteks kulub ainult 6% ettevõtte aastakäibest. Ettevõtte juhatus kiitis selle stsenaariumi heaks ning stsenaariumi elluviimist alustatakse 2023. a. suvel.

Raudbetoonist trepimarsside valmistamisprotsessis tuvastati ainult lokaalsed raiskamised, mis väljendusid betoonisegu jääkide ebaefektiivses käitlemises. Selle raiskamise elimineerimiseks katsetati betoonisegu jääkide kasutamist vundamendiplokkide või vastukaalude valmistamiseks. Selleks võeti kasutusele valmisraketise moodul, kuhu valati üleliigne betoonisegu, mis jäi üle trepimarsside valmistamisest. Katsetus õnnestus ning lahendus võeti kasutusele betoonisegu jääkide vähendamiseks, mille tõttu laienes AS Alistroni toodete valik.

SUMMARY

The aim of the research was to identify the waste in the existing production process of AS Alistron and develop lean manufacturing scenarios using digital twins for scenario evaluation. The research had four objectives and research questions. One of the main challenges in the production of reinforced concrete elements in today's market is the shortage and increasing cost of labor, requiring the production process to be highly cost-efficient and optimized. This avoids additional costs resulting from labor waste and eliminates the need for additional workforce.

One of the most effective solutions for optimizing and improving the production process is the digitization of manufacturing processes and the use of digital twins. Creating a digital twin allows the company to efficiently plan and utilize resources. The construction market today also has rapidly changing needs, and the presence of a digital twin allows the production process to be quickly aligned with customer requirements and needs, without additional wastes.

As part of the thesis, waste identification and analysis were conducted at AS Alistron, a manufacturer of reinforced concrete elements and terrazzo. The analysis revealed global waste in the terrazzo production process, which involved the occurrence of production queues at different stages, leading to non-value-adding activities such as transportation between storage areas. To improve the situation, the plastering stage was eliminated from the production process. During scenario simulation, Scenario 3 proved to be the most effective, completely avoiding production queues and wastes. Implementing this scenario increases the productivity of the terrazzo production process by at least 45%. The investment required for implementing the scenario is only 6% of the company's annual turnover. The company's board approved this scenario, and its implementation will start in the summer of 2023.

In the production process of precast concrete stair flights, only localized wastes was identified, which manifested as inefficient handling of residual concrete mix. To eliminate this waste, the utilization of excess concrete mix for manufacturing foundation blocks or counterweights was tested. A ready-made formwork module was used to pour the excess concrete mix left over from stair flight production. The experiment was successful, and the solution was adopted to reduce waste from concrete mix, expanding the product range of AS Alistron.

KASUTATUD KIRJANDUS

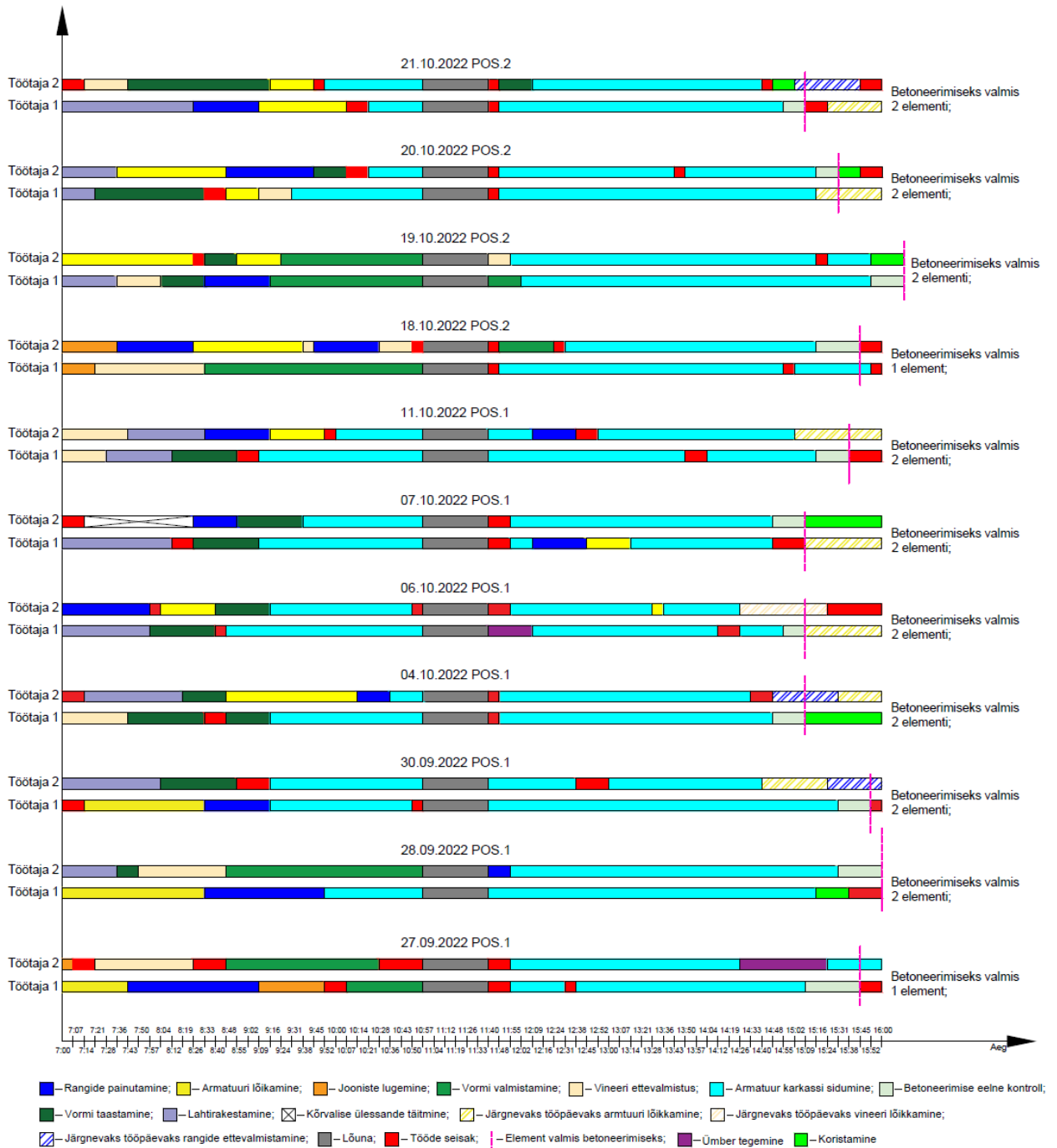
- [1] K. Will, „Manufacturing: Definition, Types, Examples, and Use as Indicator,” *Investopedia*, 2022.
- [2] O. e. dictionary, „manufacture,” Online etymology dictionary, 2020.
- [3] G. Polat, „Factors Affecting the Use of Precast Concrete Systems in the United States,” *Journal of Construction Engineering and Management*, 2008.
- [4] M. Pajuste, „EHITUSETTEVÕTTE STRATEEGIA KUJUNDAMINE MUUTUVAS VÄLISKESKKONNAS (AS MERKO EHITUS EESTI NÄITEL),” 2015.
- [5] S. Wang, J. Tang, Y. Zou ja Q. Zhou, „Research on production process optimization of precast concrete component factory based on value stream mapping,” *Emerald insight*, 2019.
- [6] J. Månsson, „An analysis of labor market attainment in Sweden among its post-war immigrants from Estonia, Latvia, Lithuania and Poland,” 2019.
- [7] K. Kallaste, „Unemployment Insurance Fund: Shortage of skilled workforce in Estonia,” *ERR*, 12 2021.
- [8] Н. Графова, С. Храпов, . М. Старичихин ja О. Латипов, „АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ,” *СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ*, pp. 117-118, 2016.
- [9] A. Greco, M. Caterino, F. Marcello ja S. Gerbino, „Digital Twin for Monitoring Ergonomics during Manufacturing Production,” *Applied sciences*, 2020.
- [10] K. Kuuskmäe, „Ukraina sõjast põhjustatud terasest ehitusmaterjalide tarneahelate katkemise mõju Eesti ehitussektorile,” may 2022.
- [11] M. Bacong, C. Ivy ja A. E. Hadge , „Effect of Employee Relation to Job Performance in Engineering, Construction and Manufacturing Company,” *Asia Pacific Journal of Education, Arts and Sciences*, 2017.
- [12] А. Дейнека, Управление персоналом, pp. 12-42.
- [13] L. Koskela, „An exploration towards a production theory and its application to construction,” pp. 42-43, 2000.
- [14] T. Rowse, „10 WAYS TO REDUCE MANUFACTURING COSTS,” *Rowse*, 18 May 2020.
- [15] A. Fercoq, S. Lamouri, V. Carbone, A. Lelièvre ja A. A. Lemieux, „Combining lean and green in manufacturing: a model of waste management,” 2013.

- [16] M. A. AL-Shboul, „An investigation of transportation logistics strategy on manufacturingsupply chain responsiveness in developing countries: the mediating role of delivery reliability and delivery speed,“ *ScienceDirect*, 2022.
- [17] D. T. J. D. R. James P. Womack, *The Machine That Changed the World*, 1990, p. 225.
- [18] N. M. j. P. Åhlström, *This is lean. Resolving the Efficiency Paradox*, Äripäev, 2016, p. 41.
- [19] D. T. J. D. R. James P. Womack, *The Machine That Changed the World*, 1990, pp. 8-225.
- [20] N. M. j. P. Åhlström, *This is lean. Resolving the Efficiency Paradox*, Äripäev, 2016, pp. 7-12.
- [21] N. M. j. P. Åhlström, *This is lean. Resolving the Efficiency Paradox*, Äripäev, 2016, pp. 14-17.
- [22] S. Gupta ja S. K. Jain, „A literature review of lean manufacturing,“ *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2013, 2013.
- [23] „eehitus.ee,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eehitus.ee/wp-content/uploads/2020/03/I-etapi-anal%C3%BC%C3%BCs-EhS.pdf>.
- [24] A. M. Sánchez ja M. P. Pérez , „Lean indicators and manufacturing strategies“ *.International Journal of Operations & Production Management*.
- [25] A. Д. В.Б. Чернов, «Совершенствование производственной системы на основе синтеза концепций «6 сигм + Бережливое производство» и «Теории ограничений систем»,» 2012. [В Интернете]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-proizvodstvennoy-sistemy-na-osnove-sinteza-kontseptsiy-6-sigm-berezhlivoe-proizvodstvo-i-teorii-ogranicheniy-sistem/viewer>.
- [26] M. Taneja ja A. Manchanda, „International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT),“ *Six Sigma an Approach to Improve*, 2013.
- [27] P. Puvanasvaran, H. Megat, T. S. Hong ja M. Mohd.Razali, „The roles of communication process for an effective lean manufacturing implementation,“ *Journal of Industrial Engineering and Managment*, 2013.
- [28] C. Standard ja D. Dale, „Lean thinking for Competitive Advantage“.
- [29] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes ja W. Sihn, „Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review,“ *ScienceDirect*, 2018.

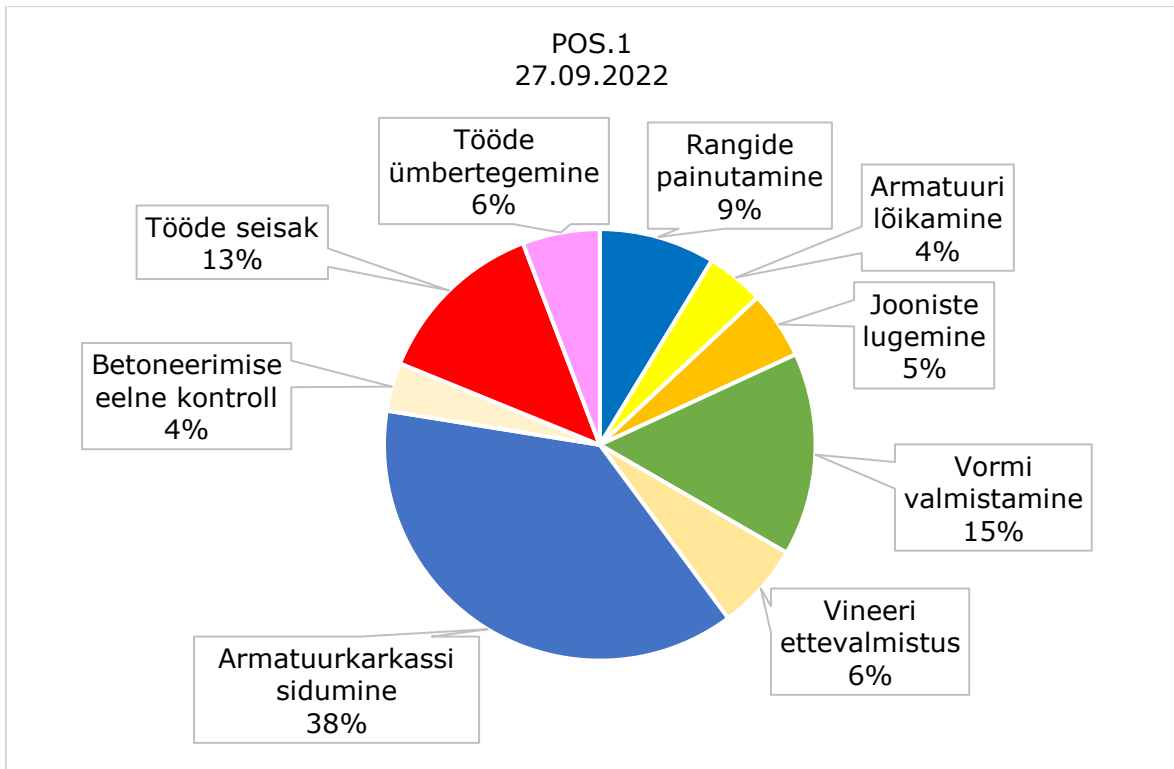
- [30] F. Biesinger, . D. Meik, . B. Kraß ja . M. Weyrich, „A digital twin for production planning based on cyber-physical systems:A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin,“ *ScienceDirect*, 2018.
- [31] Q. Q. A. F. TAO, „Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison,“ *IEEE access*, January 2017.
- [32] I. Onaji, D. Tiwari ja P. Soulatiantork, „Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies,“ *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2022.
- [33] R. Sacks, I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie ja M. Girolami, „Construction with digital twin information systems,“ *Data-Centric Engineering*.
- [34] C. Cimino, E. Negri ja L. Fumagalli, „Review of digital twin applications in manufacturing,“ *Computers in Industry*, June 2019.
- [35] Simio, „<https://www.simio.com>,“ [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.simio.com/about-simio/>.
- [36] N. Modig ja P. Ählstöm, See on LEAN, Äripöev, 2016, p. 153.
- [37] L. Barteveyan, „The Digital Twin in aircraft construction,“ *ETMM*, 19 August 2022.
- [38] L. S. Sterling, *The Art of Agent-Oriented Modeling*, London: The MIT Press, 2009.
- [39] N. Modig ja P. Ählström, %1 See on LEAN, Äripäev, 2016, pp. 160-170.
- [40] A. Alistron, „Alistron.ee,“ [Vörgumaterjal]. Available: <https://alistron.ee/>.
- [41] D. Fuoco, „Association for advancing automation,“ 22 06 2018. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.automate.org/case-studies/the-paradox-of-smart-manufacturing>.
- [42] „Leanway,“ [Vörgumaterjal]. Available: <https://leanway.ee/little-seadus-ja-valem/>.
- [43] B. Durakovic, R. Demir, K. Abat ja C. Emek, „Lean Manufacturing: Trends and Implementation Issues,“ *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, June 2018.

LISAD

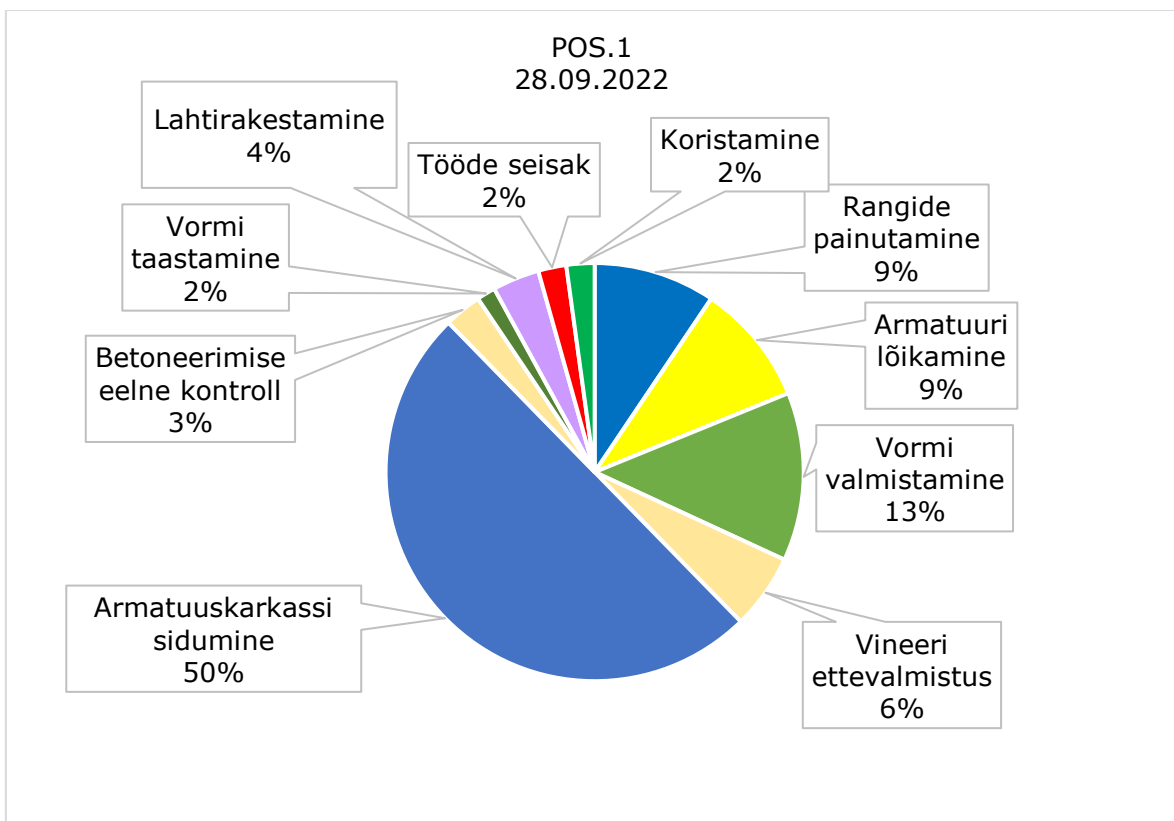
Lisa-1. Trepimarsside tootmise vaatlusuringu tulemused



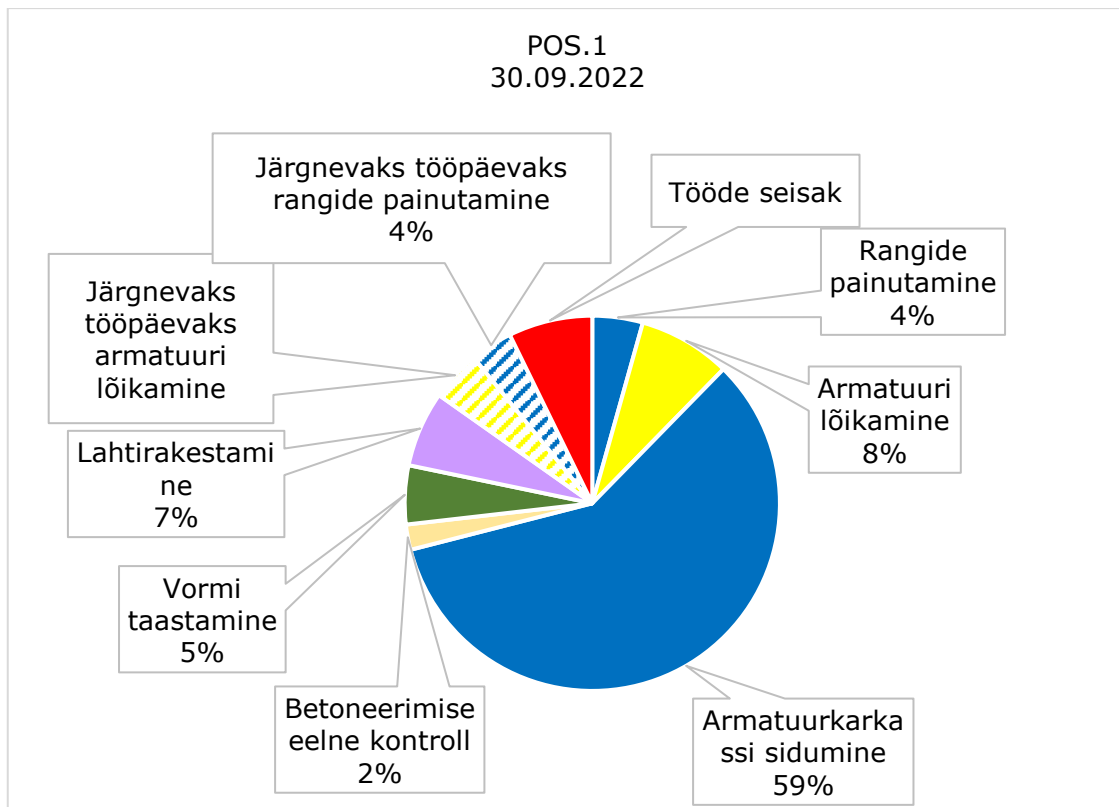
Joonis 23. Trepimarsside tootmistegevuste kestused



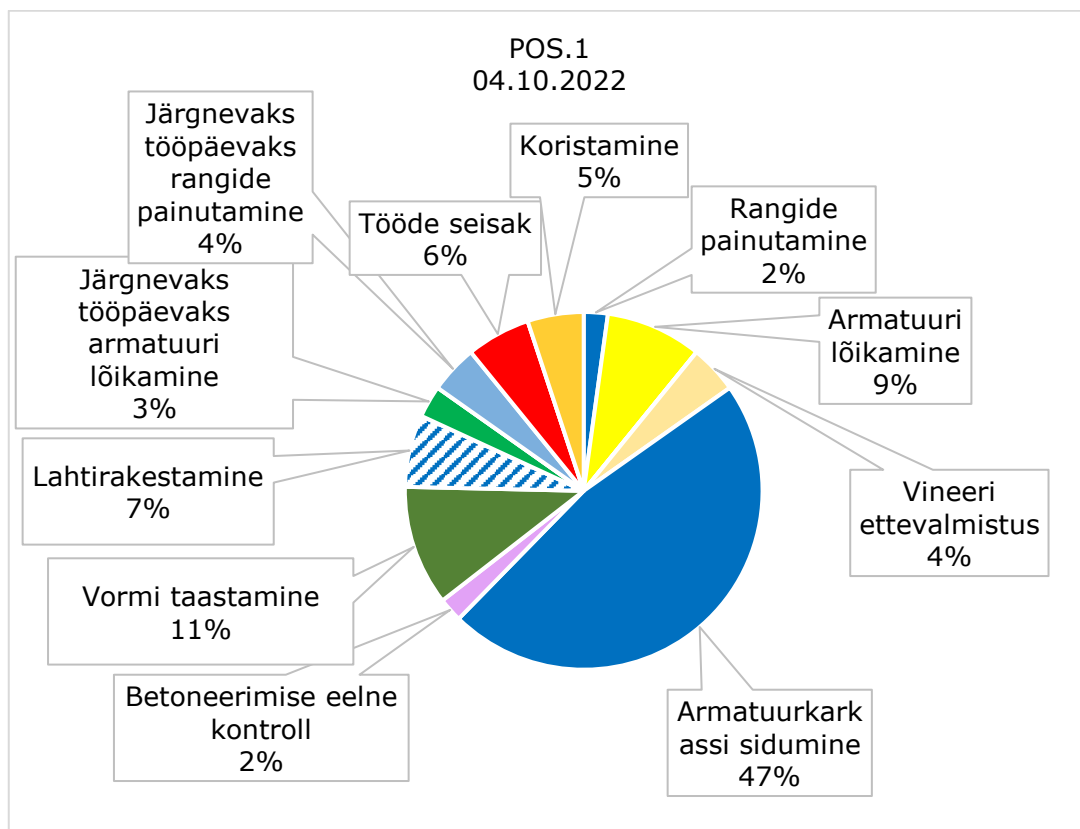
Joonis 24. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 27.09.22



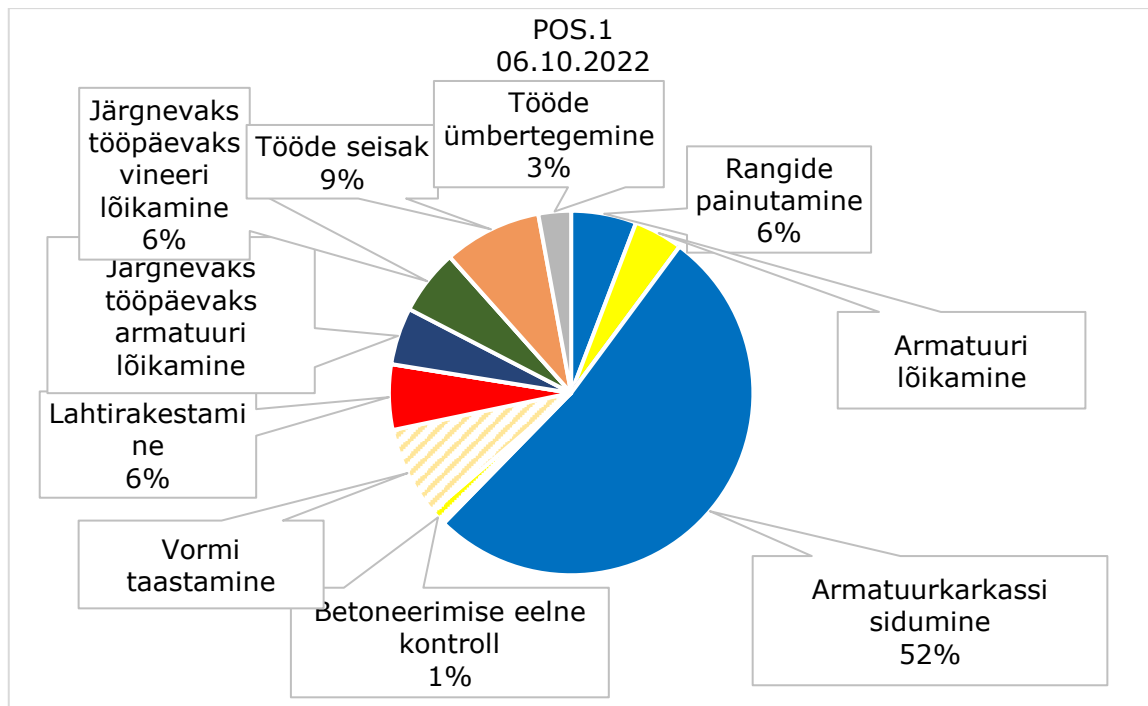
Joonis 25.POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 28.09.22



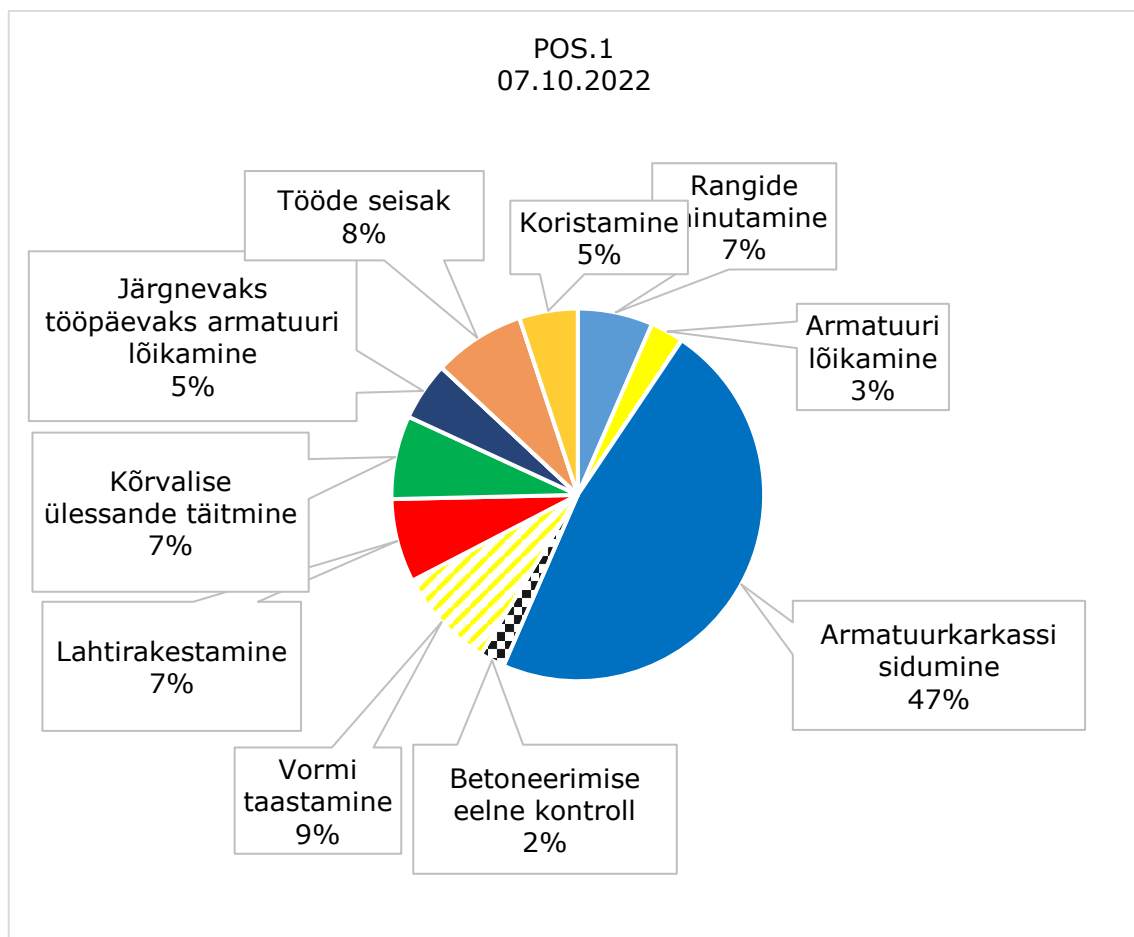
Joonis 26. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 30.09.22



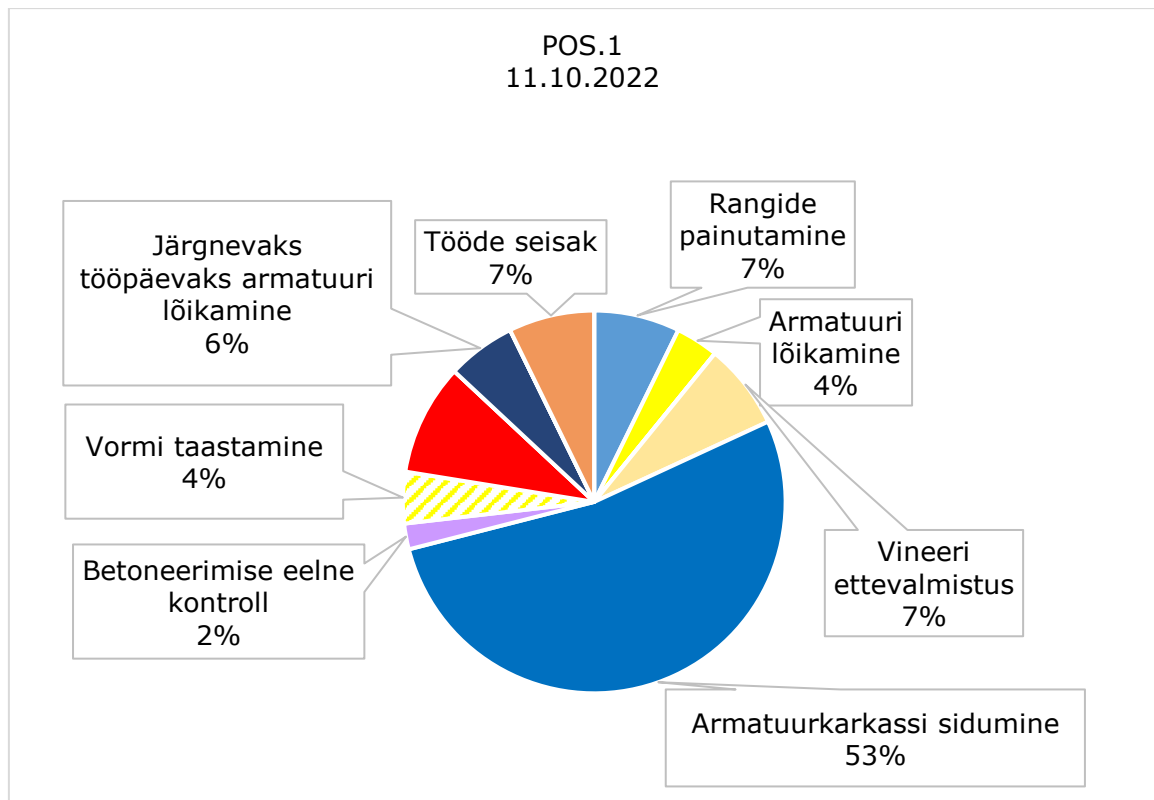
Joonis 27. POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 04.10.22



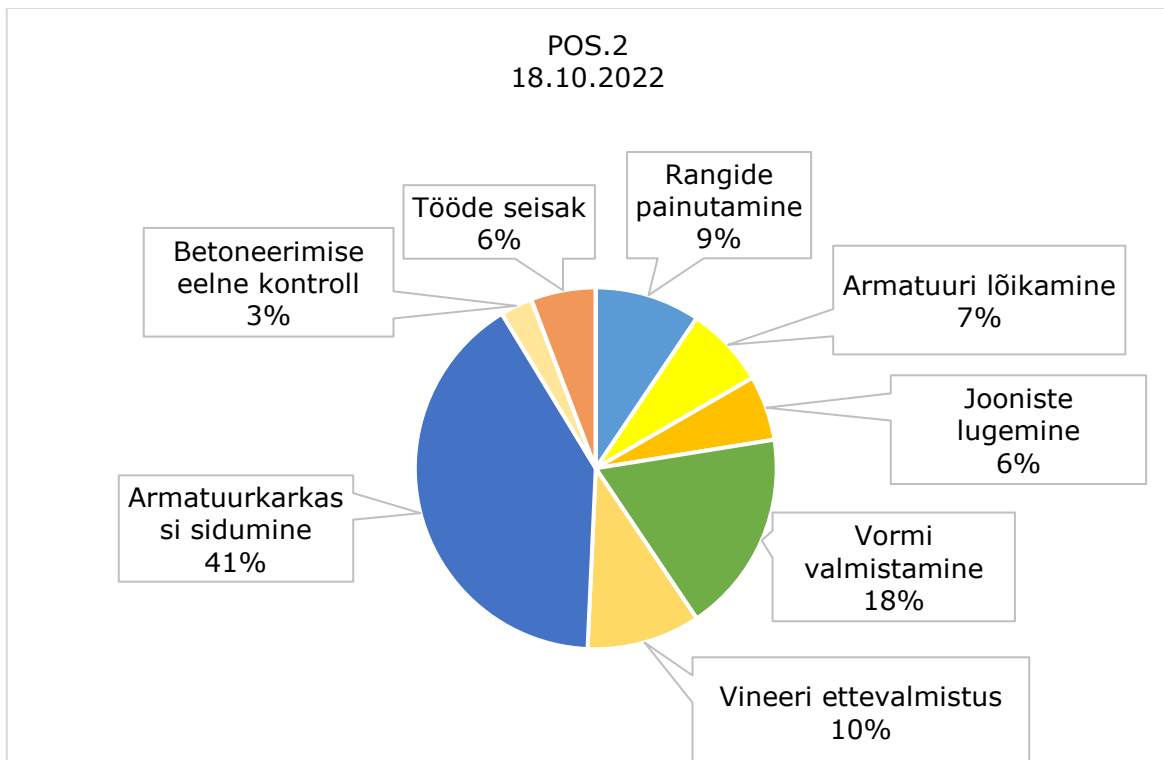
Joonis 28.POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 06.10.22



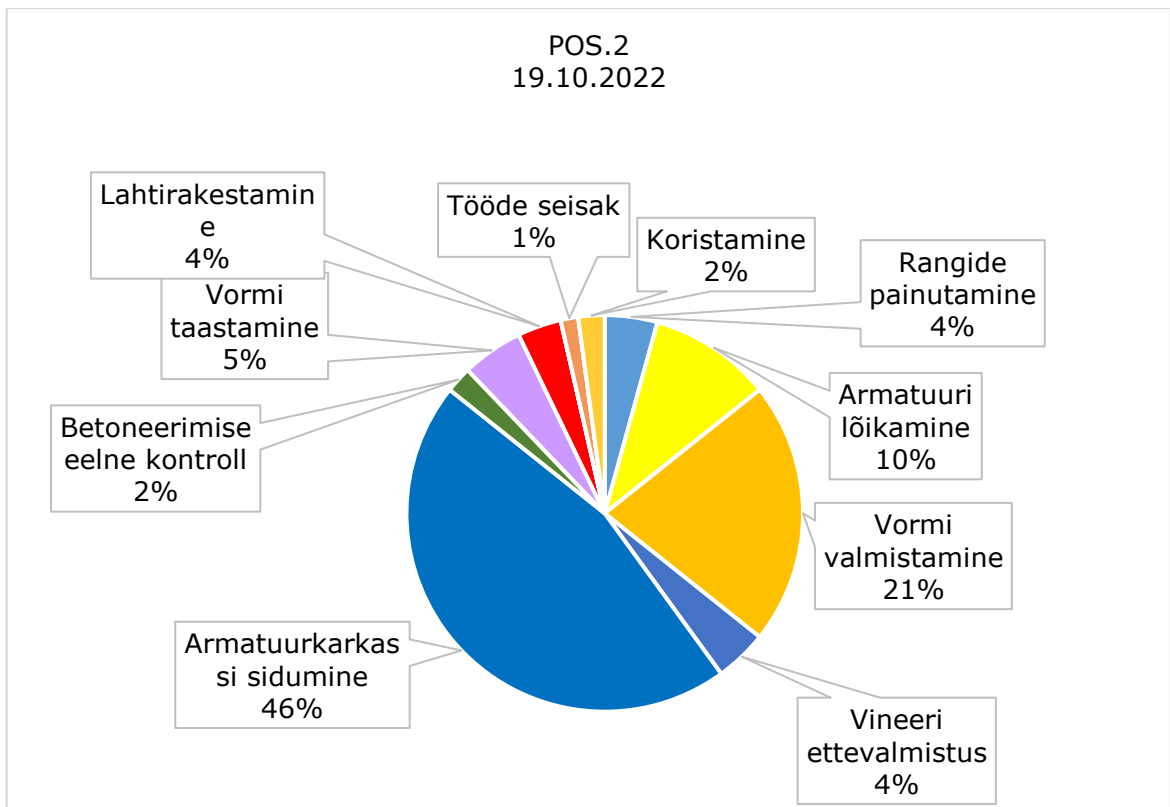
Joonis 29.POS1- Tegevuste ajaline hõivatus 07.10.22



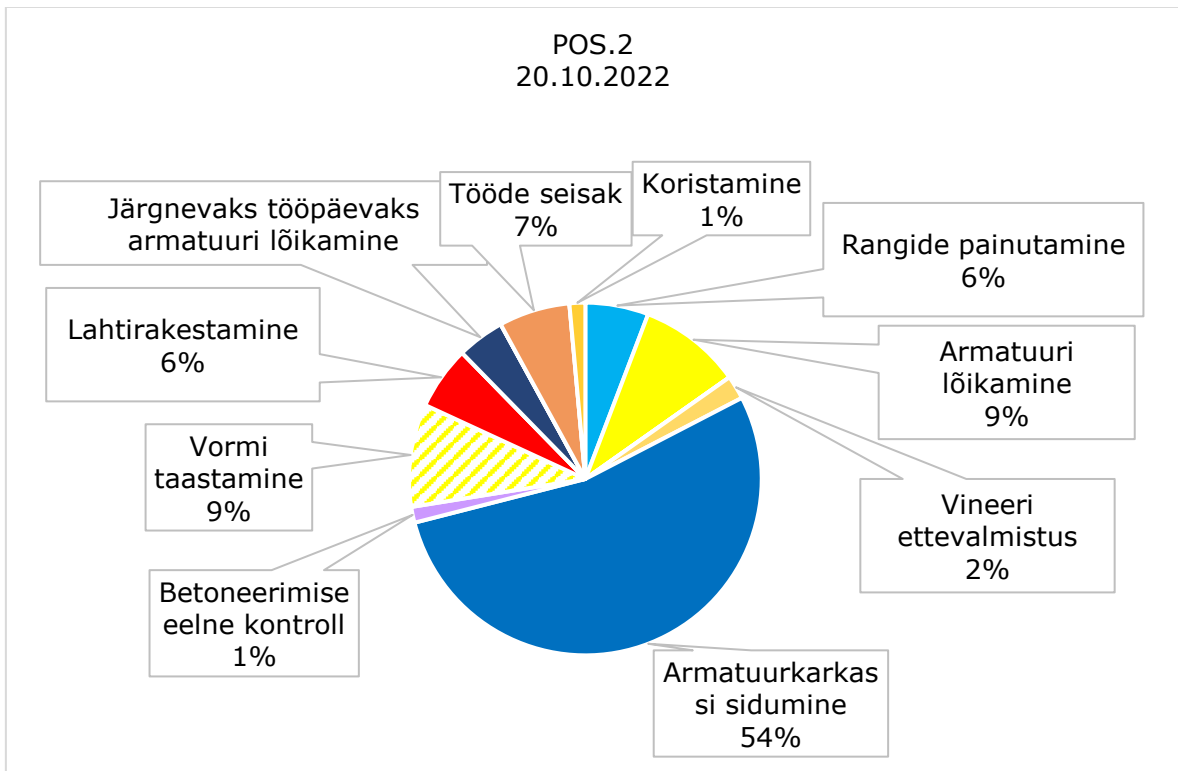
Joonis 30.POS.1- Tegevuste ajaline hõivatus 11.10.22



Joonis 31.POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 18.10.22

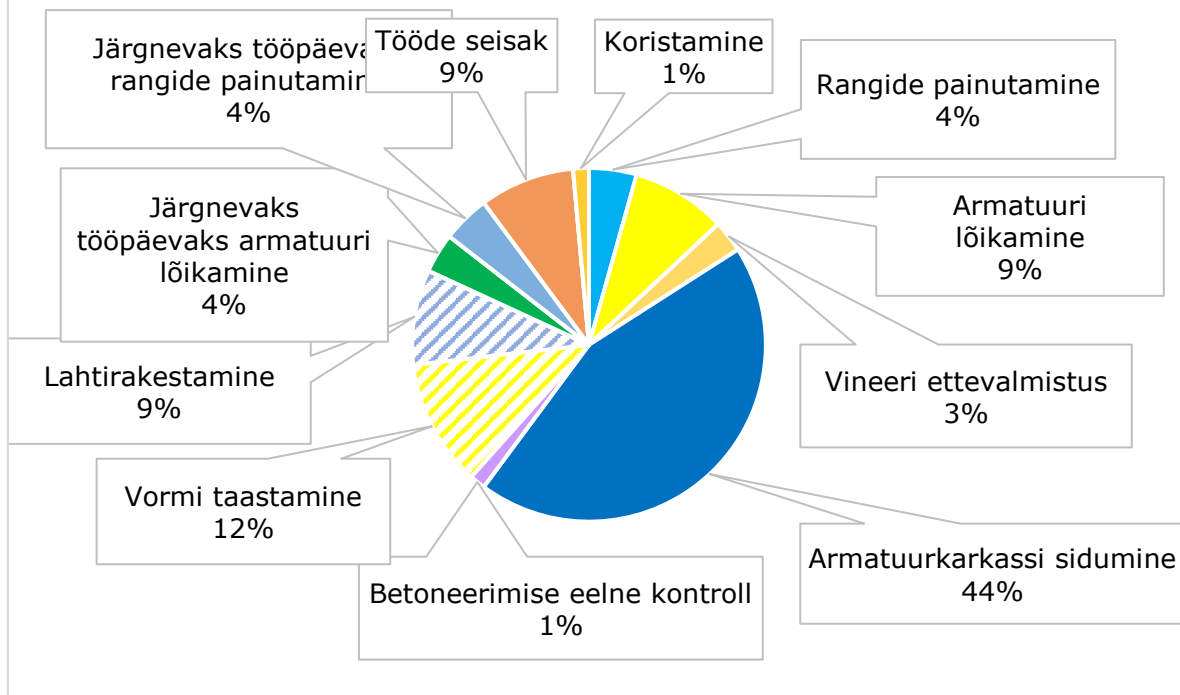


Joonis 32. POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 19.10.22



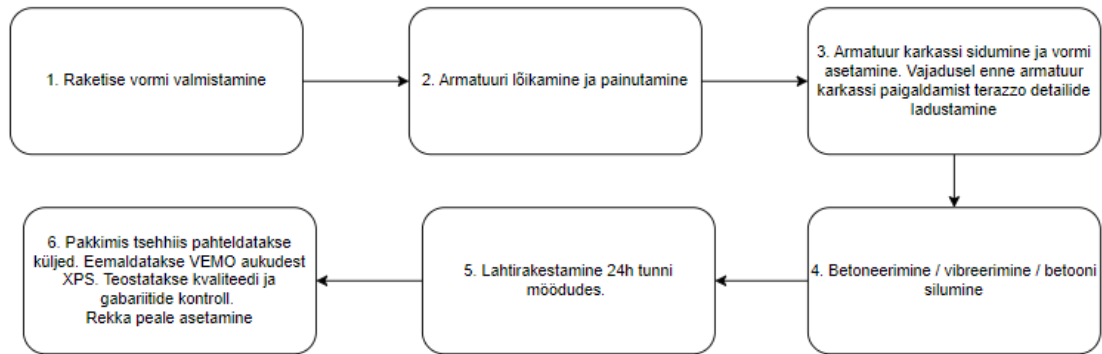
Joonis 33. POS.2- Tegevuste ajaline hõivatus 20.10.22

POS.2
21.10.2022



Lisa-2. Trepimarsside tootmistehnoloogia

Raudbetoonist trepimarsside tootmistehnoloogiat ja protsessi on kirjeldatud alloleval joonisel (vt Joonis 34), mis jaguneb kuueks etapiks: 1) Raketise vormi valmistamine; 2) Armatuuri ettevalmistus; 3) Armeerimine 4) Betoneerimine 5) Lahtirakestamine 6) Pakkimine



Joonis 34. Trepielementide valmistamise tehnoloogia.

Raudbetoonist trepimarsri valmistamine algab raketise vormi valmistamisest. Raketis valmistatakse lamineeritud vineerist paksusega 8-12 mm. Vineeri tahvlitest gabariidiga 3 x 1,8 m lõigatakse välja raketise kilbi elemendid. Vormi jäikuse tagamiseks kasutatakse erinevate mõõtudega puitprussi. Raketis kaetakse seest raketise määrdeõliga, mis annab võimaluse raketist korduvalt kasutada järgnevate elementide valamiseks. Kui tellitud trepimarss on terratso viimistlusega, asetatakse vormi sisse eelnevalt ettevalmistatud terratso detailid, mille peale paigaldatakse valmis kujul armatuurkarkass.

Armeerimisprotsess on kõige ajakulukam. Armeerimine algab 8-12 m pikkustest armatuurlattide lõikamisest ning rangide painutamisest ning armatuurkarkassi sidumine algab siis, kui on valmis suurem osa pikki armatuurlatte ning painutatud range. Alguses toimub armatuurkarkassi sidumisprotsess pukkidel (vt Pilt 5). Armatuurkarkassi

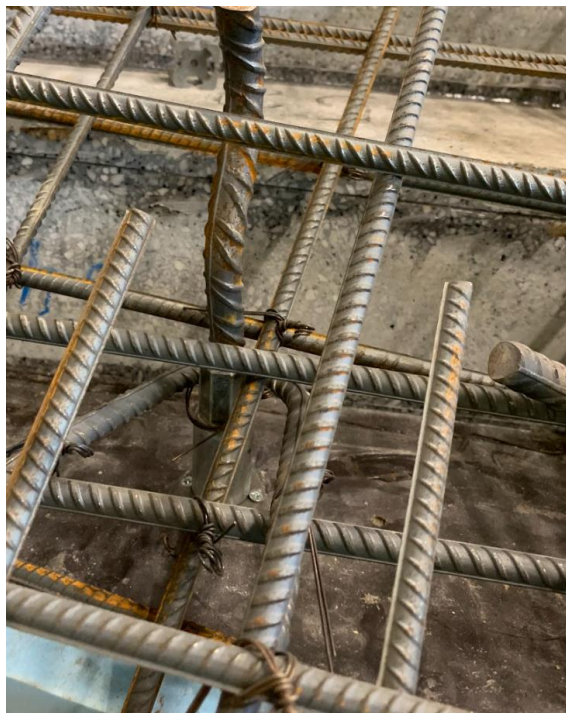
sidumine pukkidel, mitte valmis vormis, on töötajatele mugavam, mille tõttu on protsess kiirem ning väldib lohakusest ja kiirustamisest tulenevaid vigu.



Pilt 5. Armatuurkarkassi sidumine pukkidel

Pärast armatuurkarkassi valmimist pukkidel asetatakse see valmis kujul ettevalmistatud raketise vormi sisse. Pärast karkassi paigaldust toimub taridetailide monteerimine. Üldjuhul on igas trepielemendis vähemalt kaheksa tõste-vekot (betooni sisse paigaldatav tõsteaas), millest neli asuvad elemendi külje peal ning on vajalikud tehases trepimarsside tõstmiseks ja pööramiseks. Ülejäänud 4 tõste-vekot asuvad trepimarssi nähtaval pinnal ning on vajalikud elemendi monteerimiseks platsil (vt Pilt 6 ja Pilt 7) .

Armeerimise sammud ja armatuurvarraste läbimõõdud valitakse vastavalt tootejoonistele. Trepimarsi valmistamisse on üldjuhul kaasatud 2 töötajat.



Pilt 6. Tõste-veno nähtaval pinnal

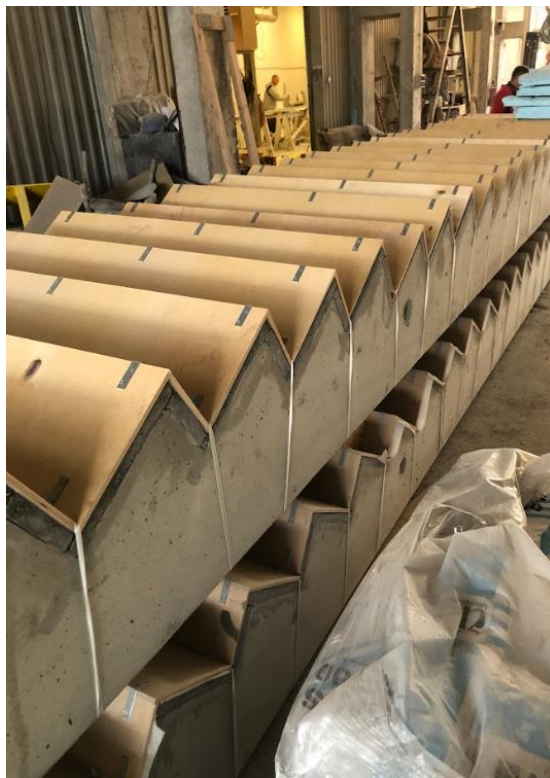


Pilt 7. Tõste-veno külje tasapinnal

Elemendi betoneerimine toimub pärast armatuurkarkassi kontrollimist ja raketise vormi gabariitide mõõtmist. Kontrollprotseduuri kaasatakse ettevõtte tootmistehnoloog ja vähemalt üks töötaja kontrollitavast positsioonist. Betoneerimist alustatakse üldjuhul tööpäeva teises vahetuses. Batoon tarnitakse ettevõtte betoonisegusõlmest. Betoneerimisprotsessi on lihtsustatud seoses sellega, et betoneeritav vorm asub vibrostendil ning puudub vajadus kohtvibreerimiseks vibronuiaga. Tänu sellele tekib aja kokkuhoid betooni silumise ajal.

Pärast vormi lahtirakestamist vajab trepielement lõppviimistlust. Lõppviimistluse etapp toimub pakkimisalas. Viimasel etapil puhastatakse XPS (ekstrudeeritud vahtplast) vemo-avades, lihvitakse trepimarski külgedel betooni ja astme liitekoht, eemaldatakse betooni ebatasasused lihvimise teel ja pahteldatakse küljed koos ajutiste tõste-veodega. Vastavalt tellija soovile on võimalik katta trepimarssi vineeriga (vt Pilt 8 ja Pilt 9), mis kaitseb objektile paigaldatud elementi ehitustolmu eest. Valmis

trepielemendid tropitakse telferkraanaga ning tõstetakse autokasti ja saadetakse objektile.



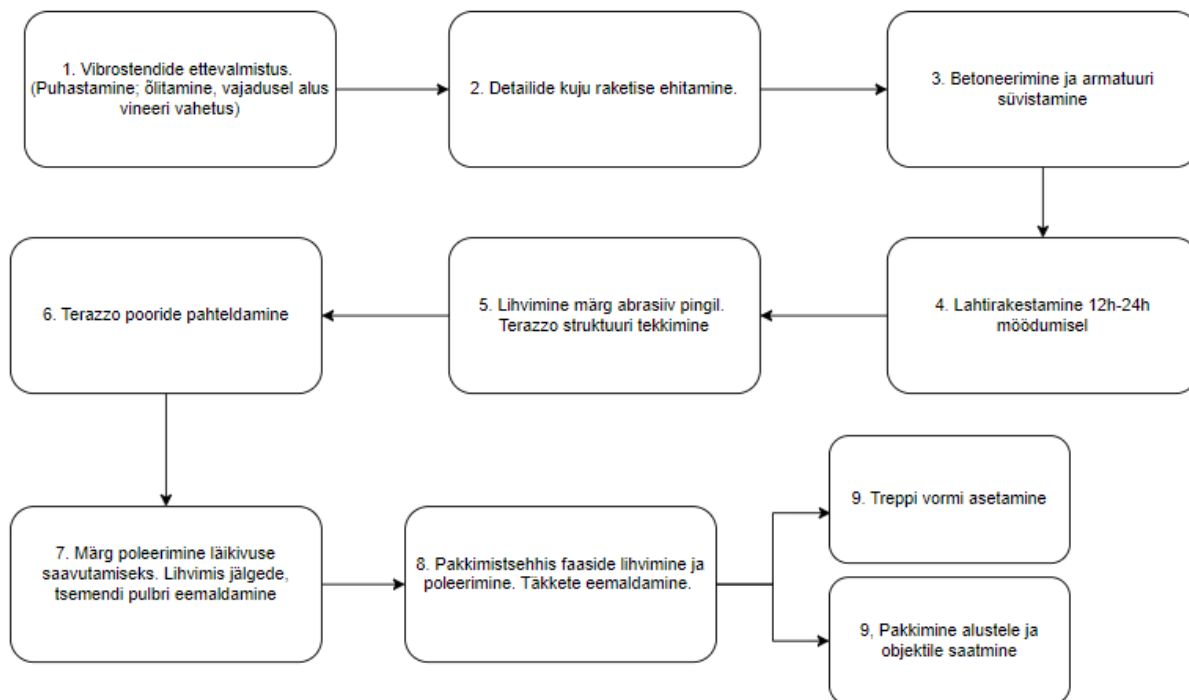
Pilt 8. Pakitud trepielement - kaetud vineeriga



Pilt 9. Valmis trepielement

Lisa-3. Terratso detailide tootmistehnoloogia

Terviklik terratso tootmistehnoloogia koosneb üheksast etapist, millest neli on terratso töötlemine ning viis etappi on seotud terratso betoneerimisega. Järgnevalt tutvustatakse terratso valmistamist kirjeldavat skeemi (vt Joonis 35) .



Joonis 35. Terratso tootmistehnoloogia skeem

Elemendid valmistatakse tavalisest või värvilisest betoonist vibrovormimise ja järgneva töötamise teel. Jämeda täitematerjalina kasutatakse erinevaid graniidi ja marmori tüüpe, merekarpe, klaase ja palju muud. Toonimiseks kasutatakse spetsiaalseid betoonipigmente. Servad töödeldakse ja lihvitakse. Terratso valmistamine algab vormide ehitamisest. Vormid ehitatakse vibrostendidel ning iga stendi peale mahub 8-16 elementi, olenevalt elemendi gabariitidest. Astme minimaalne kõrgus on 21 mm. Kui tegemist on astmega, mille paksus on alla 40 mm ning aste asub trepimarsi peal, armeeritakse see 2-4 pikivardaga (vt Pilt 10). Kokku on terratso valmistamisel 31 mobiilset alust, mille peal toimub terratso betoneerimine. Pärast aluse betoneerimist

ning vibreerimist vibrostendil asetatakse alused üksteise peale (vt Pilt 11). Terratso elementide lahtirakestamine toimub vähemalt 12 tunni möödumisel.



Pilt 10. Terratso armeerimine



Pilt 11. Terratso kivinemine vibroalustel

Pärast lahtirakestamist liiguvad terratso elemendid märgabrasiiv-lihvimispingile (vt Pilt 12). Abrasiiv-lihvimisping eemaldab terratso elemendil pealt ja küljelt 8-12 mm betooni. Ülemise betoonikihi lihvimine annab võimaluse rihtida elemendi loodi (kalibreerida). Samuti avab lihvimine terratso struktuuri. Terratso struktuur tuleb esile juhul, kui elemendilt eemaldatakse ülemine betoonipiima kiht. Betoonipiima kiht tekib terratso pinnal vibreerimise ajal ning katab detaili sees oleva täitematerjali. Lihvimine avab täitematerjali struktuuri. Terratso struktuur tuleb esile juhul, kui elemendilt eemaldatakse ülemine betoonipiima kiht ning lihvitakse täitematerjali (vt Pilt 13).



Pilt 12. Abrasiiv-lihvimispink



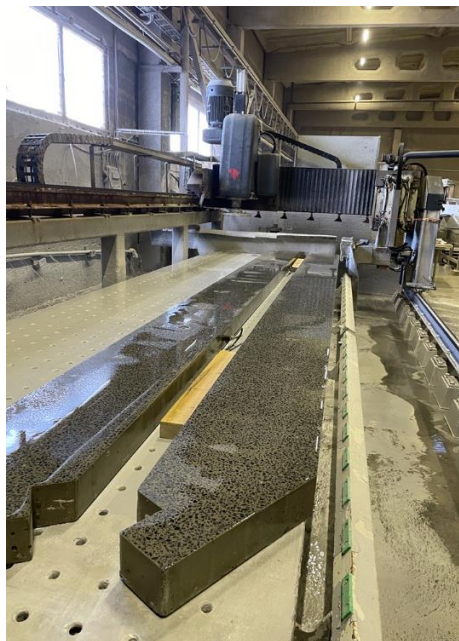
Pilt 13. Terratso detail pärast abrasiivlihvimist

Pärast abrasiivlihvimist suunduvad elemendid pahteldamisetappi. Terratso pind sisaldab poore ning pooride katmiseks kaetakse kõik terratso detailid tsemendi, pigmendi ja vee seguga. Pärast eemaldatakse see lahus silikoonist kraabitsaga terratso detailist ning kaetakse detail täiendavalt tsemendipulbriga. Tsemendipulber tungib pooride sisse ning poori niiskusega seonduisel kivineb ning sedasi eemaldatakse poorid terratso nähtavalt pindadelt (vt Pilt 14)



Pilt 14. Pahteldatud terratso detail

Järgmiseks etapiks pärast pahteldamist on elementide märgpoleerimine, millega eemaldatakse pahteldusjääd ja antakse terratso detailidele läige (vt Pilt 15). Poleerimine toimub 3 etapis ehk 3 erineva abrasiivsuseastmega kettaga. Poleerimist teostatakse eritellimusel valmistatud seadmega Kasins. (vt Pilt 16)



Pilt 15. Poleerimisseade Kasins



Pilt 16. Poleeritud terratso detailid

Pärast terratso lõplikku poleerimist suunduvad elemendid pakkimistsehhi (vt Pilt 17), kus parandatakse täkked epoksiidmastiksiga ning teostatakse faaside lihvimine ja poleerimine. Faase on võimalik valmistada ja poleerida nii käsitsi teemantkettaga

ketaslõikuriga kui ka poleerimisstendi abil. Enamik faasimist teostatakse käsitsi. Pärast faaside valmimist suunduvad elemendid trepimarsi raketisse või pakitakse astmed aluste peale ning saadetakse objektile (vt Pilt 18).




Pilt 17. Pakkimistsehh



Pilt 18. Faasitud terratso detailid

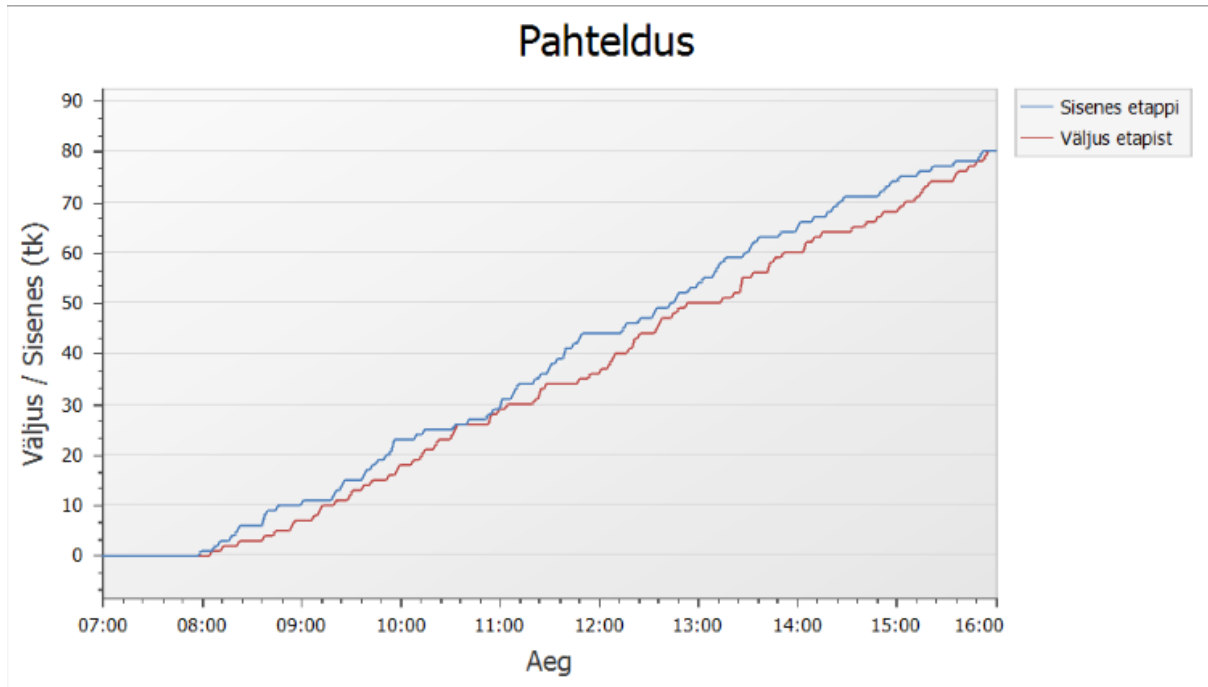
Lisa-4. Painutatud armatuur elementide hinnavõrdlus

Tabel 13. Armatuur positsioonide hinna võrdlus

Elemendi tüüp	Päevade vajadus kahe elemendi valmistamiseks	Keskmine ajakulu minutites	Maksumus iseseisval valmistamisel	Tellitava valmiselemendi maksumus
$\begin{array}{r} \underline{A1} \\ 3280 \end{array}$	18	4	21,80 €	32,26 €
$\begin{array}{r} \underline{A2} \\ 1250 \end{array}$	28	6	21,05 €	31,15 €
$\begin{array}{r} \underline{A3} \\ 1250 \end{array}$	88	15	43,46 €	64,32 €
$\begin{array}{r} \underline{C1} \\ 3270 \end{array}$ 	18	8	89,91 €	132,17 €
	18	12	8,00 €	16,87 €

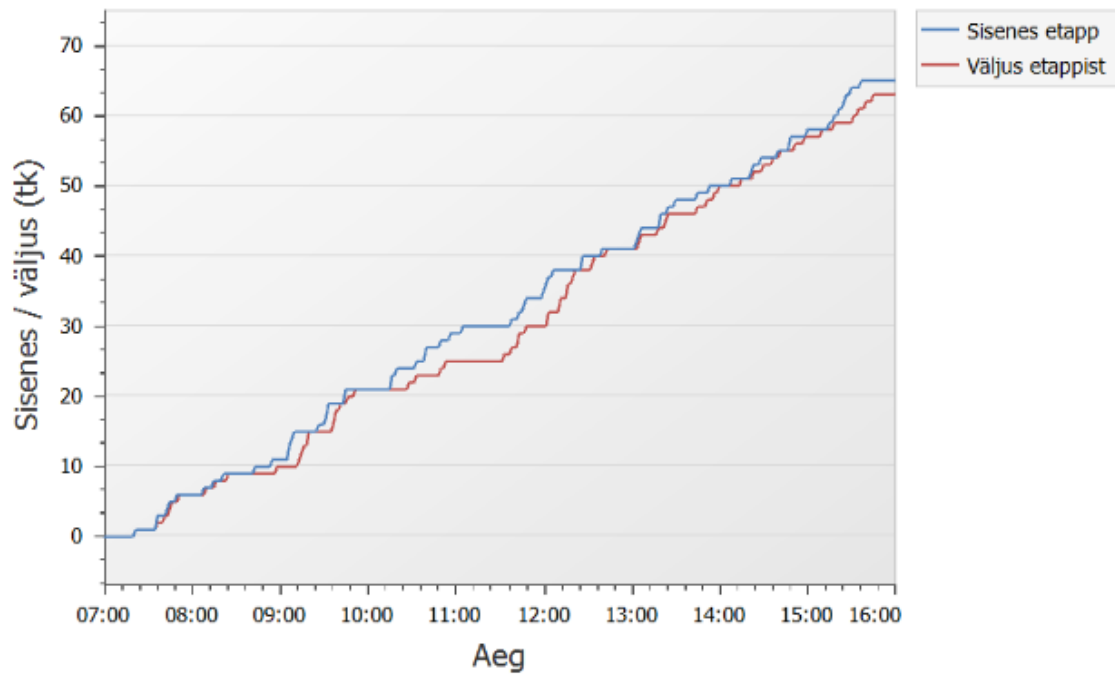
<p>U1 105 60 200</p>				
<p>Z1 60 380 400 305 35° 400</p>	18	9	12,68 €	17,37 €
<p>Z2 160 250 400 30 35° 400</p>	18	9	10,46 €	13,70 €
<p>Z3 70 265 400 225 55° 400</p>	18	9	11,34 €	15,20 €
Summa			218,68 €	323,03 €

Lisa-5. Terratso digitaalse kaksiku graafik



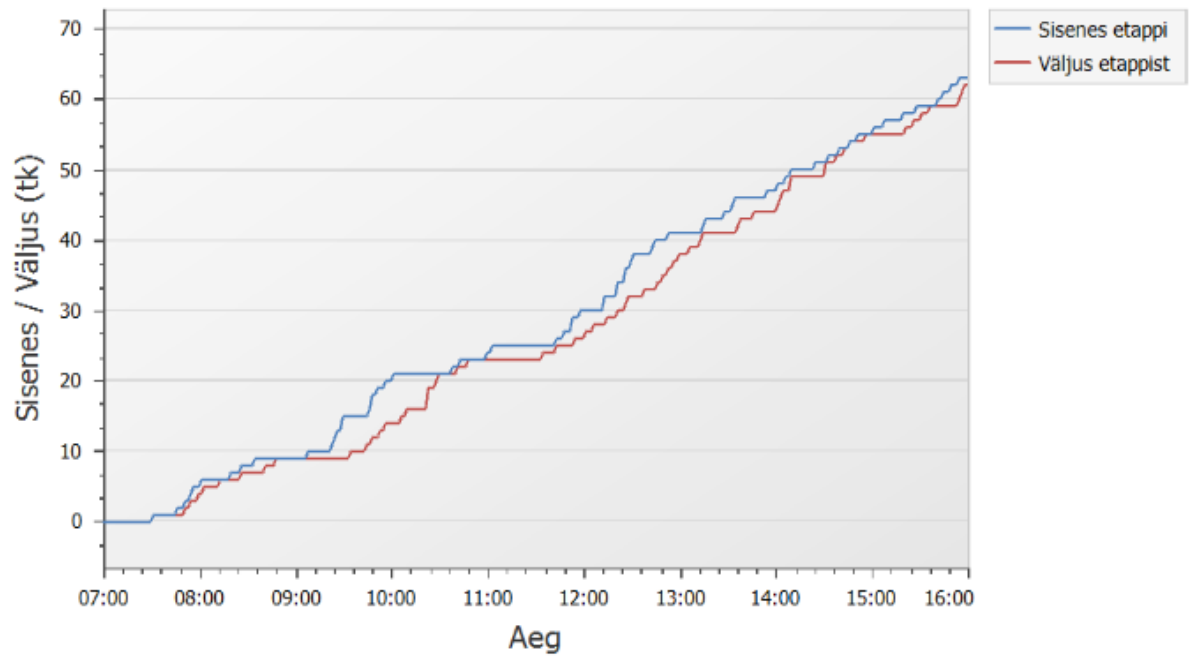
Joonis 36: Tootmisetapp- 2. Pahteldamisetappi tootmisgraafik

Poleerimisetaapp



Joonis 37. Poleerimisetaapi tootmisgraafik

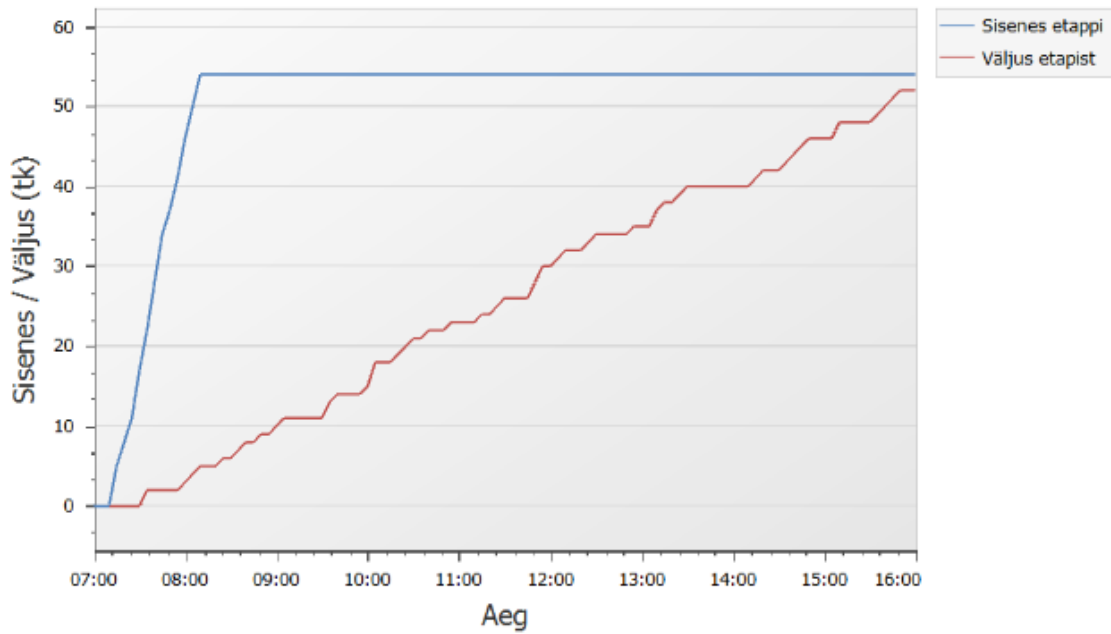
Pakkimisetaapp



Joonis 38. Pakkimisetaapi tootmisgraafik

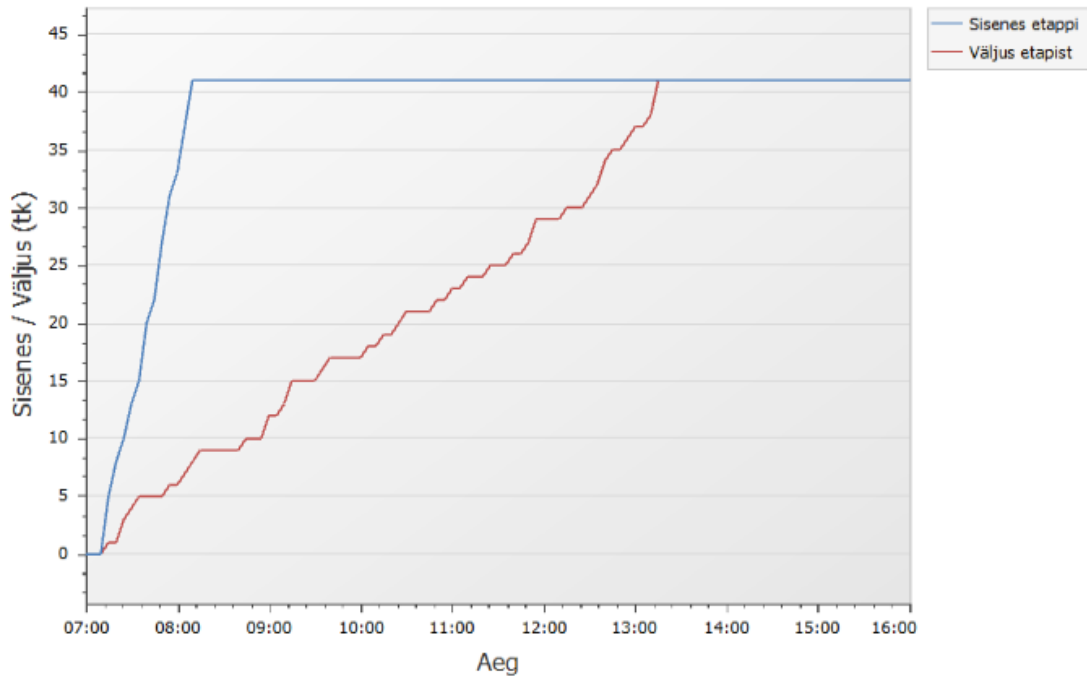
Lisa-7. Stsenarium 2- graafikud

Olemaolev abrasiivlihvimisekonveier



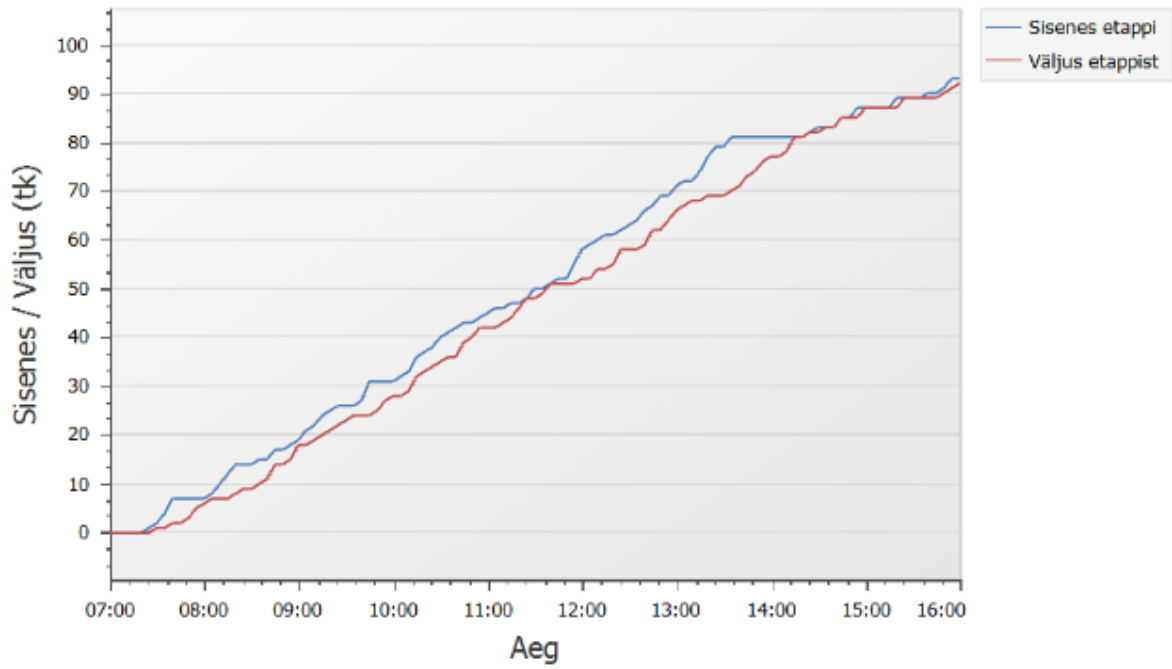
Joonis 39. Olemaoleva abrasiivlihvimisekonveieri tootmisgraafik

Lisanduv abrasiivlihvimisekonveier



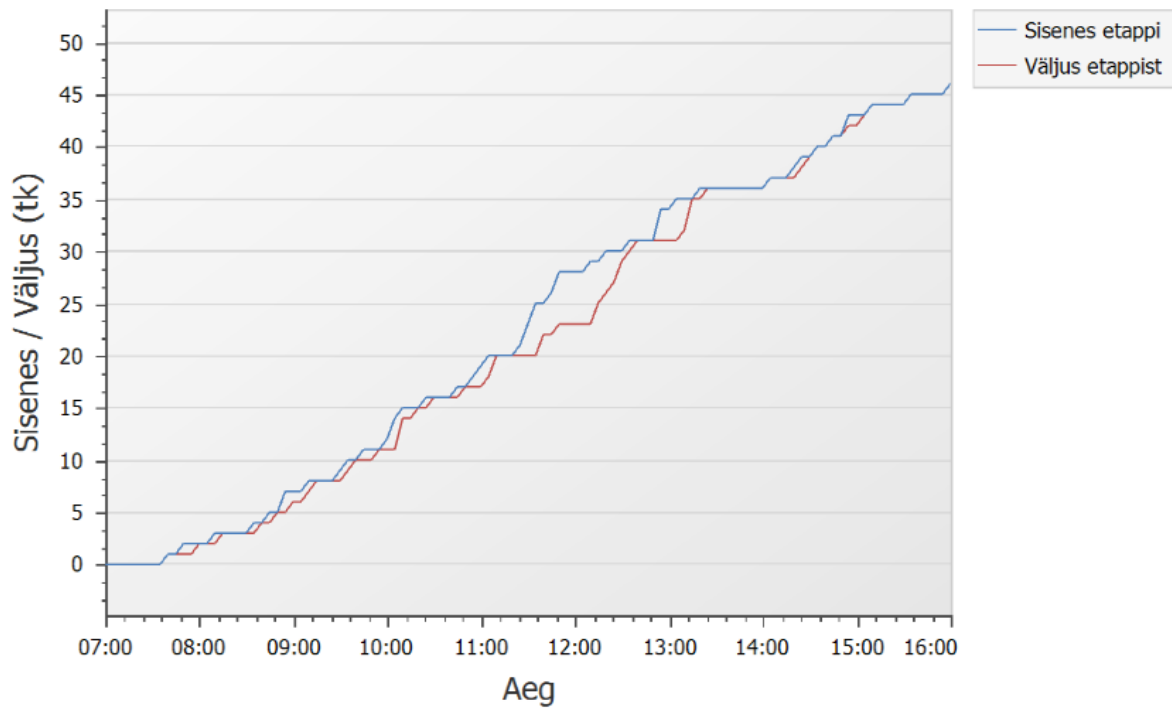
Joonis 40. Lisanduva abrasiivlihvimisekonveieri tootmisgraafik

Poleerimis etapp



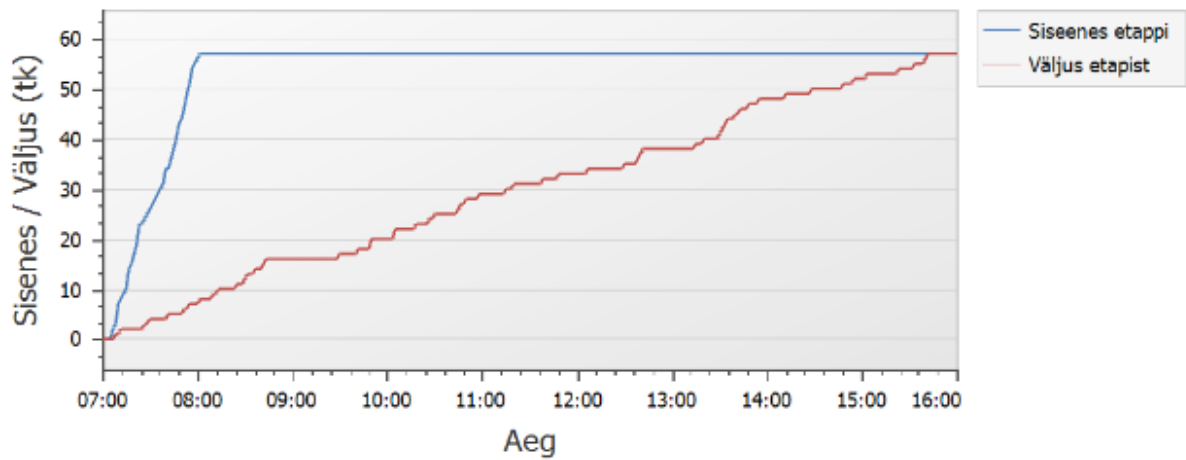
Joonis 41. Poleerimisetapi tootmisgraafik

Pakkimisetapp



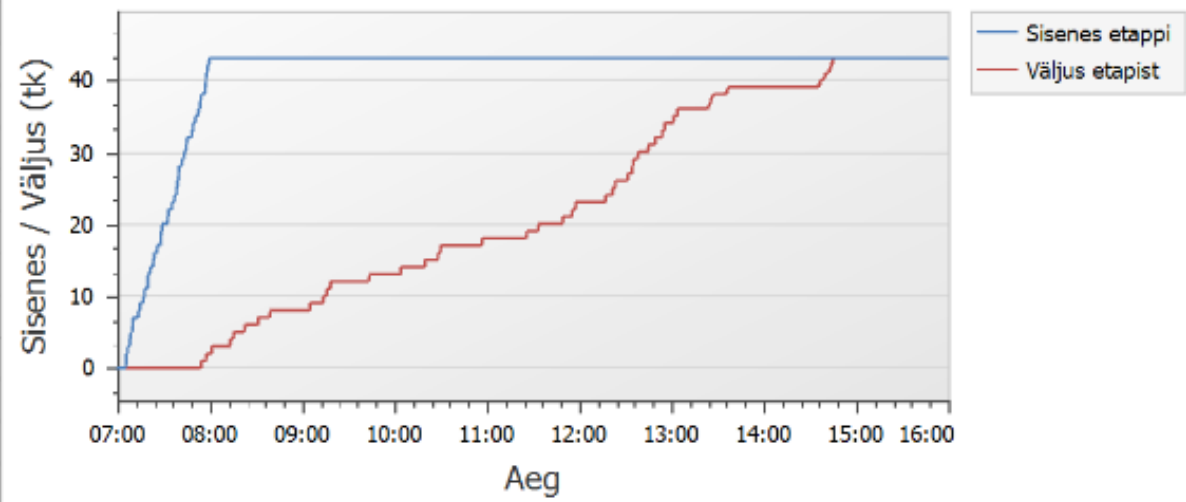
Joonis 42. Pakkimisetapi tootmisgraafik

Abrasiivlihvimine "Kasins" seadmel



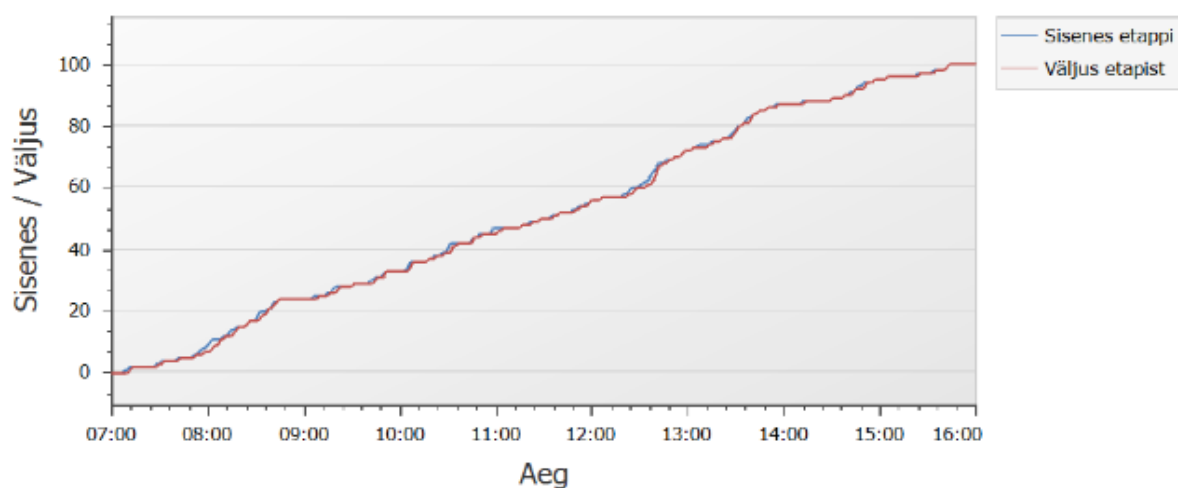
Joonis 43. Olemasoleva seadme Kasins tootmisgraafik

Abrasiivlihvimine "Kasins" seadmel



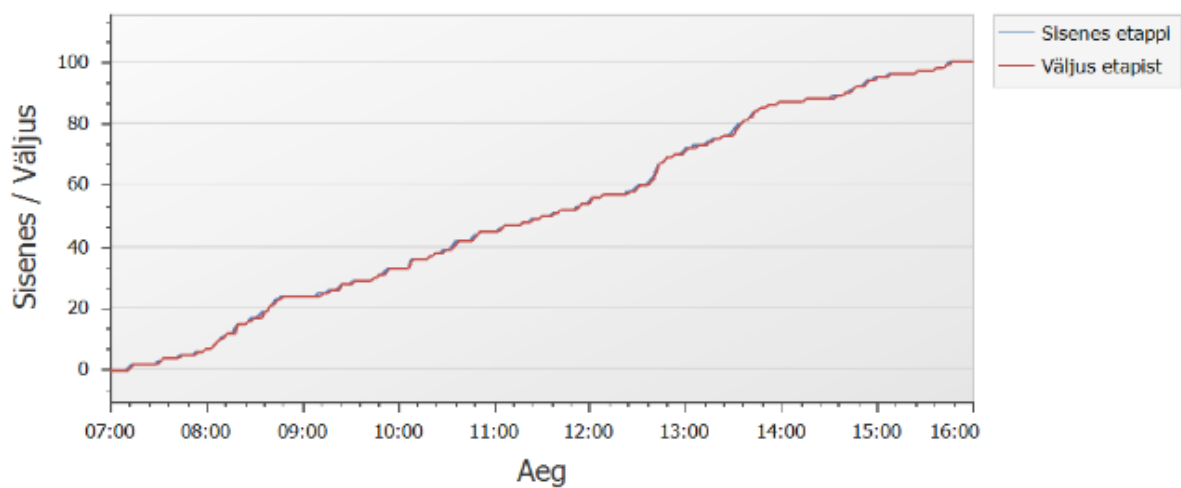
Joonis 44. Lisanduva seadme Kasins tootmisgraafik

Faasimine "Terzago" seadmel



Joonis 45. Faasimiskonveieri Terzago tootmisgraafik

Pakkimise etapp



Joonis 46. Pakkimisetapi tootmisgraafik

Lisa-9. Abrasiivlihvimise katse tulemused



Pilt 19. Abrasiivlihvimise katse alustamine



Pilt 20. Abrasiivlihvimise katse tulemus

Lisa-10. Betoonisegu jääkide kasutamine



Pilt 21. Vundamendiploki/vastukaalu raketis



Pilt 22. Valmis vundamendiplokk/vastukaal