

Jukka Koskinen\*, Timo Salmi, Pekka Kilpeläinen ja Pertti Lahdenperä

# Robottiikan mahdollisuudet rakentamisessa

**Tiivistelmä:** Tässä paperissa esitetään robotiikan mahdollisuuksia suomalaisessa talonrakentamisessa ja ta-  
loelementtiteollisuudessa. Talonrakentamisen mahdollisuuksia selvitettiin analysoimalla rakentamisen työ-  
läjettä käymällä läpi rakentamisen työvaiheita Ratu-kortis-  
ton avulla. Elementtiteollisuudessa potentiaalisimpia  
automatisointikohteita etsittiin haastattelemalla ja vie-  
railemalla yrityksissä. Muutamalle potentiaalisimmalle  
sovelluskohteelle tehtiin analyysi, jonka avulla selvitet-  
tiin taloudellisia edellytyksiä automatisoinnille.

Avainsanat: robotiikka, automatisointi, rakentaminen

\*Yhteyshenkilö: Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy,  
Email: Jukka.Koskinen@vtt.fi

## 1 Johdanto

Rakentamisessa tuottavuuden kasvu on ollut heikom-  
paa kuin esimerkiksi tehdasteollisuudessa, jossa on ta-  
pahtunut huomattavasti isompi tuottavuuden kasvu  
tuotantoprosessien digitalisoinnilla, robotisoinnilla ja  
kehittyneillä työstökoneilla [1]. Varsinainen rakenta-  
mistyö tehdään yhä pääosin perinteisin menetelmin,  
tosin digitalisoituja suunnitelmia hyödynnetään. BIM-  
tietomalleja (Building Information Model) rakennuksen  
tietomalli) hyödynnetään laajasti rakennusten suunnit-  
telussa ja toteutuksessa. Mallit sisältävät mm. raken-  
nuksen geometriaa koskevat tiedot digitaalisina, esi-  
merkiksi rakennuksen tila- ja rakennemalleja

Automatisoituja koneita ja laitteita rakennustyömailla  
ei ole juurikaan voitu hyödyntää samalla tavalla kuin  
esimerkiksi konepajateollisuudessa. Automatisoinnin  
esteinä ovat mm. rakennusten yksilöllisyys, lyhyet työ-  
vaiheet, isot materiaalivirrat, matala käyttöaste yksit-  
täisellä laitteella, epätarkat suunnitelmat automati-  
soinnin kannalta ja ahtaat tilat laitteiden siirtämiseen.

Rakentamisessa on kuitenkin paljon matalaa osaamista  
vaativia ja työolosuhteiltaan haastavia tehtäviä, kuten  
esim. poraus, hionta, vanhan materiaalin poisto, tava-  
roiden kuljetus. Automatisointi tulisi toteuttaa tehtä-  
vissä, joissa automatisoinnin edut olisivat sinänsä ilmei-  
set.

Rakentamisessa tarvittavien komponenttien, kuten esi-  
merkiksi katto- ja seinäelementtien, valmistamisessa  
automaattisia laitteita käytetään jonkin verran ja myös  
robotteja hyödynnetään. Rakentamisen robotisoinnin  
kannalta haasteet ovat hyvinkin erilaiset eri rakenta-  
misvaiheissa (perustus-, runko- ja ulkotyöt, sisäraken-  
teet, LVIS-työt). Lisäksi erilaiset rakennustavat asetta-  
vat omat haasteensa (puu- ja betonielementtitalot, tiil-  
italot). Rakentamisen perinteet ja rakentamismääräyk-  
set ovat eri maissa hyvinkin paljon toisistaan poik-  
keavia, mikä on omalta osaltaan hankaloittanut raken-  
tamisen menetelmien ja laitteiden kehittämistyötä.  
Monissa maissa edullinen työvoima on rakennuttajalle  
halvempi ja joustavampi vaihtoehto kuin automatisoi-  
dut laitteet.

Rakentamisen robotiikkaa on 1980-luvulta lähtien tut-  
kittu ja erilaisia ratkaisuja on esitelty erityisesti Japa-  
nissa [2]. Elementtiteollisuutta lukuun ottamatta kau-  
pallisiksi tuotteiksi asti kehitettyjä automaattisia lait-  
teita tai järjestelmiä on markkinoilla vähän ja varsi-  
naista läpilyöntiä eli laajamittaista käyttöönottoa ei ole  
minkään sovelluksen osalta vielä tapahtunut [3]. Haaste  
onkin löytää robotiikalle ne käyttökohteet, jotka mah-  
dollistavat uuden liiketoiminnan luomisen ja kehittämi-  
sen. Rakentamisalalla on nähtävissä tilaa uusille robo-  
tiikkaa ja automaatiota hyödyntäville innovaatioille.

Automatisoinnin kannalta BIM-tietomallien hyödyntä-  
minen on lähes välttämätöntä. Pääsy malleihin antaa  
mahdollisuuden viimeisimpiin muutoksiin suunnittelu-  
tiedoissa ja siten robotin tehtävien suunnittelussa [4].  
Tosin tällä hetkellä BIM-malleja ei voida vielä kovin hy-  
vin hyödyntää robotin tehtävien ohjaukseen. BIM-mal-  
lien sisältämä tieto ei ole välttämättä automatisoinnin  
kannalta riittävän tarkkaa tai se voi olla muutoin puut-  
teellista.

Tämän paperin kappaleessa 2 on esitetty analyysi talon-  
rakentamiseen liittyvien työtehtävien automatisoinnin  
mahdollisuuksista. Analyysissä hyödynnettiin Ratu-kor-  
tistoa [5], joka on rakennusalan tietopalvelu ja se sisäl-  
tää mm. työmenetelmä- ja työohjekuvaukset rakennus-  
työmaille sekä näihin menetelmiin liittyvää ositeltua  
työmenekkitietoa. Analysoimalla työohjeet tunnistet-  
tiin muutamia potentiaalisia robotisointikohteita, jotka  
otettiin tarkempaan tarkasteluun (Kappale 4). Valituille

työtehtäville määriteltiin karkeat ratkaisumallit ja laadittiin niitä vastaavat kustannuslaskelmat, joiden avulla arvioitiin robotisoinnin kannattavuutta kyseisissä työla-jeissa (Kappale 5). Betonielementtitehtailla ja seinäele-menttitehtailla (puiset ulkoseinät) potentiaalisimpia automatisoitavia tehtäviä selvitettiin tehtailla tehtyjen haastattelujen perusteella (Kappale 3). Näkökulma on suomalaisessa talonrakentamisessa ja taloelementtite-ollisuudessa.

## 2 Potentiaalisia kohteita talonrakenta- misessa

Tässä osiossa tarkastellaan työmaalla tapahtuvan ra- kennustyön automatisoinnin edellytyksiä. Kyseessä on pääpiirteinen, eräänlainen esikarsinta potentiaalisten automatisointikohteiden tunnistamiseksi. Työ tukeu- tuu Rakennustietosäätiön Ratu-kortistoon, sen Talo- Ratu -korttien läpikäyntiin. Korjaus-Ratu-kortistoa tai taloteknisiä töitä ei tarkastella. Työlajeja on pyritty ar- vioimaan seuraavien toteutettavuuskriteerien näkökul- masta:

- **Työvaltaisuus.** Kokonaisuudessaan suuri työmaa- työn määrä ja työt liittyvät rakennusosiin, joiden ke- hittäminen esivalmistusta lisäämällä haastavaa.
- **Toistuvuus.** Yksittäinen työtehtävä, liikesarja tai lii- kesarjojen yhdistelmä toistuu työssä ja hankkeessa (ja markkinoilla) samanlaisena hyvin suurina määrinä.
- **Jatkuvuus.** Työtehtävät toistuvat jatkuvina samalla, yhtenäisellä työalueelle ilman oleellisia/vaikeita si- jaintimuutoksia, monia keskeytyksiä tai välivaiheen tehtäviä.
- **Keveys.** Käsiteltävät aineet, tarvikkeet ja perinteiset työkalut ovat suhteellisen kevyitä (mahdollistamaan kevyet/edulliset ja helposti siirrettävät koneet).
- **Käsiteltävyys.** Käsiteltävät tarvikkeet ja tuotettava rakenne ovat koostumukseltaan ja mittasuhteiltaan säännönmukaisia ja helposti hallittavia (olosuhteet huomioon ottaen).
- **Työergonomia.** Haasteellinen ergonomia.
- **Laskennallisuus.** Muutoin suoraviivaisen toteu- tuksen haastava tuotesuunnitelma ja sen tulkinnan monimutkaisuus (mosaiikkikuviot, erityiset 3D- ra- kenteet).
- **Säännönmukaisuus.** Työ ei sisällä monia erilaisia hankalasti tulkittavia muuttujia

Eri kriteerien täyttyminen esitetään taulukossa 1 useimpien eri työläjien (pl. 1 Maarakennustyöt) osalta suuntaa-antavasti. Näin mm. siksi, että monissa tapauk- sissa kunkin työläjin sisällä tehdään hyvin erityyppisiä rakenteita, joiden osalta automatisoinnin edellytykset

poikkeavat toisistaan jo lähtökohtaisesti. Näin ollen esi- tetyt arviot eivät voi olla yksikäsitteisiä, mutta niiden uskotaan auttavan huomion kohdistamisessa potenti- aalisimpiin kohteisiin.

Analyyysin perusteella, erityisesti muurauksessa, kivi- töissä, raudoituksessa ja laatoituksessa on edellytyksiä täyttäviä ehtoja. Näistä muuraus ja laatoitus valittiin mukaan taloudellisuustarkasteluun. Maalauksen robo- tisointiin on tehty maailmalla paljonkin tutkimusta, jo- ten myös se arvioitiin potentiaaliseksi ja otettiin mu- kaan tarkasteluun. Taloudellisuustarkastelu on esitetty kappaleessa 4.

Taulukko 1. Talonrakentamisen työmaatehtävien auto- matisoinnin mahdollisuuksien alustavaa arviointia. Tau- lukossa arvioidaan suuntaa-antavasti työläjien automati- soinnin edellytysten täytymistä värikoodein (✓ (ei täytä ehtoa), > , > , > , ✓ (täyttää ehdon)).

Korttinumero Kortin nimi ja sisältö	Työvaltaisuus	Toistuvuus	Jatkuvuus	Keveys	Käsiteltävyys	Työergonomia	Laskennallisuus	Säännönmukai-
<b>2 Betonirakennetyöt</b>								
Ratu 0397 <a href="#">Lautamuottityö.</a>	>	>	>	>	>	>		>
Ratu 0398 <a href="#">Levyvuottityö.</a>	✓	>	>	>	>	>		>
Ratu 0399 <a href="#">Kasetti- ja kupumuottityö.</a>	✓	>	>	>	>	>		>
Ratu 0400 <a href="#">Pöytä- ja kulmamuottityö.</a>	>	>	✓	✓	✓			>
Ratu 0401 <a href="#">Suur- ja erikoissuurmuottityö.</a>	>	>	✓	✓	✓			>
Ratu 0402 <a href="#">Rauditus.</a>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ratu 0403 <a href="#">Betonointi.</a>		>	>	✓	>		✓	>
Ratu 0404 <a href="#">Pintabetonityöt.</a>	>		>	>			>	
Ratu 0405 <a href="#">Lattiasoitetyö.</a>	>		>	>				
Ratu 0390 <a href="#">Kuorilaattalementti- ja liittole- vytyö.</a>		>		✓	✓	>		
Ratu 0408 <a href="#">Betonipintojen etuoikaisu ja ruiskubetonointi.</a>		>	>					>
Ratu 0406 <a href="#">Piikkaus, paikkaus, timanttipo- raus ja -sahaus.</a>		>	>			>		
<b>3 Metallirakennetyöt</b>								
31 Teräsrunkotyö		>		>	>			
Ratu 0410 <a href="#">Metalliiovi- ja -ikkunatyö.</a>		>	>	>	>			>
Ratu 0411 <a href="#">Metallielementtityö.</a>	>	>		>	>			
Ratu 0412		>	>		✓	>		

<a href="#">Ohutlevytyö, kate.</a>									
Ratu 0413 <a href="#">Ohutlevytyö, julkisivut ja täydentävät rakenteet.</a>		>	>		-				>
Ratu 0414 <a href="#">Metallirakennetyö.</a>		>	>	>	>				
<b>4 Muuraus- ja kivityöt</b>									
Ratu 41-0289 <a href="#">Tiilimuuraus.</a>	>	-	-	>	>	>	>	>	>
Ratu 42-0290 <a href="#">Harkkomuuraus.</a>		>	>	>	>	>			
Ratu 42-0291 <a href="#">Ohutsaumamuuraus.</a>	>	>	-	>	>	>			>
Ratu 43-0292 <a href="#">Kivityö.</a>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
Ratu 44-0293 <a href="#">Ladonta. Tiilikate.</a>	>	>	>	>	-	>			
<b>5 Puutyöt</b>									
Ratu 0416 <a href="#">Puurunkorakentaminen, paikalla rakennettu puurunko.</a>				>	-				
Ratu 0417 <a href="#">Puurunkorakentaminen, platform-menetelmä.</a>				>	>				
Ratu 0418 <a href="#">Puurunkorakentaminen, ulkopuolinen puuverhous.</a>	>	>	>	>	>	>			>
Ratu 0424 <a href="#">Puuelementtirakentaminen, seinät.</a>					-	-			
Ratu 0425 <a href="#">Puuelementtirakentaminen, tilaelementit.</a>					-	-			
Ratu 0434 <a href="#">Saunan puutyöt.</a>	>	>	>	>	>	>			>
Ratu 0435 <a href="#">Puuelementtirakentaminen, pilarit ja palkit.</a>					-	-			
Ratu 0436 <a href="#">Puuelementtirakentaminen, väli- ja yläpohjaelementit.</a>					-	-			
Ratu 0426 <a href="#">Levyrakentaminen, väliseinät.</a>	>	>	>	>	>	>			>
Ratu 0420 <a href="#">Levyrakentaminen, levytys.</a>	>	>	>	>	>	>			>
Ratu 0427 <a href="#">Puupintarakentaminen, sisäpuolinen puuverhous ja -päällystys.</a>			>	>	>				>
Ratu 0428 <a href="#">Listoitus.</a>			>	-	>				
Ratu 0429 <a href="#">Vakiovarustaminen, heloitus ja lukitus.</a>			>	>	>				
Ratu 0422 <a href="#">Kalusteputsepänttyö.</a>			>	>	>				
<b>6 Eristys- ja saumaustyöt</b>									
Ratu 0437 <a href="#">Lämmöneristys.</a>				>	>				>
Ratu 0438 <a href="#">Ääneneristys.</a>				>	>				>
Ratu 0430 <a href="#">Perustusten vedeneristys.</a>		>		>	>				
Ratu 0431 <a href="#">Vesikaton vedeneristys.</a>			>		-				
Ratu 0433 <a href="#">Sisäpuolinen vedeneristys.</a>			>		-				>
Ratu 0432 <a href="#">Saumaus.</a>					-				>
Ratu 0439			>		>				

<a href="#">Palosuojaus.</a>									
<b>7 Pintatyöt</b>									
Ratu 71-0307 <a href="#">Rappaus.</a>	>		>	>	>				
Ratu 72-0308 <a href="#">Tasoitetyö.</a>	>		>		>				>
Ratu 73-0309 <a href="#">Sisämaalaus.</a>		-	-	-	>				>
Ratu 73-0310 <a href="#">Tapetointi.</a>							-		
Ratu 73-0311 <a href="#">Ulkomaalaus.</a>							>		
Ratu 74-0312 <a href="#">Laatoitus.</a>	>	-	>	-	>	-	>		
Ratu 75-0313 <a href="#">Mattotyö, kuivat tilat.</a>							-		
Ratu 75-0314 <a href="#">Mattotyö, märkätilat.</a>							-		
Ratu 76-0315 <a href="#">Massapäällystystyö.</a>		>	>	>	>				>
Ratu 77-0316 <a href="#">Parketti- ja laminaattipäällystetyö.</a>	>	>	>	>	>				>
Ratu 78-0317 <a href="#">Alakattotyö.</a>		>	>		>	>			
Ratu 79-0318 <a href="#">Lasitus.</a>		>	>		>				

### 3 Potentiaalisia kohteita puu- ja betonielementtitehtailla

#### Puuelementtitehtaat

Rakennustyömaihin verrattuna automatisoinnin lähtökohdat puutaloelementtien valmistuksessa tehtaassa ovat paljon helpompia. Samat tehtävät ovat kuitenkin kyseessä. Järjestely vain on toinen. Seinäelementtilinjoilla on automatisoinnin kannalta aikakin seuraavia etuja:

- Työ tapahtuu linjassa, elementti tulee robotin luo sen sijaan, että robotin pitäisi tulla työmaalle.
- Ulottuvuusvaateet ovat rajallisempia. Vaikka perinteisen teollisuusrobotin ulottuvuus ei sellaisenaan riitäkään, tehdasolosuhteissa ulottuvuutta on helpompi kasvattaa ulkoisilla akseleilla (portaalit ja lineaariakselit).
- Jatkuva materiaalivirta robotille järjestettävissä osittain linjan avulla. Laitetta ei tarvitse siirtää työmaalla eikä työmaalta toiselle. Käyttösuhte on helpompi saada kuntoon. Sitä tukee myös useammassa vuorossa työskentely.

Seinäelementtien valmistukseen kuuluu rungon kausta, eristeiden laitto, tuulensuojalevytystä, höyrynsulkumuovin asennusta, sisäpinnan levytystä, ulkulaudoitusta, ikkunoiden asennusta ja ikkunoiden ympärillä olevien vuorilautojen asennusta. Työ sisältää paikallisen asennusta, nauhausta, niittausta ja sahausta. Li-

säksi tehtaissa tehdään erinäisiä aidakkeita yms. Periaatteessa suuri osa tehtävistä on automatisoitavissa. Toki se vaatii tutkimus- ja kehitystyötä. Jotkut kohteet enemmän ja toiset vähemmän. Suomalaisissa tehtaissa ei ole yleensä niin isoa volyymia, että robotti voisi olla vain yhteen tehtävään dedikoitunut. Myös joustavuusvaateet ovat kovat. Seinäelementtivalmistuksessa on olemassa kaksi merkittävää kansainvälistä laitetoimittajaa, saksalainen Weinman ja ruotsalainen Randek, joiden ratkaisut ovat portaaleihin perustuvia. Suomalainen Kivioja Engineering on myös tullut mukaan alueelle. Vakiintuneita ratkaisuja on suomalaisten kokemusten mukaan pidetty turhan jäykkänä. Laitteiden hyödyntämisessä on erilaisia käyttötapoja täysautomaatiota ja erilaisia automaation ja manuaalisen työn sekoituksia. Haastavaa on löytää sopiva automaatiotaso, joustavuus ja kustannustehokkuus kohdilleen.

Julkisivujen laudoitus on automatisoinnin kannalta vaativimpia tehtäviä. Varsinainen laudoitus on kohtuullista adaptiivisuutta vaativaa yleensäkin, kun materiaali on joustavaa ja laudat pitäisi saada ponttiin luotettavasti. Lisäksi tulisi mukautua sekä mitoissa että muodoissa oleviin laatueroihin. Lisäksi pitäisi tehdä pinnan tarkastus. Manuaalinen laudoitus on pullonkaula puuelementtitehdaslinjalla. Laudoituksen nopeuttaminen automatisoimalla nostaisi merkittävästi tehtaan kapasiteettia ja siten tuottavuutta.

Myös eristeiden automaattinen asennus on haastavaa. Miten saada villan leikkaaminen, käsittely ja asennus toimimaan luotettavasti. Julkisivujen maalauksen automaatio on myös kiinnostavaa. Maalin levityksen voi ajatella tapahtuvan ruiskulla, mutta haluttu laatu vaatii silveltimen käyttöä. Tarvittava maalimäärä riippuu kuitenkin pinnan laadusta, joka vaihtelee. Haasteena on saada tämä prosessi hallintaan, jotta laatu on kohdallaan. Laadunvalvonnassa konenäöllä voisi olla oma rooli, mutta tilanne ei oletettavasti pelkästään sitä kautta ratkea.

Tilaelementtien valmistuksessa mielekäs lähtötilanne on aloittaa seinäelementeistä. Siitä mennään valmiustasasteessa pidemmälle. Silloin tulee lisäksi vastaan muita kiinnostavia ratkaisuja, kuten laatoitus, jota käsitellään työmaatoiden yhteydessä. Mahdollisesti myös vedeneristyksen levitys ja sisämaalaukset ovat automatisoitavissa. Myös muille vaiheille automatisoinnin lähtökohta tilaelementtien valmistuksessa on työmaata helpompaa. Vastaan tulee myös se kysymys, voisiko jotain LVIS-töihin liittyviä esiasennuksia tehdä automaattisesti.

## Betonielementtitehtaat

Betonielementti tehtaiden osalta arvioidaan sitä, mitä mahdollisuuksia olisi automatisoida seinäelementtien (sandwich-tyyppinen) ja ontelolaattojen valmistusta esimerkiksi robottien avulla. Isoin hyöty olisi saatavissa automatisoimalla eristeiden asennus sandwich-elementtiin. Betonielementtitehtailla on jo portaalirobotteja esimerkiksi betonielementin muotien reunojen kaasaamiseen sekä betonirauhoituksen kokoamiseen

Villaeristelevyjen asennus elementtiin tehdään manuaalisesti. Työntekijät asentavat eristelevyjä muottiin valetun betonikerroksen päälle eri kokoisina levyinä ja tarvittaessa leikkaavat levyt pienemmiksi paloiksi. Vaihtoehtona on asentaa ne robotilla, joka poimisi eristeet ja asentaisi ne elementtiin. Haasteena robotiikan kannalta on eri kokoisten palojen leikkaaminen sekä eristeiden tarkka paikoitus oikeaan kohtaan. Paikoituksen voisi tehdä tietomallien (BIM) ja konenäön avulla. Tosin BIM-mallit eivät tällä hetkellä tue tätä, koska mallit eivät sisällä tietoa siitä miten eriste tulisi koota erikoiset eristelevyistä; eristekerros on mallissa yhtenäisenä isona kappaleena. Haasteena on myös eristelevyjen asennus elementtiin riittävän tahtiajan puitteissa. Muottiin valettavan sandwich-elementin ylä- ja alaosat kiinnitetään toisiinsa ansaiten avulla, jotka työnnetään eristelevyjen asennuksen yhteydessä eristelevyn vierestä tai läpi siten, että ansain kiinnittyy elementin alaosaan ja ansaimen toinen pää jää eristelevyn yläpuolelle valettavaan betonikerrokseen. Tämän voi tehdä myös robotilla, toisaalta pistokastyyppisten ansaiten asennukseen on jo olemassa automaattisia ratkaisuja maailmalla.

## 4 Valittujen työläjien automatisoinnin taloudellisen toteutettavuuden arviointia rakennuksilla

Kappaleessa 2 esitettiin rakentamisen työläjien automatisointimahdollisuuksia yleisesti. Tässä osiossa käydään läpi valittuja työläjeja ja niiden automatisointiedellytyksiä tuotannollis-taloudellisesta näkökulmasta. Kohteena ovat rakennustyömaalla tehtävät työläjit seuraavasti:

- Maalaus
- Tiilimuuraus
- Lasitus
- Laatoitus

Taloudellisuusarviot tehtiin kaikille neljälle valitulle me-

netelmälle ja niiden tuloksia käsitellään jäljempänä. Esimerkkinä tarkastelutavasta esitetään tarkemmin maalaus. Esimerkissä on tarkoitus tuoda keskusteltavaksi arvioinnissa käytettävät ratkaisuolettamat esityksen ollessa luonteeltaan alustava. Vasta kun laskelman rakenteesta ja muuttujien arvoista on olemassa hyvä näkemys, voidaan taloudellisuusarviota kehittää päätöksen teossa käytettäväksi.

Esimerkki esitetään vaiheittain rakennettuna taulukossa 2, joissa värillisellä kirjaimella viitataan yleensä aiempaan riviin, jossa kulloinkin käytetty lähtötieto esitetään perusteltuna/laskettuna. Vaihtoehtoisesti viitataan kyseisen rivin vasemmalla olevaan sarakkeeseen ("vas.").

**Yleiskuva maalauksesta:**

- Automatisoinnin kohteena on laajojen ja tasaisten pintojen, kuten sisäkattojen ja -seinien maalaus rakennustyömaalla.
- Laitteisto perustuu telalla maalaukseen ja maalinsyöttö tapahtuu ruiskuttamalla maali maalattavalle pinnalle tai syöttämällä maalia telalle.
- Laitteen oletetaan toimivan luotettavasti ja itsenäisesti siinä rajatussa tehtävässä, mihin se on tarkoitettu.

**Työn suoritus ja rajaus**

- Maalauskohteen ympäristön ja siihen liittyvien rakenteiden suojaaminen jäävät työntekijöiden tehtäviksi.
- Laitteisto tekee vain varsinaista maalaustyötä, ei tasoitusta, hiontaa tai pölynpoistoa.
- Laitteiston valvonta ei edellytä erityistä panosta, vaan työntekijät hoitavat sen oman maalaustyön ohessa.
- Laitteen siirrot maalattavien alueiden välillä ja laitteen ohjelmoinnin tekevät maalaustyötä tekevät työntekijät.
- Kulmat, reuna-alueet ja muut maalauksen kannalta vaikeat alueet jäävät työntekijöiden tehtäviksi.

**Taloudellisuus**

- Laskelmat vihjaavat, että automaatiojärjestelmän voisi olla yrityksen näkökulmasta kannattavaa, jos laite maksaisi alle 120 k€ ja sitä käytettäisiin yhdessä työvuorossa hyvällä käyttöasteella viisi vuotta. Käyttö kahdessa vuorossa tekisi automatisoinnista luonnollisesti kannattavampaa, mutta sellainen ei rakennustyömaolosuhteissa liene kovin todennäköistä – tehdasolosuhteissa tämä lienee todennäköisempää.
- Maalauslaitteelle on periaatteessa varsin laajat markkinat, koska käyttötarkoitusta vastaavia töitä

esiintyy kaikissa rakennuksissa, eikä rakennustyyppi tai siinä käytettävät rakenteet rajaa sovellusmahdollisuuksia kohtuuttomasti.

Taulukko 2. Sisämaalauksen automatisoinnin taloudellisuus.

Rivi	Laskelmaoletus	Laskelma
	<b>Muutokset työsaavutuksissa</b>	
A	Tarkasteluyksikkönä on oletettu työntekijän/maalarin tehollisen työajan työsaavutus aikayksikköä kohti.	"100 %" kuvaa yhden työntekijän tehollista työsaavutusta yhtä aikayksikköä kohti (teoreettinen). Kohtien B-E, H ja I arvot lasketaan suhteessa tähän.
B	Ihmisen toiminnassa käytetystä kokonaisajasta vain osa on tehollista työtä (tehollisen menetelmääjan ja ns. työvuoroajan suhde). Tässä osuus on <b>80 %</b> .	Työvuoroaikaan vastaavan työsaavutuksen osuus vastaavan aikajakson tehollisesta työsaavutuksesta: $80\% \text{ (vas.)} * 100\% \text{ (A)} = 80\%$
C	Robotin tehollinen, menetelmäajasta laskettu työsaavutus on hieman työntekijän tehollista työsaavutusta korkeampi, esim. <b>1,2</b> kertainen.	Robotin tehollisen työn työsaavutus suhteessa työntekijän tehollisen työajan työsaavutukseen: $1,2 * 100\% \text{ (A)} = 120\%$
D	Robotin ohjelmointiin yms. käytetty aika vähentää (yhden) työntekijän panosta <b>30 %</b> .	Robotia käyttävän työntekijän todellinen maalaustyösaavutus suhteessa pelkkään maalaukseen keskittyvän työntekijän tehollisen ajan työsaavutukseen: $(1 - 30\% \text{ (vas.)}) * 80\% \text{ (B)} = 56\%$
E	Robotti on käytettävissä teholliseen työhön vain noin <b>70 %</b> kokonaisajasta.	Robotin työvuorotason työsaavutus suhteessa työntekijän tehollisen työajan työsaavutukseen: $70\% \text{ (D)} * 120\% = 84\%$
F	Robotti tekee maksimissaan tietyn osuuden varsinaisesta maalaustyön kokonaistyöpanoksesta.	Osuus on tässä <b>40 %</b> .
G	Tuottavuusedun hyödyntäminen edellyttää robotin mahdollisimman keskeytymätöntä käyttöä. Robotin käyttö on mielekäästä lähtien osana kahden työntekijän ja robotin työryhmää.	Robotin suhteellinen työsaavutus työvuoroaikana on <b>84 % (E)</b> . Robotia ohjaavan työntekijän vastaava työsaavutus on <b>56 % (D)</b> . Tällöin robotin suhteellinen työsaavutus $84\%$ on yli <b>40 % (F)</b> robotin ja yhden työntekijän suhteellisesta työsaavutuksesta: $84\% / (84\% + 56\%) = 60\% > 40\%$

H	Kahden työntekijän vertailu-työsaavutus.	$2 \text{ tt} * 80 \% (B) = 160 \%$
I	Kahden työntekijän ja robotin työsaavutus	$1 \text{ tt} * 80 \% (B) + 1 \text{ tt} * 56 \% (D) + 84 \% (E) = 220 \%$
J	Työsaavutuksen paraneminen.	$(220 \% (I) / 160 \% (H)) - 100\% = 37,5 \%$
<b>Kustannussäästöt</b>		
K	Laskennallinen vuotuinen kokonaistyöaika on 2 000 h, kun vuodessa on n. <b>250 työ/arkkipäivää</b> (työvuorua, tv) ja työvuoron pituus on <b>8 tuntia</b> (h).	$250 \text{ tv (vas.)} * 8 \text{ h/tv (vas.)} = 2 000 \text{ h}$
L	Työntekijäkustannus tuntia kohti.	35 €/h
M	Laskennallisen kahden työntekijän työryhmän vuosittaisen henkilökustannus.	$2 \text{ tt} * 2 000 \text{ h (K)} * 35 \text{ €/th (L)} = 140 000 \text{ €}$
N	Ilman robottia toimivan kahden työntekijän työryhmän henkilökustannus sellaista vuosityösaavutusta kohti, jonka robotin kanssa toimiva kahden hengen työryhmä saa aikaan.	$140 000 \text{ € (M)} * (1 + 37,5 \% (J)) = 192 500 \text{ €}$
O	Työntekijäkustannusten teoreettinen vuosisäästö	$192 500 \text{ € (N)} - 140 000 \text{ € (M)} = 52 500 \text{ €}$
P	Robotin vuosittainen käyttöaste	80 %
Q	Laitteiston vuotuiset lisäkustannukset	10 000 €
R	Työ- ja käyttökustannusten vuosisäästö	$80 \% (P) * 52 500 \text{ € (O)} - 10 000 \text{ € (Q)} = 32 000 \text{ €}$
<b>Investoinnin kannattavuus (esimerkki)</b>		
S	Investoinnin tuottovaatimus (laskentakorko)	10 %
T	Takaisinmaksuaika	5 v
U	Robotin hankintakustannuksen yläraja	$32 000 \text{ € (R)} * [1 - 1/(1+10 \% (S))^5 (T)]/10 \% (S) = 121 305 \text{ €}$

Edellä arvioitiin maalauksessa muodostuvia työ- ja käyttökustannusten vuosittaisen säästöjä, mikäli kyseisissä töissä hyödynnetään automaatiota/ robotiikkaa. Samalla näistä säästöistä laskettiin esimerkinomaisesti yksi raja-arvo robotin hankinta-kustannukseksi, jolla investointi voisi vielä olla kannattava. Laskelmat perustuvat tiettyyn, yhteen laskentakorkoon/tuottovaatimukseen ja takaisin-maksu-aikaan. Nämä arvot eivät ole ehdottomia vaan kyse on enemmänkin päätöksentekijän valinnoista.

Oheisessa taulukossa 3 hankintakustannustarkastelua

laajennetaan tehtäväksi eri takaisinmaksuajoilla ja tuottovaatimuksilla, kun tuottona on taulukossa aiemmin laskettu vuosittainen säästösumma (laskentalogiikan noudattaessa niin ikään edellä esitettyä). Taulukossa esitetään vastaavat tulokset myös muille kolmelle työssä tarkastelluille menetelmille, vaikka niiden tarkempi käsittely tässä muuten ohitetaan

Taulukossa 2 esitettiin laskentatapa, kun robottia käytetään yhdessä työvuorossa. Robotilla on mahdollista tehdä myös kahta työvuoroa. Tällöin vuosittainen tuotto/säästö olisi kaksinkertainen taulukon lukuihin nähden, sillä sekä työkustannuksissa saatavat säästöt, että laitteiston vuotuiset käyttökustannukset kaksinkertaistuvat. Tämä sallisi oleellisesti suuremmat laiteinvestoinnit.

Taulukko 3. Robotin hankintakustannuksen yläraja [€] kannattavalle laiteinvestoinnille.

Tuottovaatimus	5 %		10 %		
	Takaisinmaksuaika	3 vuotta	5 vuotta	3 vuotta	5 vuotta
Maalaus		87000	139000	80 000	121000
Tiilimuuraus		116000	184000	106 000	161000
Lasitus		55000	8 000	50 000	76000
Laatoitus		179000	284000	163 000	249000

## 5 Yhteenveto ja pohdinta

Rakentamisessa teknisesti moni kohde on automatisoitavissa, mutta toimiva toteutus vaatii isoja kehityspainoksia. Käytännössä tulisi kehittää robotiikkaan perustuvia ratkaisuja, joita markkinoitaisiin kansainvälisesti. Se vaatisi riskisijoituksia. Laskelmiemme perusteella robotilla saavutettava kustannussäästö vaatii korkeaa käyttöastetta, joka voi olla vaikeasti toteutettavissa, mikäli robotti voi tehdä vain yhtä työtä/työvuoroa. Hyvä käyttösuhde on vaikea toteuttaa työmaaoissa. Liikuttaminen ja työn aloittaminen aina uudessa tilanteessa vie resursseja. Robotin sovittaminen työmaiden aikatauluihin tuo myös omat haasteensa. Robotin monikäyttöisyys voisi parantaa tilannetta. Robotti vaatii kuitenkin rakentamisessa todennäköisesti aina ihmisen avustamaan työtä tai valvomaan robotin toimintaa, joka osaltaan vähentää kiinnostusta robottien hyödyntämiseen. Rakentamisessa onkin siirrytty ja tullaan myös jatkossa siirtämään töitä yhä enemmän esivalmistukseen, jossa automatisoinnilla on jo paremmat edellytykset.

## Viitteet

[1] Lohilahti, O. Rakennusalalla työn tuottavuus ei ole

kasvanut 40 vuodessa – onko allianssista tai leanista apua?, Rakennuslehti, 4.7.2017.

- [2] Council for Construction Robot, March 1999, Construction Robot System Catalog in Japan, Japan.
- [3] Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Heikkilä, R., Survey on Automation of the Building Construction and Building Products Industry, VTT technology 109, VTT, 2013.
- [4] Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Gambao, E., Extending automation of building construction: Survey on potential sensor technologies and robotic applications. Automation in Construction, 2013, 36 168-178.
- [5] Rakennustietosäätiö, 2019, Ratu-kortisto (päivittyvä), Rakennustieto, Helsinki.