

# BYGGAUTOMATION OCH ROBOTAR INOM ANLÄGGNINGS- BYGGANDE

*En rapport från Nationellt nätverk för  
byggautomation*

**Madeleine Hoeft, Susanna Kronsell, Sohail  
Manzoor, Fredrik Johansson, Anna Gustafson,  
Tobias von Haslingen, Kent Eriksson**

**2022-11-10**

# FÖRORD

Denna studie utgör en del av projektet Nationellt nätverk för byggautomation. Det övergripande syftet med projektet är att samordna de olika forskningsinsatserna inom byggsektorn i Sverige för att få ökad nationell samverkan, kunskapsutbyte inom området automatiserat byggande och skapa förutsättningar för testbäddar.

Projektet har finansierats av det strategiska forskningsprogrammet Smart Built Environment och Svenska Byggbranschens utvecklingsfond, SBUF. Projektets arbetsgrupp består av författarna. En referensgrupp har bistått projektet med värdefulla kommentarer under arbetet bestående av: Lars Albinsson (Maestro), Tommy Ellison (Besab), Robert Larsson (Cementa), and Hans Alenius (Digital Route). Dessutom har en styrgrupp bistått projektet med värdefulla synpunkter på arbetet och initieringen av det nationella nätverket för automatiserat byggande bestående av: Pontus Gruhs (Trafikverket), Ronny Andersson (Cementa), Mats Emborg (LTU), Jan Hillgård (JAHIL AB), Nils Rydén (Peab), Lars Redtzler (Byggföretagen), Johan Silfwerbrand (KTH), Joakim Jeppsson och Ulf Håkansson (Skanska), Thomas Nolte (Mälardalens Universitet), Christina Claeson-Jonsson (NCC) och Torbjörn Glad (JM).

Ett stort tack riktas också till talare och deltagare i temadagarna om automatiserat byggande som hölls i maj 2021.

Stockholm, November 2022

*Madeleine Hoeft*

*Susanna Kronsell*

*Sohail Manzoor*

*Fredrik Johansson*

*Anna Gustafson*

*Tobias von Haslingen*

*Kent Eriksson*

# SAMMANFATTNING

I Sverige, och även i många andra länder, är byggindustrin och transportinfrastrukturen av stor och växande betydelse för samhället och ekonomin. Byggindustrin omsätter 11 % av svensk bruttonationalprodukt (BNP) (Byggföretagen 2021) och Trafikverket planerar att investera 799 miljarder kronor under perioden 2022-2033 (Regeringen 2021). Samtidigt har kostnaden för infrastrukturprojekt ökat mer än konsumentprisindex (KPI) (Trafikverket 2021). En möjlig orsak till denna ökning är en sämre utveckling av produktiviteten jämfört med andra branscher. En förbättrad produktivitet och effektivitet inom transportinfrastrukturen och byggbranschen är därför nödvändig. En sätt att öka produktiviteten och även förbättra arbetsmiljön samt hållbarheten är genom en automatisering och digitalisering av byggbranschen.

Syftet med föreliggande rapport har varit att identifiera pågående initiativ och existerande forskningstrender inom byggautomation med fokus på anläggningsbyggande, både nationellt och internationellt; samt vilka potentialer och utmaningar som existerar för en utveckling av byggautomation. Vidare har förutsättningarna för implementering av automation inom byggindustrin studerats. Forskningsfrågorna studerades genom en litteraturstudie samt genom anordnande av två temadagar.

Den utförda litteraturstudien visar på en tydligt ökande trend, både nationellt och internationellt, inom automatisering, digitalisering och robotisering inom byggbranschen. Samma trend kan också ses inom anläggningsbyggande för vägar, broar, tunnlar samt inom gruvindustrin.

Med gruvindustrin som förebild bör byggbolag, universitet, leverantörer och beställare tillsammans med små och medelstora företag (SMEs) samlas för att ta fram en gemensam vision och en strategisk färdplan för att driva igenom en automatisering och digitalisering av branschen. En utveckling av både tekniska, organisatoriska och finansiella strukturer krävs, där utvecklingen av ett attraktivt affärsekosystem som möjliggör uppskalning av byggautomation kan genomföras. Tvärvetenskapliga samarbeten, testbäddar i tidigt skede, kompetensutveckling, ny finansieringsinfrastruktur och en gemensam vision för ökad säkerhet, högre produktivitet och lägre klimatpåverkan är avgörande för att skapa förutsättningar för byggautomation.

Föreliggande rapport är en svensk sammanfattning av rapporten Construction Automation and Robotics within Infrastructure som skrivits inom ramen för detta projekt.

**Nyckelord:** byggautomation, robotik, infrastruktur, livscykelperspektiv

# INNEHÅLL

<b>1. INLEDNING</b> .....	<b>5</b>
1.1 BAKGRUND .....	5
1.2 SYFTE .....	6
1.3 DISPOSITION .....	6
1.4 DEFINITIONER .....	6
1.5 BEGRÄSNINGAR .....	8
<b>2. METODIK</b> .....	<b>9</b>
2.1 LITTERATURSTUDIE .....	9
2.2 PÅGÅENDE AKTIVITETER I SVERIGE .....	10
2.3 TEMADAGAR .....	10
<b>3. LITTERATURSTUIDE</b> .....	<b>12</b>
3.1 BYGGAUTOMATION .....	12
3.1.1 Geografiskt fokus .....	12
3.1.2 Publikationskällor .....	13
3.1.3 Forskningsområden .....	13
3.1.4 Historisk utveckling .....	15
3.1.5 Nya ämnesområden .....	16
3.1.6 Fördelar och utmaningar .....	16
3.1.7 Framtida steg .....	17
3.2 AUTOMATION INOM INFRASTRUKTUR .....	18
3.2.1 Motorvägar .....	19
3.2.2 Broar .....	20
3.2.3 Tunnlar .....	22
3.2.4 Gruvor .....	23
3.3 SAMMANFATTNING .....	26
<b>4. PÅGÅENDE AKTIVITETER I SVERIGE</b> .....	<b>27</b>
4.1 INLEDNING .....	27
4.2 TIDIGA ARBETEN .....	27
4.3 PÅGÅENDE ARBETE .....	27
4.3.1 Akademi .....	27
4.3.2 Industri .....	28
4.4 FORSKNINGSFINANSIÄRER .....	29
4.5 FRAMTID OCH TRENDER .....	29
<b>5. TEMADAGAR</b> .....	<b>31</b>
5.1 INLEDNING .....	31
5.2 TEMADAG 1 – DET TEKNISKA PERSPEKTIVET .....	31
5.3 TEMADAG 2 – DET ORGANISATORISKA & EKONOMISKA PERSPEKTIVET .....	33
<b>6. DISKUSSION</b> .....	<b>35</b>
6.1 PÅGÅENDE INITIATIV OCH TRENDER .....	35
6.2 MÖJLIGHETER OCH UTMANINGAR .....	37
6.3 KRAV FÖR IMPLEMENTERING .....	39
6.4 AFFÄRSMODELLER, PROJEKT OCH KONSEKVENSER FÖR DERAS EKOSYSTEM .....	41

7. SLUTSATSER .....	43
8. REFERENSER.....	44

# 1. INLEDNING

Föreliggande rapport är en svensk sammanfattning av rapporten ”*Construction Automation and Robotics in Infrastructure*” (Hoeft et al. 2022). Rapporten finns tillgänglig för fri nedladdning i publikationsdatabasen Diva.

## 1.1 Bakgrund

Kostnaden för Svenskt fastighets- och infrastrukturbyggande uppgick till 546 miljarder SEK år 2020 (Byggföretagen 2021). Det motsvarar ca 11 % av Sveriges BNP. Enligt Svenska statens proposition för transportinfrastruktur 2022-2033 planeras det under nästa tioårsperiod att investeras 799 miljarder SEK (Regeringen 2021). Propositionen baseras på rapporten ”Förslag på nationell plan för transportinfrastrukturen 2022-2033 av Trafikverket” (Trafikverket 2021). Ungefär 80 % av de planerade investeringarna är för järnväg och ca 15 % är för vägnätet. Investeringarna inkluderar både nybyggnation, reparation och förvaltningskostnader av existerande byggnationer. 104 miljarder SEK är planerade för den nya höghastighetsjärnvägen.

Med de planerade investeringarna inom infrastrukturområdet det kommande årtiondet är det viktigt att design, konstruktion och underhåll genomförs effektivt. Enligt Trafikverket (2021) har kostnaderna för större infrastrukturprojekt ökat mer än konsumentprisindex, KPI. Till exempel kan det konstateras att när man jämför de projekt som ännu inte har startats, med beräknade kostnader för projekten i den föregående nationella planen för åren 2018-2029, så har kostnaderna ökat med mer än 50 %. Det finns flera orsaker för ökningen, en förklaring är enligt Trafikanalys (2021) lägre produktivitetsutveckling i transportinfrastruktursektorn jämfört med andra Svenska industrisektorer. En slutsats som stöds av Albinsson (2019) som baserat på data från SCB visar att kostnaderna för bostadsbyggande de senaste 20 åren har ökat åtta gånger mer än KPI.

Det är tydligt att ökad produktivitet och effektivitet inom transportinfrastrukturen behövs. Samhället kan spara stora summor pengar, minska användningen av naturresurser och utsläppen av koldioxid samt stärka den svenska byggbranschens konkurrenskraft. Enligt det klimatpolitiska ramverket ska Sverige ha noll nettoutsläpp av växthusgaser i slutet av 2045 (Regeringen 2020). Ska detta vara möjligt krävs en omställning av byggbranschen mot effektivare projektering, byggande och underhåll.

Det sker idag en exponentiell teknologisk utveckling som driver utvecklingen inom områdena digitalisering, robotik och artificiell intelligens. Detta gör att konstruktionen av enstaka unika element eller moduler kan tillverkas på ett mer automatiserat sätt. Monotona eller farliga arbetsuppgifter kan ersättas med produktion av robotar. Ett exempel är den utveckling som Skanska driver kring automatiserad produktion av armeringskorgar tillsammans med Mälardalens universitet (SBUF 2022), vilken har potential att öka produktiviteten för denna typ av byggverksamhet. Samtidigt försvinner de ohälsosamma arbetsställningarna som najning av armeringsjärn utgör. Utvecklingen av autonoma system skapar förutsättningar för utveckling av automatiserade byggarbetsplatser med exempelvis realtidsuppdatering av framstegen på byggarbetsplatsen och möjligheter till effektivare underhåll. Additiv tillverkning i kombination med användning av nya typer av material och produktionsmetoder kan bl.a. skapa ny exotisk design. Dessa tekniker är grunden till författarnas övertygelse att effektivare design och ökad produktivitet av konstruktion och underhåll kan uppnås – en uppfattning som delas med Trafikverket som bedömer att det finns en potential att öka produktiviteten genom att implementera nya tekniker inom digitalisering, automation och elektrifiering (Trafikverket 2021).

## 1.2 Syfte

Denna rapport syftar till att besvara följande tre forskningsfrågor:

- 1) Vilka är de pågående initiativen och befintliga forskningstrenderna inom området byggautomation med fokus på infrastruktur, både ur ett internationellt och också ett nationellt, svenskt, perspektiv?
- 2) Vilka är potentialerna och utmaningarna med byggautomation och robotik?
- 3) Vad behövs för storskalig implementering av automations- och robotlösningar i byggindustrin?

## 1.3 Disposition

Rapporten består av 7 kapitel, där kapitel 1 belyser bakgrund och definierar byggautomation med hjälp av några olika modeller. Kapitel 2 beskriver metodiken som använts. I kapitel 3 presenteras resultaten av litteraturstudien med fokus på områdets status idag, trender och framtida möjligheter, följt av exempel på infrastrukturområdet (motorvägar, broar, tunnlar och gruvor). I kapitel 4 beskrivs pågående aktiviteter i Sverige. Kapitel 5 sammanfattar två utförda temadagar. Det samlade materialet diskuteras i kapitel 6 med fokus på pågående trender samt potentiella möjligheter och utmaningar för byggautomation. Slutsatser och rekommendationer för fortsatt arbete presenteras i kapitel 7.

## 1.4 Definitioner

Enligt Howe (1998), är huvudskillnaden mellan tillverkning/byggnation i byggindustrin och tillverkning i andra typer av industrier att arkitekturen för byggnader är unik för varje byggnation. Det resulterar i ett behov av produktionsmetoder av enstaka och unika komponenter – något som beskriver huvudutmaningarna av automatisering inom byggindustrin.

Byggautomation definieras med användandet av automation ofta i form av ett robotsystem. För att beskriva området byggautomation kan området delas upp i två huvudområden: (i) robotar som används på byggarbetsplatsen och (ii) robotar som används i en tillverkningsprocess för att skapa prefabricerade byggelement som transporteras till byggarbetsplatsen. Det finns också exempel på produktionsprocesser för prefabricering som skapas vid byggplatsen för att minska transporter och transportkostnader.

Redan under 1980-talet utvecklades ett 150-tal olika typer av automatiserade system eller robotar i Japan specialiserade för byggindustrin. Åhman (2013) kategoriserade dem i följande fyra kategorier: (i) konstruktion av ramverk, (ii) efterbearbetning, (iii) inspektion och (iv) underhåll. De kategorier som nämns av Åhman (2013) är alla exempel på robotar med en enda uppgift, så kallade *Single Task Robots, STR*. Många av robotarna är tvungna att arbeta i en avgränsad arbetscell. En arbetscell är en plats där en robot arbetar – ofta avspärrad för mänsklig interaktion eller ingripande på grund av risken för skador. En byggarbetsplats består dock ofta av en stor yta, vilket innebär att robotar som används på en byggarbetsplats behöver kunna röra sig på byggarbetsplatsen. Det ställer andra krav, bland annat krav på att robotar behöver vara medvetna om sin omgivning och kunna kommunicera med varandra för att kunna fatta alla beslut på byggarbetsplatsen som behövs för att slutföra byggnationen. Idag innebär dessa krav begränsningar för vilka arbetsmoment som robotar kan utföra på byggarbetsplatsen.

Följande notation av robotar introducerades av Moravec (2000) för att beskriva utvecklingen av robotteknologi fram till 2040 med uppdelning i generationer med avseende på intelligens och intellektuella förmågor: (i) *generation zero*, används för att beskriva tidigare utvecklingar av robotar, (ii) *first generation robots* med en autonomi och intellektuell kapacitet som är jämförbar med intelligensen hos en ödla (tillgänglig: 2010), (iii) *second generation robots*, kapabla att lära och vars

intelligens är jämförbar med en mus (tillgänglig: 2020), (iv) *third generation robots*, som är jämförbar med intelligensen hos en apa (tillgänglig 2030), och (v) *forth generation robots* med en intelligens jämförbar med människans (tillgänglig: 2040).

Bock et al. (2012) gjorde en omfattande kategorisering av mer avancerade teknologier för byggautomation, inklusive exoskelett och humanoider, se Figur 1. Bock et al. (2012) använde arbetsmiljön som en dimension, från strukturerad till mer och mer ostrukturerad samt mängden av mänsklig interaktion till mer och mer "Ambient intelligence" som den andra dimensionen. De drog slutsatsen att det skulle finnas olika generationer av robotar med olika mängd intelligens. Bock & Linner (2015) kategoriserade utvecklingen i fem olika områden: (i) *robot-oriented design* (design- och ledningsverktyg för att införa automation och robotik i byggandet), (ii) *robotic industrialization*, industrialisering av byggnation med hjälp av robotar (automation och robotik för att skapa kundangepassade komponenter, moduler och prefabricerade detaljer för byggnation), (iii) *construction robots* (elementära tekniker och enkla *single task* konstruktionsrobotar), (iv) *site automations* (automatiserade/robotbaserade fabriker på plats), *ambient robotic* (teknik för underhåll, assistans och service).

Kategoriseringen gjord av Moravec (2000) baseras huvudsakligen på automatisering av allt mer komplexa uppgifter medan kategoriseringen från Bock et al. (2012) och Bock & Linner (2015) fokuserar på byggandet och innehåller till exempel inte logistik eller transporter, vilka är en del av problemet. Howe (1998) drog slutsatsen att ett top-down synsätt behövs för att förstå de förändringar som behöver göras i designprocessen, och menar vidare att designprocessen måste göras medveten om tillverkningsmetoden och dess begränsningar. Bock (1988) föreslog "Robot-Oriented Design, ROD" som ett sätt att göra designen medveten om den robotiserade tillverkningsmetoden. På samma sätt har NASA skapat "Design guidelines for automatic assembly in outer space" (Dwivedi et al. 1989). Detta visar att design för tillverkningsbarhet eller design för automation behöver användas och ingå i byggautomation. Howe (1998) drar vidare slutsatsen att byggautomation påverkar hela byggprocessen. För att tillgodogöra sig fördelarna med automatiserat byggande måste en ny logistikkedja arrangeras inklusive: design för robotar, logistik, transport och materialhantering. Därmed kan man dra slutsatsen att hela kedjan måste digitaliseras och automatiseras för att tillgodogöra sig alla fördelar

Exoskeletons and Humanoid Robots in Construction		Ambient intelligence				
		Human interaction				
		Element Technology	Sub Systems	Total Systems	Autonomous Systems	Disrupted Systems
Structured environment	Mining, dam, Tunneling, Road construction	Generation 0 robots				
	Stationary industry (Component, prefab)					
	On-site construction	Generation 1 robots				
	Facility Management					
	Unstructured environment	Services in built environment (Building to City Scale)	Generation 2 robots			

Figur 1 Kategorisering av utvecklingsområden för exoskelett och humanoida robotar inom byggindustrin (Återskapad från Bock et al. (2012)).



I denna rapport definieras *Byggautomation* som automation av enstaka arbetsmoment, single task construction robots (STCR), till mer avancerade automatiserade system som är uppbyggda av single task construction robots (STCR) eller andra mer avancerade automatiserade system, som övervakas och kontrolleras av en övergripande automatiserad process eller AI baserad kontroll och övervakningsfunktion. Definitionen inkluderar design, konstruktionsprocessen samt drift och underhåll tillsammans med en övergripande logistikkedja – med det övergripande syftet att minska mängden insatser från en mänsklig operatör och på så sätt uppnå högre produktivitet, en säkrare arbetsmiljö och minska mängden fel.

## 1.5 Begränsningar

Litteraturstudien i kapitel 3 baseras endast på granskade artiklar från databasen Scopus. Det säkerställer en hanterbar omfattning och hög kvalitet på referenserna, men metoden utesluter publikationer och konferensartiklar som kan vara relevanta ur ett branschperspektiv. För att hantera denna begränsning baseras genomgången av pågående verksamhet inom automatiserat byggande i Sverige, kapitel 4, även på andra relevanta källor såsom konferensbidrag och forskningsrapporter m.m.

Rapporten fokuserar på tillämpningar av byggautomation i en infrastrukturkontext. Automatiserat bostadsbyggande ingår inte, även om slutsatserna och diskussionen i kap 6 och resultatet i kap 7 är allmängiltiga och kan användas för bostadsbyggande på samma sätt som för infrastrukturbyggande.

Dessutom är exemplen på automatiserat byggande begränsade till beskrivningen av relevanta tekniker som används i en svensk kontext (t.ex. studeras endast borra-ladda-spräng metoden vid tunneldrivning), även om andra tekniker används på andra håll i världen.

Slutligen representerar aspekterna av branschdiskussionerna ett svenskt perspektiv och kan skilja sig från andra länder, även om de i stor utsträckning överlappar med rön från internationell forskning.

## 2. METODIK

För att besvara de tre forskningsfrågor som anges i kapitel 1.2 valdes en metodik som omfattade tre huvudaktiviteter: (i) en systematisk litteraturstudie i Scopus databas om automatiserat byggande med särskilt fokus på infrastruktur, (ii) en identifiering av pågående forskning och befintliga forskningscentra inom akademi och industri i Sverige kombinerat med en kompletterande litteraturöversikt för att identifiera publicerad forskning i Sverige som inte omfattas av granskningen i databasen Scopus, och (iii) temadagar där deltagare från industri och akademi presenterade pågående forskning och diskuterade utmaningar för implementering av automatiserat byggande i Sverige. I följande underkapitel ges en mer detaljerad beskrivning av metoden för respektive aktivitet.

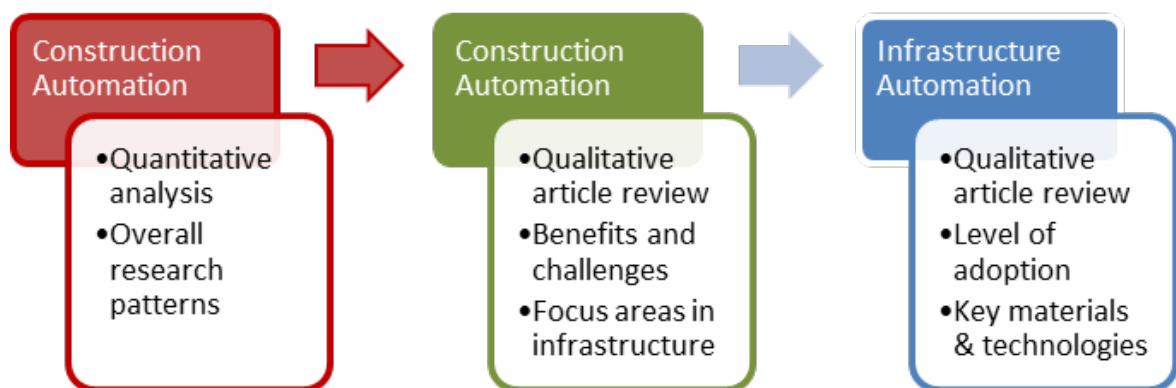
### 2.1 Litteraturstudie

Litteraturöversikten i databasen Scopus belyser nyckelområden och forskningsmönster inom området byggautomation, med särskilt fokus på utvalda infrastrukturuområden. En illustration av stegen som följts för litteraturstudien visas i Figur 2.

Alla analyser som gjordes i litteraturstudien baserades på sökresultat som hämtades från databasen Scopus i november 2020. Scopus är en av de stora vetenskapliga databaserna som spänner över olika vetenskapliga områden och innehåller, i jämförelse med Web of Science, fler artiklar från de senaste åren, vilket ansågs viktigt inom det ganska nya området byggautomation som anges av Aghaei Chadehghani et al. (2013) och Hosseini et al. (2018). Alla sökningar var begränsade till vetenskapliga tidskriftsartiklar och endast engelska resultat beaktades.

Först analyseras det mer allmänna ämnet byggautomation. Ett bibliometriskt tillvägagångssätt antogs för att få en översikt över trender inom byggautomationsforskningen när det gäller dominerande nyckelord, tidskrifter och geografiska regioner. Sökningen fokuserade på publikationer med sökorden "Construction Automation" i sina titlar, abstracts eller nyckelord och gav totalt 140 artiklar varav 129 artiklar var tematiskt relaterade. Resultaten presenteras med hjälp av Bibliometrix for R, ett litteraturgranskningspaket för visualisering av bibliometriska kluster och nätverk (Aria & Cuccurullo 2017).

Baserat på dessa resultat valdes nyckelområden inom automation av infrastruktur med fokus på motorvägar, broar och tunnlar. I Tabell 1 presenteras de sökordskombinationer (kopplade till AND, t.ex. automation AND construction AND highway) som används för att filtrera relevanta forskningsbidrag i Scopus.



Figur 2 Struktur över ingående aktiviteter i litteraturstudien som utförts i databasen Scopus.

**Tabell 1 Sökresultat för nyckelord**

Sökta nyckelord i Scopus	Motorväg	Bro	Tunnel
Automation AND Construction	64	75	71
Robotics AND Construction	29	38	29
Additive Manufacturing AND Construction	0	9	0
Control System AND Construction	98	0	94
Operation AND Automation	124	139	61

## 2.2 Pågående aktiviteter i Sverige

Identifiering av befintliga forskargrupper inom akademi och industri identifierades. De största universiteten i Sverige ingick, tillsammans med de där projektgruppen visste att forskning om byggautomation bedrivs. Följande lärosäten ingick: Chalmers Tekniska Högskola, Lunds Tekniska Högskola (LTH), Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Luleå tekniska universitet (LTU), Linköpings universitet och Mälardalens universitet.

En kompletterande litteraturgenomgång genomfördes också för identifiering av utförd och pågående forskning inom de svenska byggföretagen och forskningsinstituterna. Denna kompletterande litteraturöversikt fokuserade på forskningsrapporter publicerade av den Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Stiftelsen för Svensk Bergteknisk Forskning (BeFo) och de strategiska innovationsprogrammen Smart Built Environment och InfraSweden2030. Dessutom genomfördes allmänna sökningar på webben och projektgruppen hade personlig kommunikation med olika byggföretag.

## 2.3 Temadagar

Två temadagar hölls i maj 2021, där de tekniska möjligheterna och hindren samt affärsmodeller för att möjliggöra kommersiellt gångbara användningsfall diskuterades. De tematiska dagarna organiserades och modererades av projektgruppen för Nationellt Nätverk för Byggautomation med talare och deltagare från både byggindustrin, gruvindustrin och robotindustrin.

### Temadag 1: Det tekniska perspektivet

Den första temadagen fokuserade på att förstå nuvarande och framtida tekniska tillämpningsområden för automatiserat byggande.

Ämne	Talare
<i>Gruvautomation</i>	Peter Burman (Boliden) Jenny Greberg (LTU)
<i>Byggautomation</i>	Ulf Håkansson (Skanska) Lars Petterson (Skanska)
<i>Robotar för automation</i>	Robert Andersson (LTH) Helena Eriksson (Cognibotics)

### Temadag 2: Det organisatoriska & ekonomiska perspektivet

Fokus för den andra temadagen låg fokus på de organisatoriska och ekonomiska förutsättningar som är nödvändiga för att möjliggöra implementering av automatiserat byggande. Lars Albinsson var inbjuden som moderator.

**Ämne**

*Vad krävs för  
implementering?*

*Beställarens roll*

*Affärsmodeller*

**Talare**

Susanne Nelleman Ek (BIM Alliance)

Lars Albinsson (Maestro)

Bernt Henrikssen (Automation Region)

Samuel Holmström (Lundqvist Trävaru)

Professor Kent Eriksson (KTH)

## 3. LITTERATURSTUIDE

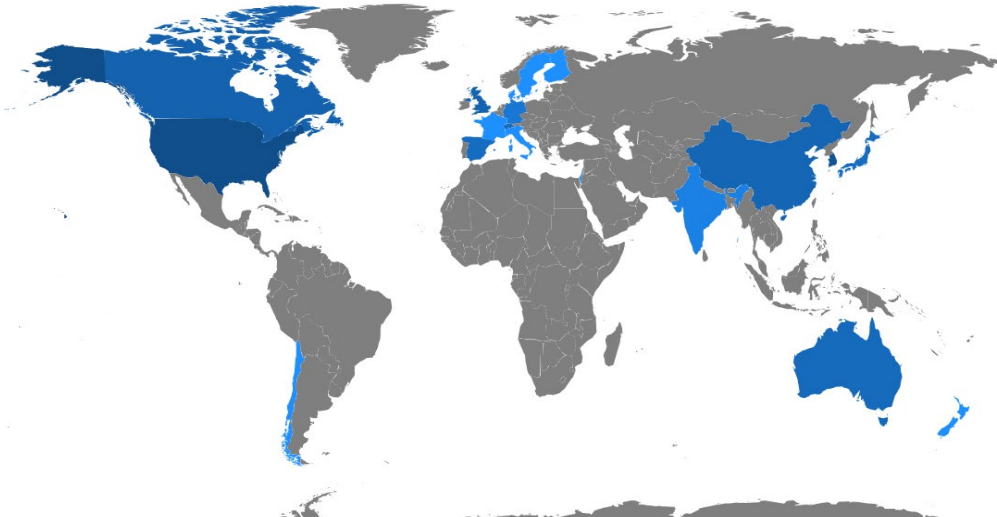
### 3.1 Byggautomation

I följande avsnitt presenteras de geografiska och aktuella mönster som identifierats i den bibliometriska analysen med hjälp av Bibliometrixpaketet i R samt en litteraturgenomgång av nyckelartiklar inom byggautomation.

#### 3.1.1 Geografiskt fokus

Såsom illustreras i Figur 3 är de mest produktiva länderna inom byggnadsautomation baserat på antalet publicerade artiklar i databasen Scopus följande (observera att antalet artiklar räknas baserat på författare, vilket resulterar i mer än 140 artiklar som nämns i avsnitt 2.2):

- **USA** (151 författare) and **Kanada** (30) i Nordamerika
- **Sydkorea** (87), **Kina** (22) and **Japan** (13) i Asien
- **Australien** (17) samt
- **Storbritannien** (26), **Spanien** (13) and **Schweiz** (13) i Europa.



**Figur 3** Mest produktiva länderna med avseende på författarfrekvens för söktermen "Construction automation".

En majoritet av forskningsinsatserna om byggautomation är kopplade till följande institutioner angivna i Tabell 2.

**Tabell 2** Ledande forskningsinstitutioner som arbetar med byggautomation

<i>Land</i>	<i>Institution</i>
<i>USA</i>	North Carolina State University, Georgia Tech, Stanford University
<i>Kanada</i>	University of Alberta, University of Waterloo
<i>Sydkorea</i>	Korea University, Hanyang University, Inha University, Yonsei University, Chung-Ang University
<i>Kina</i>	Tsinghua University, Ningbo University
<i>Japan</i>	Osaka University, Keio University
<i>Australien</i>	UT Sydney, Western Sydney University
<i>Storbritannien</i>	Loughborough University, University of Central Lancashire
<i>Spanien</i>	University Carlos III Madrid
<i>Schweiz</i>	ETH Zurich
<i>Tyskland</i>	RWTH Aachen, Technical University Munich

Rankad efter artikelcitat är USA (775 totala citat / 20,95 genomsnittliga artikelcitat), Storbritannien (566/141,5), Korea (460/18,4), Kanada (74/24,67), Kina (62/8,86), Tyskland (40/40) och Schweiz (24/12) ledande.

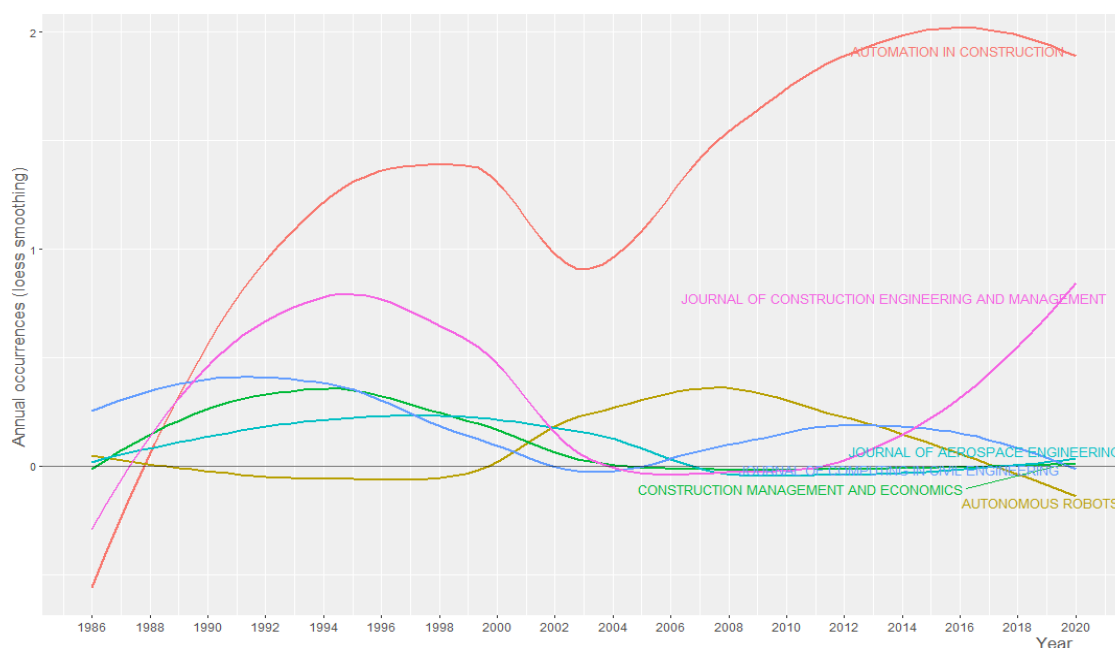
### 3.1.2 Publikationskällor

När det gäller källorna är den överlägset mest populära tidskriften "Automation in Construction", följt av "Journal of Construction Engineering and Management" och "Journal of Computing in Civil Engineering".

Tabell 3 redovisar det totala antalet artiklar per tidskrift, medan den årliga tillväxten för varje tidskrift visas i Figur 4.

**Tabell 3 Mest relevanta tidskrifter rankad efter antalet artiklar.**

<i>Tidskrift</i>	<i>Artiklar</i>
Automation in Construction	45
Journal of Construction Engineering and Management	11
Journal of Computing in Civil Engineering	7
Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	4
Construction Management and Economics	4
Autonomous Robots	3

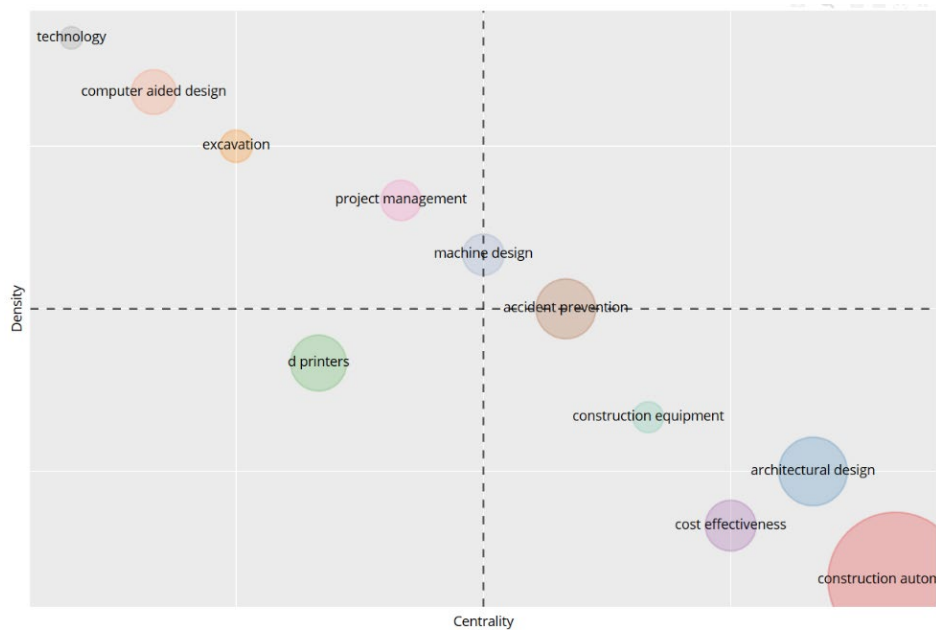


**Figur 4 Tillväxt för relevanta tidskriftsartiklar under perioden 1985 till 2020.**

### 3.1.3 Forskningsområden

Dominerande ämnen i den ledande tidskriften "Automation in Construction" är användningen av byggnadsinformationsmodeller (BIM) samt applikationer för artificiell intelligens och djupinlärning från design till bygglösning och underhåll. Det kan också noteras att begrepp relaterade till säkerhet och hållbarhet också är relativt vanligt förekommande såsom illustreras i Figur 5.





**Figur 7 Tematisk karta – ”Construction automation”**

### 3.1.4 Historisk utveckling

Bock (2015) beskriver tillämpningen av ny teknik i byggbranschen som S-formad för att beskriva tillväxten inom byggautomation, vilken började med tidiga innovationer inom konventionell konstruktion mellan 1970 och 2010, innan den förvandlades till en disruptiv tillväxtfas av mer automatiserat byggande efter 2010, vilket ledde till prestandaförbättringar och en mer mogen och bredare implementering i hela sektorn.

En viktig underliggande drivkraft för dessa förbättringar har varit den snabba utvecklingen av datorhårdvara och programvara, vilket möjliggjorde framsteg inom t.ex. "robotstyrning, sensorer, lokalisering, kartläggning och planering"(Kim et al. 2015).

Son et al. (2010) fann att det ursprungliga forskningsfokuset främst har varit på byggfasen (76%). Dominerande ämnen inkluderade byggledningssystem samt sensorer och avkänning för hantering på plats förutom styr- och automationssystem för byggrobotar. I mindre utsträckning omfattas användningen av verktyg för konstruktionsstöd i planeringsfasen eller övervaknings- och inspektionssystem i driftsfasen. Samma artikel visade också att forskningsinsatser, även om de till största delen utförs av den akademiska världen, ofta inte samordnas med industrin och därför behövs en mer samarbetsinriktad strategi bland FoU-instanser (akademi, forskningsinstitut, privat sektor och regering) för att påskynda innovation.

I Sverige redogjorde Åhman (2013) för utvecklingen på området under de senaste tre decennierna. Enligt honom genomfördes den första projektkartläggningen 1987/88 med avsikt att identifiera möjligheterna att använda robotik i byggandet. Vid den tidpunkten ansågs Japan, USA och Frankrike bland några andra länder ledande, med de första robotarna som faktiskt testades på plats i Japan. 1989-1995 inleddes ett pilotprojekt för att ta fram prototyper i Sverige. Medan robotar hade använts i fabriksmiljöer under en längre tid, var forskningen i detta projekt inriktad på hur man anpassar tekniken i den mycket oförutsägbara, heterogena utomhusmiljön på en byggarbetsplats och säkerställer dess flexibilitet samt arbetarnas säkerhet.

Efter att framgångsrikt ha testat prototyper för betongslipning i laboratorium och på en byggarbetsplats i Göteborg tillsammans med ett nätverk av nationella aktörer, öppnades perspektivet för internationellt samarbete. Sverige grundade tillsammans med representanter från



USA, Japan, Frankrike, Storbritannien och Israel International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC) 1985, och bildade senare en huvuddel i International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), som grundades året innan av forskare i USA. Huvudsyftet med detta arbete var, och är fortfarande, att samla in information om framsteg inom området och sprida denna kunskap genom olika medier och evenemang runt om i världen.

På 1990-talet och början av 2000-talet genomfördes flera tillämpade fall som backades upp av högre standardisering, mer sofistikerad CAD-programvara och tidiga BIM-verktyg. Icke desto mindre ledde globala finansiella kriser, svårigheten att anpassa designpraxis med automatiserat byggande samt bristen på skalbarhet för dessa unika projekt till ett övergripande lägre engagemang inom området och avbrytandet av vissa satsningar. Sedan 2010 har dock intresset för området fått ett betydande momentum, vilket beskrivs av Bock med S-kurvan. Detta kunde bl.a. noteras genom ett växande antal deltagare i ISARC-symposierna och större FoU-investeringar i flera länder som resulterade i alltmer skalbara lösningar.

### 3.1.5 Nya ämnesområden

Kim et al. (2015) listar flera praktiska tillämpningar som har gynnats av de senaste framstegen inom programvara och hårdvara, såsom mätprocesser och kvalitetskontroller (snabbare kontroll av konstruktionsnoggrannhet, förebyggande av arbetsskador, automatiserad bild- / modellkartläggning och förbättrad utrustningskalibrering), särskilt inom schaktning, tunneldrivning och infrastrukturövervakning. Förbättrad kommunikation mellan plattformar och användning av RFID-spårning möjliggör också bättre projektkontroll och kvalitet. Dessutom utvecklas risk- och säkerhetshantering samt innovation inom hållbarhet, t.ex. genom verktyg för livscykelanalys, mot bakgrund av en högre automatiseringsnivå.

Dessa resultat stöds också av Kim et al. (2020), som utförde en nätverksanalys på olika sökord som visade ett högt forskningsintresse för användning av modellering och simulering för bättre byggnadsprestanda samt fokus på hårdvara för realtidsövervakning av byggutrustning och platser. Däremot visade resultaten på ett mindre intresse för utveckling av kostnads- och informationshanteringssystem. När det gäller teknik fick realtidsavkänning (t.ex. närhetsdetektering, materialspårning och strukturell beteendeövervakning) och simuleringstekniker mest uppmärksamhet nyligen. Kopplat till dessa resultat och i linje med resultaten av den bibliometriska översikten i denna rapport, pekar Aghimien et al. (2019) vidare mot kommande ämnen som tillämpningar av maskininlärning och digitalisering.

Med hänsyn till de nya framstegen föreslår Gharbia et al. (2020) att ett vidare perspektiv kring byggautomation behövs, från enskilda byggaktiviteter (t.ex. additiv tillverkning, automatiserad installation, montering eller murning) mot en mer integrerad robotiserad byggarbetsplats inklusive innovativa material, förbättrad robothårdvara och strömlinjeformade byggarbetsflöden.

### 3.1.6 Fördelar och utmaningar

Högre automatiseringsnivå är ofta förknippad med förbättrad produktivitet och bättre säkerhet på arbetsplatsen. Dessutom kan en förbättrad kommunikation och samarbete mellan intressenter, liksom potentialen att öka marknadsandelarna, förväntas (Chen et al. 2018).

Pan et al. (2018) sammanfattar förväntningarna som sådana att genom att koppla samman det operativa och strategiska beslutsfattandet genom teknik, automatisering och robotik kommer detta leda till mer hållbart byggande för förvaltning av byggnader och infrastruktur när det gäller ekonomiska, miljömässiga och sociala faktorer.

Även om potentialen för automatisering och robotik för byggsektorn är allmänt erkänd, hålls branschaktörer fortfarande tillbaka av en mängd olika hinder för deras integration i befintliga

arbetsflöden och metoder. Enligt Chen et al. (2018) är de vanligaste utmaningarna bristande mognad i användningen av information, interoperabilitetsbegränsningar, otillräcklig budgettilldelning, brist på ekonomisk konkurrens och stor osäkerhet kring informationssäkerhet och avtalsansvarsaspekter.

Davila Delgado et al. (2019) grupperade de utmaningar som identifierats i litteratur och branschundersökningar i fyra kategorier: (i) ekonomiska faktorer på entreprenörssidan, (ii) ekonomiska faktorer på beställarsidan, (iii) tekniska och arbetskulturella faktorer och (iv) svaga affärsmöjligheter. Eftersom många entreprenörer är små och medelstora företag saknar de ofta den finansiella stabiliteten för att ta på sig de höga initiala kapitalinvesteringar som behövs i automationslösningar. På beställarsidan, när det gäller offentliga instanser för t.ex. infrastruktur, dominerar ofta en anbudsstrategi i form av ”lägsta pris” i kombination med kortsiktig budgetering, vilket ofta hindrar användningen av dyrare, innovativa lösningar. I artikeln beskrivs vidare att det finns en omfattande diskussion om behovet av en beställardriven, obligatorisk användning av BIM (som i t.ex. Storbritannien) och de tillhörande disruptiva krafterna för branschen i jämförelse med frivilliga samarbetsprogram (som i Sverige). När det gäller tekniska och arbetskulturella faktorer är vanliga hinder tekniska svårigheter och den höga komplexiteten och unikheten i byggbranschen som begränsar användbarheten och flexibiliteten hos robotar och automatiserade lösningar.

Ett annat stort problem är anpassningen av interaktionen mellan människa och maskin. För att obemannade markfordon (UGV) ska kunna användas i större skala drar Czarnowski et al. (2018) slutsatsen att både bättre gränssnitt för enklare maskinoperationer samt en högre grad av autonomi (inklusive den oberoende förmågan att känna av, analysera, kommunicera, fatta beslut och utföra) kommer att behövas.

När det gäller affärssidan påpekar Davila Delgado et al. (2019) att det saknas detaljerade kostnadsnyttoanalyser som går utöver tidsbesparande beräkningar genom att inkludera t.ex. kostnader för installation, underhåll, utbildning och energi samt hälsoaspekter. Dessutom har marknadsdynamik och absorptionspotentialer inte undersökts; vilket gör det svårt att bedöma affärspotentialen inom robotiserad byggkonstruktion.

### 3.1.7 Framtida steg

Chen et al. (2018) menar att för att automatisering och robotik ska kunna utvecklas ytterligare måste flera förutsättningar uppfyllas. Dessa inkluderar att anpassa processer och organisationsstrukturer utifrån de nya förutsättningarna, en ökad tillämpning, kontinuerliga bedömningar av hur projekten presterar, samt utveckling av standarder, protokoll för byggnadsinformation och lämpliga juridiska kontrakt. En ökad tillämpning i kombination med exakta, digitala verktyg kommer att möjliggöra BIM-baserad anpassning i stor skala, dvs. anpassade men ändå ekonomiskt lönsamma lösningar för byggprojekt som vanligtvis är unika till sin natur (Chen et al. 2018).

Tematiska områden för de framsteg som ska realiseras inom infrastrukturproduktion är enligt Bock (2015) till exempel automatiserat vägbyggande, tunneldrivning, brokonstruktion, byggande av dammar och kraftverk samt gruv- och containerhamnar. Avseende automatiserad huskonstruktion förväntas fokus i första hand vara på bostadsproduktion och automatiserat byggnadsunderhåll, men även byggande i rymden, hav, öken etc. kan förväntas i framtiden. Dessutom kan närbesläktade områden förväntas se en ökning av automatisering och robotteknik, t.ex. transportsystem (bilar, kollektivtrafik, flygresor etc.), hushållsapparater, jordbruk och livsmedelsproduktion samt stadsförvaltning (smarta nät, trafik kontroll, infrastrukturinspektion, försörjningshantering av vatten, gas, varor etc.).

### 3.2 Automation inom infrastruktur

Det är inte bara inom husbyggande utan även inom infrastruktur som fokus alltmer flyttas mot potentialen med automatisering. Tidiga studier av tillämpade fall för robotik vid motorvägsbyggande utfördes t.ex. på 1980-talet av Moavenzadeh (1985) och Najafi & Naik (1989).

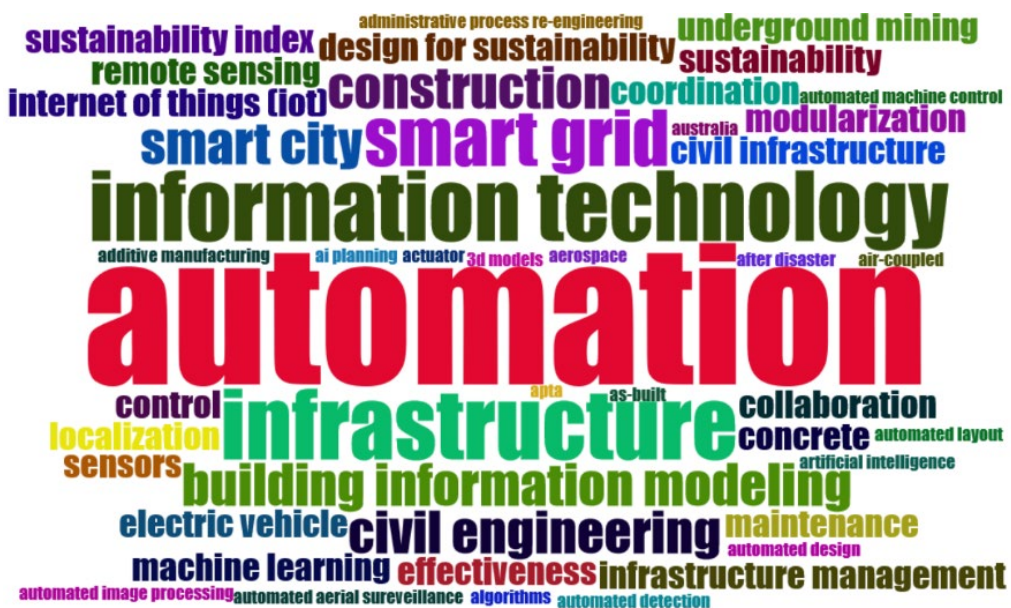
*“Today an extraordinary confluence of new technologies and a large and stable market for construction can bring about a revolution in the U. S. industry. The decay of the U. S. infrastructure - highways, mass-transit systems, ports, water mains, sewers, and other public works - will provide a market for new construction. Computers, robotics, and advanced materials stand ready to be used, especially in labor-intensive repair and maintenance.”*

(Moavenzadeh 1985) – p. 32

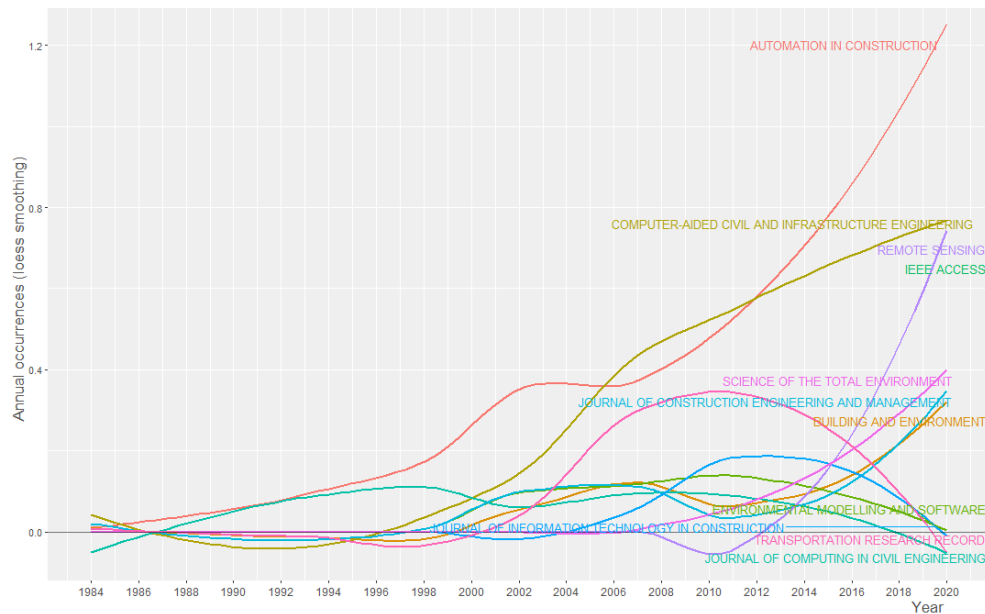
Aktuell forskning om tillämpningar av automatisering och robotik inom infrastrukturområdet undersöker i de flesta fall specifika projekt där ny teknik tillämpats. Costin et al. (2018) nämner till exempel användningen av BIM, som - även om den ursprungligen inte var avsedd för infrastrukturanvändning - har implementerats framgångsrikt i flera transportinfrastrukturprojekt över hela världen, ofta driven av offentliga aktörer.

Figur 8 visar identifierade nyckelord vid en sökning på ”Infrastructure Automation”. Såsom figuren visar förekommer ord relaterade till stadsplanering (t.ex. smart stad, katastrofhantering och infrastrukturhantering) ofta i forskningen, och det gör även underhållsrelaterade nyckelord som övervakning, sakernas internet (IoT), fjärranalys och automatiserad maskinstyrning. Även hållbarhet är vanligt förekommande inom automatiseringsforskningen kopplat till infrastruktur.

När det gäller källorna är den vanligaste tidskriften inom automation av infrastruktur återigen "Automation in Construction", följt av "Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering", "Remote Sensing" och "IEEE Access", se Figur 9.



Figur 8 Nyckelord kopplade till sökning på ”Infrastructure Automation”.



**Figur 9 Tillväxt för relevanta tidskriftsartiklar under perioden 1984 till 2020.**

Även om betydande framsteg har gjorts inom automatisering av infrastruktur enligt t.ex. Costin et al. (2018), återstår mycket arbete innan automatiseringens fulla potential kan realiseras. Kuenzel et al. (2016) belyser det faktum att många uppgifter fortfarande genomförs baserat på mänskliga beslut och därför är benägna att bli fel eller är ineffektiva.

För att titta närmare på effekterna av automatisering och robotik inom infrastrukturen genomfördes en omfattande litteraturstudie enligt den metodik som beskrivs i kapitel 2.1. De olika områdena omfattade forskning inom automatisering för motorvägar, broar, tunnlar samt för gruvor. Tillämpade fall och utförd forskning kopplad till designskede, byggskede samt drift- och underhållsskedet studerades för de olika områdena. Nedan presenteras en kort sammanfattning av dessa områden; för en fullständig beskrivning av området hänvisas till Hoefl et al. (2022).

### 3.2.1 Motorvägar

Automatisering i design och planering av motorvägar är ofta kopplad till användningen av BIM, vilket möjliggör scenarioanalyser och optimering av resursanvändning, förebyggande av avfall och effektminimering. Kim et al. (2014) beskriver ett sådant exempel för scenarioanalyser i samband med beräkningar för balansering av schaktvolym, kostnadsuppskattningar och schemaläggning, vilka alla har stor inverkan på projektresultaten. Zanen et al. (2013) utforskar ett annat viktigt område för automatisering i denna fas, nämligen planering av sekvenser och arbetsflöden. Genom att använda en uppsättning regler och koder i 4D-byggplanering kan projektgruppen generera och visualisera olika schemaalternativ och deras respektive rumsliga effekter, både för den interna kommunikationen och för allmänheten som påverkas av vägbyggnadsprojekt. Detta knyter an till Shah (2014), som visade att användning av 4D-scheman kopplade till designmodellerna också ger mer flexibla svar på designförändringar och möjliggör en algoritmbaserad generering av platsbaserade bearbetningsscheman för schaktning samt optimering av resursallokeringar baserat på t.ex. produktivitetshastigheter och information om försörjningskedjan. Automatisering av dessa processer hjälper därför till med resursplanering, identifiering av överbelastning av tid och rum, aktivitetsövervakning i byggfasen och kommunikation med intressenter.

I det större perspektivet med smarta städer diskuterar Toh et al. (2020) ett antal attribut som i framtiden kommer göra det möjligt för smarta vägar att interagera med sin miljö och därmed ytterligare öka säkerheten och produktionen av förnybar energi. Genom att titta ännu längre in i

framtiden belyser Khoury et al. (2019) effekterna av en helt automatiserad fordonsflotta på vägarnas geometriska utformning. I sin forskning anpassas parametrar som stoppseendeavstånd, beslutsavstånd och utformning av kurvor till scenariot utan mänskliga förare, för vars kapacitet och begränsningar vägar för närvarande är utformade.

För att övervinna beroendet av manuella processer och övervaka framstegen i långa vägprojekt lyfte Goger & Bisenberger (2020) fram en ökande automatisering i användningen av tunga maskiner, både autonomt och i interaktion med människor, och den effektiva kombinationen av digitala modeller med sensorer och visuella data om "as-built-förhållanden" som ett fokus för framtida forskning. Ett projekt som framgångsrikt använt sig av artificiell intelligens, maskininlärning och beslutsteori för vägbyggnadsprocessen är Smart Site-projektet i Tyskland, beskrivet av Kuenzel et al. (2016). Baserat på digitala planeringsmodeller etablerades ett autonomt kontrollerat informationsutbyte mellan byggmaskiner, mellan miljön och entreprenadmaskinen och mellan bygglidningen och entreprenadmaskinen för att eliminera eller minska mänskliga fel och öka precisionen. Ett exempel i projektet var kompakteringsarbeten, som är ett av de viktigaste stegen eftersom fel i denna fas är oåterkalleligt kopplade till höga kostnader för ombyggnad av vägsegment. I Smart Site-projektet förhindrade användningen av sensorinmatning i realtid till maskinstyrsystemen komprimatorerna från att överkomprimera, vilket ökar trottoarens livslängd under livscykeln och gör det möjligt för bygglidningen att omfördela resurser till andra beslut och uppgifter.

Trots noggrann design och konstruktion kommer trafik, regn, snö och solljus att orsaka försämring av ytbeläggningen under vägarnas livslängd. Att upptäcka sprickor tidigt och täta dem effektivt innan de blir större gropar, och därmed en stor säkerhetsrisk, är därför prioriterat vid underhållsarbeten för vägar. Av 25 underhållsaktiviteter för vägar identifierade Osmani et al. (1996) de mest konceptuellt genomförbara aktiviteterna för automatisering baserat på ekonomiska och kvalitativa faktorer, vilka bl.a. inkluderade sprick- och fogtätning, utjämning, reparationer av potthål, punkttätning, dikesunderhåll, etc. I en översiktsstudie om automatiserad defektdetektering, bedömning och reparation grupperade Radopoulou & Brilakis (2016) befintliga forskningsinsatser inom underhållsautomation i tre kategorier: "vision based methods", "spatial based methods" och "vehicle dynamic sensor data". Vanliga implementeringshinder som identifierats i en jämförelse av de olika lösningarna är höga investeringskostnader (särskilt för sensorer och specialfordon för att erhålla rumsliga data), systemkomplexitet och begränsad funktionalitet hos de enskilda verktygen. De drar slutsatsen att det för närvarande inte finns någon helhetssyn på automatiseringen av vägfelsdetektering.

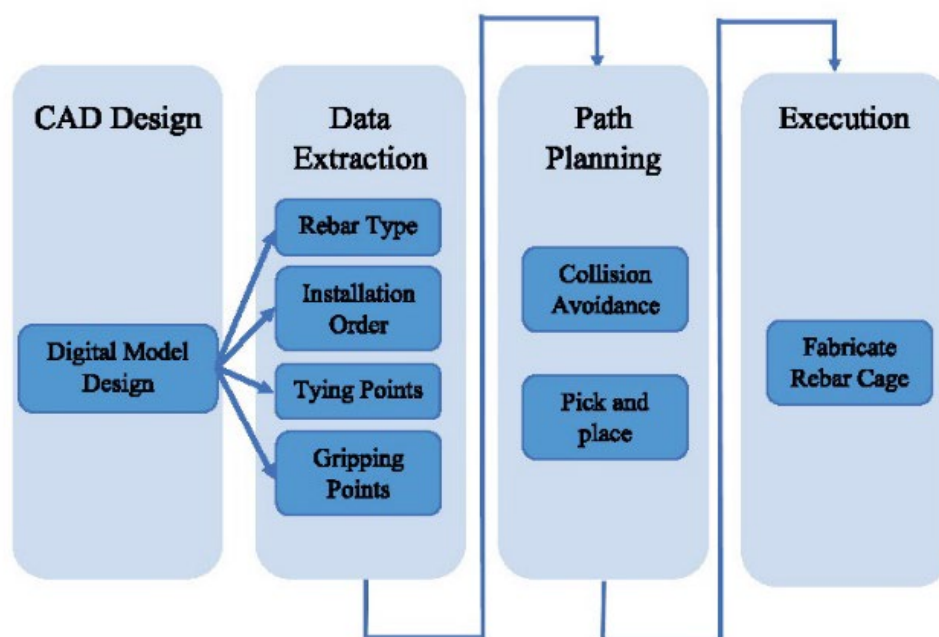
I Sverige har forskningsprojekt inom vägunderhåll nyligen fokuserat på datadriven, dynamisk utformning av väghållningsstrategier, särskilt på vinterunderhåll. Till exempel syftar ett internationellt uppmärksammat projekt, utfört av Svevia i tre delar från 2016-2020 och lett av Bäckström (2018) till att automatisera ruttplaneringen av underhållsarbeten. Genom att övervaka vägförhållandena och det lokala vädret och använda denna information för att optimera körrutter får operatören direkt uppdaterade instruktioner i fordonets navigationssystem. Det framtida arbetet syftar till att dessutom inkludera nivån av kvarvarande salt i modellen för mer exakta resultat och åtgärder.

### 3.2.2 Broar

Precis som andra byggprojekt kännetecknas den traditionell brokonstruktion av en fragmenterad informationsöverföring från tidig design till tillverknings-, monterings- och driftsprocesser (Chen & Shirolé 2006). Chen & Shirolé (2006) drar slutsatsen att för att förkorta byggskedet av broar bör ett informationscentrerat tillvägagångssätt för planering, design-konstruktion, drift och underhåll användas genom att använda ett enhetligt språk för elektronisk kommunikation av broarnas

livscykelinformation. En mer automatiserad konstruktion av broar kräver en konstruktion som är anpassad för detta. Automatisering driver behovet av nya material, omfattande prestandatester, uppdaterade designriktlinjer och justerade monterings-processer. Detta gäller både automatisering av traditionella designprocesser och design för nya tillverkningsmetoder som additiv tillverkning. Ett nyligen avslutat exempel på ett helt digitalt broprojekt är Randselvaabron i Norge, som – eftersom den är helt BIM-baserad – byggdes utan några pappersritningar (Vieira et al. 2022). Att ha högkvalitativa digitala modeller förbättrar inte bara samarbetsarbetsflöden, utan är också grunden för robotuppgifter som automatisering av armeringsjärn och andra robotmonteringsuppgifter.

Automatisering vid konstruktion av broar kan gälla både tillverkning på plats och utanför anläggningen. Till exempel öppnar användningen av additiv tillverkning (AM) i byggbranschen också nya möjligheter för byggandet av broar. En teknik som redan används inom andra sektorer, ”wire and arc additive manufacturing” (WAAM), har nu börjat uppmärksammas inom byggbranschen. Gardner et al. (2020) rapporterar om världens första 3D-printade metallbro. Gångbron har en total längd på 12,5 m, en spännvidd på 10,5 m och en genomsnittlig bredd på 2,5 m. Salet et al. (2018) rapporterar om utformningen av en 3D-printad förspänd betongbro som verifierades genom testning. Bron var den första i sitt slag och togs i bruk i Nederländerna. Andra tillämpningar av automatisering vid konstruktion av broar kan också inkludera robotmontering av armeringsjärn på plats för betongkonstruktioner som pelare eller brodäck. Skanska utvecklade tillsammans med Robotdalen ett ”proof-of-concept” för en automatiserad tillverkningsprocess för armeringskorgar baserad på en 3D-modell (Momeni et al. 2022), vilken t.ex. kan användas vid brobyggen. Det övergripande processschemat för tillverkningen illustreras i Figur 10. I kombination med användning av självkompakterande betong- och 3D-printing kan bropelare byggas med minimalt avfall och en hög grad av standardisering. En pilotstudie genomfördes av Silfwerbrand (2022) i samarbete med företaget ConcretePrint för effektiv tillverkning av bropelare. I sitt arbete användes 3D-printing framgångsrikt för tillverkning av formen med en höjd av 2,4 m. Formen fylldes därefter med självkompakterande betong. Enligt Silfwerbrand (2022) kan denna typ av interaktionspelare ge arkitekterna nya designalternativ och öka produktiviteten.



Figur 10 Övergripande processschema för automatiserad tillverkning av armeringskorgar (Momeni et al. © 2022) CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Med en ökande ålder på befintliga broar kommer behovet av en effektivare förvaltning och underhåll av strukturerna också att öka i framtiden. Ett stort fokus läggs därmed på strukturell övervakning och prediktivt underhåll som stöds av automatisering istället för manuella inspektioner med fasta intervall. Utifrån denna frågeställning genomförde Leander et al. (2010) ett omfattande övervakningsprogram för Söderströmbron i Stockholm för att upptäcka utmattningssprickor och punktavvikelser. Baserad på denna övervakning kunde återstående livslängd uppskattas och jämföras mot ursprunglig design. Neves et al. (2017) föreslår användning av maskininlärning för att upptäcka skador och definiera tröskelvärden för bedömning av risken för utmattningsbrott. Dessutom presenteras en proaktiv beslutsmetod för underhåll av Neves et al. (2019), som med hjälp av Bayesiansk statistik beräknar vilka beslut som är mest optimala utifrån ett underhållsperspektiv.

### 3.2.3 Tunnlrar

Planeringen av en tunnel innehåller många variabler som måste beaktas såsom tunnelform, vägtyper och fordonsstorlekar, trafikkapacitet, geotekniska förhållanden, miljö- och samhällsfrågor, driftsfrågor, hållbarhet, grundvattenkontroll, tunneldrainering, kostnadsanalys, riskanalys och projektledning. Vid design av tunnlar kan automatiserade borrhplaner skapas genom olika designverktyg. Modern programvara innehåller vanligtvis alla designdata (tunnellinjer, sektioner, tunnelprofiler, planerad bergförstärkning etc.) (Schunnesson 2009). Schunnesson (2009) beskriver vidare att navigationsverktyg kan användas för att ansluta de konstruerade borrhplanerna till den exakta positionen i tunneln. Vidare beskriver Sorge et al. (2019) hur BIM användes som ett verktyg för design och informationsutbyte för Brennerbastunnelprojektet som förbinder Österrike och Italien genom en 55 km lång rak tunnel. BIM beskriver alla infrastrukturprojekt i termer av 3D-representationer av alla beståndsdelar och kan innehålla ytterligare information om projektets andra egenskaper (Kontothanasis et al. 2019). Tillämpning av BIM i tunnelprojekt gör det möjligt att utforma tunnlar som är idealiska för befintliga platsförhållanden samt uppfyller socioekonomiska och miljömässiga krav (Kontothanasis et al. 2019).

I Norden byggs tunnlar ofta i fast, hårt kristallint berg vilket gör borrh- och sprängmetoden effektiv och ekonomisk (Jennemyr 2019). Den aktivitet i en borrh- och sprängcykel som har den högsta graden av automatisering är borrhningen. Olika nivåer av automatisering, från helautomatiska system till enklare verktyg som används för operatörsstöd, används för borrhning av en tunnelrunda. De skapade borrhplanerna från designverktygen används för de helautomatiska borrhsystemen (Schunnesson 2009).

En av fördelarna med automatiserad borrhning är repeterbarheten mellan rundor och kontrollen av konturerna. Manuell borrhning är beroende av operatörens erfarenhet och skicklighet och gör det svårare att hålla en korrekt inriktning mellan hålen (Schunnesson 2009). Det beskrivs vidare att påverkan på sprängning, med t.ex. ytterligare sprängämnen eller varierande belastningar mellan hålen, är betydande för manuell borrhning. Användningen av det automatiserade Rod Adding System (RAS) har inte bara ökat borrhastigheten utan har också ökat säkerheten för operationen (Jennemyr 2019). Tidigare laddades borrhade hål med sprängämnen manuellt, vilket gjorde operationen långsam och osäker. Användningen av sprängladdningsbilar för bulksprängämnen blir dock allt vanligare, vilket möjliggör en viss grad av automatisering. Robotics and Autonomous Systems-gruppen vid CSIRO utvecklade ett prototypsystem för automatisering av spränghållsladdning och demonstrerade framgångsrikt systemet 2001 (CSIRO 2002). Systemet dokumenterades i detalj i Bonchis et al. (2014). Tillverkningsföretaget Orica som arbetar med sprängning och tillverkningsföretaget för gruvutrustning, Epiroc, utvecklade och presenterade tillsammans ett prototypsystem för halvautomatisk laddning av sprängämnen i november 2020 och betraktade det som det första i sitt slag för kommersiella ändamål. Systemet kommer att testas under 2021 innan det är kommersiellt tillgängligt (Orica 2020).

Schaktning av sprängda massor görs oftast med hjullastare och lastbilar. Transportband är dock en annan metod för att transportera bort det sprängda berget och är vanligt förekommande i Centraleuropa vid långa tunnlar (Jennemyr 2019). En viss grad av automatisering rapporteras också vid installation av bergförstärkning. Till exempel introducerades en automatiserad utrustning som är specifik för tunnellingens i Paghuashan-tunneln (Lin et al. 2006). Användningen av robotar och UAV för mätning börjar också få en stor spridning.

En av utmaningarna med en befintlig infrastruktur, till exempel en tunnel, är inspektion och underhåll. Idag utförs inspektioner vanligtvis av erfarna arbetare. Trenden går dock mot användning av robotar för tunnelinspektioner för att öka produktiviteten, kvaliteten och repeterbarheten (Jardón 2014). Inspektions- och underhållsdelen av tunnlar har större potential för automatisering på grund av en mindre komplex karaktär av verksamheten jämfört med design, planering och konstruktion av tunnlar. Dessutom är den tekniska livslängden mycket längre jämfört med byggfasen. Forskning om hur automatiserade inspektioner och underhåll kan övervägas redan i designfasen utförs också. Ett exempel beskrivs av Jardón (2014), som beskriver hur skenor kan installeras längs tunneln för att möjliggöra olika typer av helautomatiska inspektioner med robotar. Genom att automatisera inspektionsprocesserna kan den totala operativa produktiviteten och noggrannheten ökas (Balaguer 2000, Balaguer & Abderrahim 2008). Det finns ett antal arbeten relaterade till området automatiserad inspektion och underhåll av tunnlar. De flesta av dessa arbeten fokuserar på robotinspektion av tunnlar, se till exempel Balaguer (2009), Victores et al. (2011), Cipolla (2015), Balaguer (2017), Menendez et al. (2018) och Leonidas & Xu (2018). Den största nackdelen med de flesta robotsystem är dock att de är fjärrstyrda. Nästa steg i automationsutvecklingen är mot en helautomatisk tunnelinspektion (Jardón 2014). Detta kräver emellertid att problemen med manuella inspektioner löses. Två projekt där dessa frågor studerades var TunConstruct-projektet (Balaguer 2009, Victores et al. 2011) och ROBINSPECT-projektet (Loupos et al. 2014).

### 3.2.4 Gruvor

Tekniska framsteg inom automatisering, digitalisering och elektrifiering påverkar gruvsektorn snabbt (Bliss 2018). Några av de tekniker som har stor inverkan inkluderar drönare, automatiserad borrhning, smarta sensorer och autonoma fordon (Bliss 2018). Anammandet av automatisering för modernisering av gruvverksamhet sker idag över hela världen. Den främsta anledningen till detta är för att hitta nya sätt för ökad produktionshastighet, minskade drifts- och produktionskostnader, förlängd gruvlivslängd och förbättrad arbetsplatssäkerhet (ABB 2021). Ökande ansträngningar och forskningsprojekt genomförs över hela världen för att öka automatiseringsnivån inom gruvindustrin (Noone 2020). Enligt uppskattningar från World Economic Forum kommer autonoma maskiner att vara relativt vanliga år 2025. Utvecklingen inom artificiell intelligens, maskininlärning och sakernas internet (IoT) bedöms kunna spara cirka 373 miljarder dollar till 2025 (ABB 2021).

Varje gruvprojekt börjar med prospektering, vilket inkluderar sökandet efter mineraler och definierar storleken och formen på en fyndighet så exakt som möjligt (Hartman & Mutmansky 2002). För närvarande är prospektering huvudsakligen baserad på teknik som tomografisk avbildning, magnetiska och seismiska undersökningar, fjärranalys, kärnborrhning etc. (NRC 2002). Att implementera automatisering till mineralprospektering är ett relativt nytt fenomen med möjlighet till utbredd tillämpning (Walker 2019). Mineralprospekteringsföretaget Goldspot Discoveries Inc., använder artificiell intelligens och maskininlärning för att hitta nya guldfyndigheter i Kanada (Walker 2019). Nyligen inledde ett av de största guldgruvföretagen, Goldcorp, samarbete med ett av världens största datorföretag, IBM, för att söka efter nya prospekteringsmål vid Red Lake-gruvan (Topf 2017). Eftersom automatisering inom prospektering är i ett tidigt skede finns det en enorm automatiseringspotential i denna fas av en gruvans liv. Design och planering av en gruva blir också mer och mer mjukvarubaserad. Gruvplanering involverar



genomförbarhetsstudier där de mjukvarubaserade designerna hjälper till att välja de bästa scenarierna för att maximera projektets lönsamhet (Hustrulid et al. 2013). Modern gruvplanering innebär användning av de senaste beräkningsmetoderna för att optimera storskaliga scenariobaserade problem (Davis & Newman 2008). Användningen av artificiell intelligens och maskininlärning kan här förbättra optimeringen.

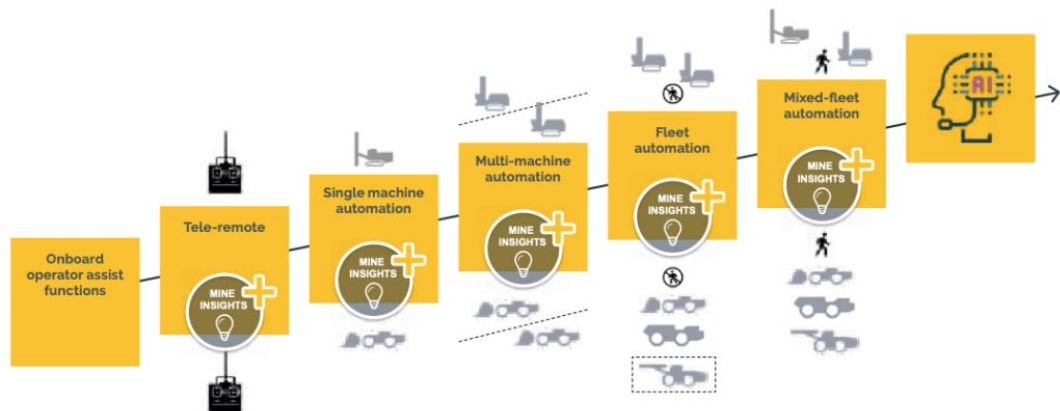
Infrastrukturutvecklingen i en gruva är i stora drag lik andra byggbranscher som byggnader eller vägar, etc. Tunnlar för underjordisk gruvdrift liknar tunneldrivning i infrastrukturprojekt, men med en viktig skillnad i projektets varaktighet. Gruvdrift är längre än tunnelprojekt och har råd med högre automatiseringsnivå för operationen. Större delmoment som tidigare har lagt fokus på automatisering inom gruvdrift inkluderar bergborrning, materialhantering och kommunikationssystem. Epiroc byggde plattformen Rig Control System (RCS) på 1990-talet och har använt den som plattform för en inbyggd automatiseringslösning för ovanjordsborriggar (Epiroc 2021a). Sandvik har också gjort stora framsteg när det gäller borraringsautomatisering. Till exempel den intelligenta borrarigen med den innovativa AutoMine-programvaran® (Sandvik 2021). Idag kan borrarystemen utrustas med ett automatiserat stånghanteringssystem (RHS), automatiserad hämtning av borrarstänger efter borrning, COP Logic för att hjälpa borrarigen att övervinna förändrade markförhållanden, halvautomatisk positionering av riggmatning, hålnavigeringssystem (HNS), automatisk matningstryck och automatisk nivå (Epiroc 2021a).

Automatisering av LHD-maskiner (Load-Haul-Dump), som används för underjordisk materialbrytning och transport, har varit ett forskningsintresse från mitten av 1980-talet. Många system har testats runt om i världen, men de flesta gruvor har ofta inte använt autonoma LHD. På senare tid har det dock blivit mer accepterat och använt på grund av t.ex. säkerhetsskäl, möjligheten att lasta efter sprängning och potentialen att öka produktiviteten.

CSIRO (2004) rapporterade om en framgångsrik utveckling av ett LHD-automatiseringssystem baserat på reaktiv navigering och opportunistiska lokaliseringprinciper som senare lanserades som MINEGEM av Caterpillar. Marshall et al. (2008) rapporterade om den framgångsrika utvecklingen av en robust auto-tramming-teknik som de hävdade var snabb och pålitlig. Denna teknik krävde ingen installation av fast infrastruktur.

Hårdvaran och användargränssnitten för Scooptrams® automationssystem från Epiroc dokumenterades av Atlas Copco (2009). En majoritet av forskningen har fokuserat på halv-automatisering istället för helautomatiserad LHD på grund av flexibiliteten i verksamheten (Gustafson 2011). Nyligen kom Epiroc och Combitech tillsammans fram till en lösning för trafikhantering av autonoma LHD:er i underjordsgruvor (International Mining 2020). Lösningen heter Epiroc Scooptram Automation Total, som har ett trafikstyrningssystem (TMS) samt ett fleet management system (FMS). TMS hjälper LHD-maskinerna att interagera och dela vägar och andra gemensamma anläggningar för att undvika kollisioner eller störningshändelser. De olika automatiseringsnivåerna enligt (Epiroc 2021b) kan ses i Figur 11.

En av de största svårigheterna med att automatisera en underjordisk gruvdrift är navigationssystemet i smala, ogästvänliga och mörka miljöer (Dragt et al. 2005). Ovanjordstruckar använder både radar- och LiDAR-enheter (Light Detection and Ranging) för att känna av föremål i närheten. Dessa enheter tillsammans med högprecisions Global Positioning System (GPS) hjälper till att skapa en tydlig bild av potentiella hinder, plats och hastighet på maskinen (Morell 2017).



Figur 11 Olika nivåer av automatisering enligt Epiroc (Källa Epiroc med tillstånd)

GPS-navigationsystem, som endast är användbara för ytnavigering, är dock inte lämpliga för underjordiska gruvfordon (Dragt et al. 2005). Därför har olika navigationssystem utvecklats och testats för detta ändamål (Gustafson 2011). Gustafson (2011) beskrev ”dead reckoning” som ett system för att mäta fordonets rörelse och bestämma dess position. En annan metod är tröghetsnavigeringssystem som mäter accelerationer för att bestämma rörelsetillståndet (Dragt et al. 2005). Systemets höga pris gynnar emellertid inte dess tillämpning i självkörande fordon. Genom ett samarbete mellan Mining Systems Laboratory, Kanada; Örebro universitets centrum för tillämpade autonoma sensorsystem, Sverige; och Epiroc, Sverige kom nyligen en nyare teknik för LHD-fordon. Denna teknik kallas auto-tunable robotic loading (ATRL), vilket gör det möjligt för de automatiserade LHD:erna att känna sin omgivning snarare än att se den. Denna lösning gör det möjligt för maskinen att arbeta i damm och mörker eftersom den inte använder kamerateknik (Anyadike 2017).

För närvarande utforskas trådlös kommunikation, dvs. Wi-Fi, 4G / LTE och 5G-internetteknik, mer och mer för att övervinna begränsningarna i tidigare navigationssystem. Wi-Fi-kommunikation hade anslutningsproblem som reducerades av 4G / LTE privat trådlöst nätverk och 5G kommer att öka möjligheterna med maskinautomatisering ytterligare (Wordsworth 2021). Ericsson testar för närvarande 5G-teknik för att automatisera Bolidens borrhuggar som kan förbättra maskinens produktivitet med upp till 40 % (Ericsson 2018). Den hårda och ogästvänliga gruvmiljön innebär alltid utmaningar för gruvautomationen. 5G-teknik är ett av de moderna områdena som tar sig in i gruvautomation. Det kan hjälpa till att övervinna latens- eller fördröjningsproblemen i anslutningen för förbättrad navigering (Wordsworth 2021).

Det pågår forskning och utvecklingsarbete om utveckling av en industriell IoT-arkitektur som kan föra alla enskilda gruvsystem till en plattform och överbrygga utbytet av data i gruvmiljön. Detta kan vara möjligt genom att sammanföra olika tekniker som OT / IT-applikationer, affärs-applikationer, IoT-enheter, big data och moln och edge computing (Aziz et al. 2020). Förbättringar av sensorer, big data-analys, automatisk malmanalys, automatisk fragmenteringsanalys, autonom sprängning, etc. är ytterligare några andra potentiella områden som kommer att utforskas i stor utsträckning i framtiden för att göra gruvdriften mer autonom.

### 3.3 Sammanfattning

Trenderna är tydliga, internationellt finns en ökande trend inom forskning och utveckling inom områdena automation, digitalisering och robotik inom byggbranschen. Internationellt är ledande länder USA, Storbritannien, Sydkorea, Kanada, Kina, Tyskland och Schweiz med forskning som pågår på både universitet och företag. Samma trend kan också ses inom området automatisering för infrastruktur som tunnlar, motorvägar och broar för design, produktion, inspektion och underhåll.

Användningen av BIM har ökat möjligheterna till automatisering och effektivare design och planering. Genom att använda BIM kan 4D-scheman kopplade till designmodellerna ge mer flexibla svar på designförändringar och möjliggöra en algoritmbaserad generering av till exempel scheman för platsbaserade markarbeten vid motorvägsbyggande samt optimering av resursallokeringar baserat på t.ex. produktivitetsnivåer och information om försörjningskedjan. Data i BIM-modellen kan kontinuerligt kompletteras och uppdateras med data som tas av drönare och annan stationär skanningsutrustning för planering och design, för övervakning av framstegen under själva byggproduktionen, samt för drift och underhåll under konstruktionens livslängd.

En exakt digital modell är en förutsättning för automatisering och robotkonstruktion. För motorvägsbyggen utvecklas för närvarande flera exempel på autonoma fordon för schaktning, kompaktering och asfaltspridning. För broar har additiv tillverkning testats med framgång för automatiserad konstruktion av stålbroar och betongpelare. Automatisk tillverkning av armeringskorgar med hjälp av robotar är också för närvarande under utveckling, vilka kan användas som fabriker på plats för modulär produktion. Inom gruvdrift är Sverige en av de ledande nationerna och driver automatiseringen inom branschen. Under de senaste decennierna har gruvverksamheten utvecklats från fjärrstyrd till mer autonom självkörande teknik. Tekniken som utvecklats i gruvorna kan användas vid tunnelbyggen med liknande förutsättningar.

Man kan också dra slutsatsen att inspektion och underhåll är ett monotont arbete som i stor utsträckning utförts av människor. Som beskrivits ovan har automatiseringen inom dessa områden startat. Flera exempel med olika typer av sensorteknik, kombinerat med IoT och molnteknik har använts för automatisering av övervakning och inspektioner. När det gäller underhåll har dock automatiseringens framsteg inte nått lika långt som för inspektioner.

## 4. PÅGÅENDE AKTIVITETER I SVERIGE

### 4.1 Inledning

Enligt ett uttalande av Sven-Arne Paulsson på Automation Region år 2009 har Sverige en extremt stark position inom automation, med en marknadsandel på cirka 10% av den globala marknaden (Paulsson 2009). Han uppger vidare att två tredjedelar av automationsindustrin finns i regionen Mälardalen.

I en nyare rapport från PiiA, Automation Region och Blue Institute, anges att den svenska IndTech-industrin, som omfattar både operativ produktionsteknik (OT) och informationsteknik (IT), har en global marknadsandel på 3% (Larsson 2021). Jämfört med storleken på den svenska ekonomin i förhållande till den globala är den svenska IndTech-industrin sex till sju gånger större än jämförbara länder som Tyskland, Frankrike och Storbritannien.

Stora svenska företag som ABB, Ericsson, Saab Combitec, Volvo och Scania arbetar mot automation, autonoma system, självkörning och robotisering inom sina olika discipliner. Med denna bakgrund bör Sverige ha en unik möjlighet att producera automation och robotar för byggbranschen.

Nedan presenteras en sammanfattande översikt över det tidiga och nyligen genomförda forskningsarbetet inom området anläggningsautomation i Sverige tillsammans. Eftersom arbetet med anläggningsautomation i Sverige är begränsat ingår både bostäder och infrastruktur i detta kapitel. Syftet är att ge en överblick över automationsforskningen i byggbranschen generellt i Sverige och avser inte att ge en fullständig täckning.

### 4.2 Tidiga arbeten

Det kan konstateras att Sverige var tidigt ute med forskning och produktutveckling inom byggautomation. Redan 1988 skrevs två rapporter om byggautomation, Tarandi et al. (1988) och Rahm (1988). Rahm (1988) presenterade även en lista på olika nyutvecklade produkter kopplade till byggautomation och beskriver även hur en framtida utveckling av byggautomation bör se ut. Ytterligare projekt beskrivs även av Åhman (2013).

Tarandi et al. (1988) gjorde också en kartläggning av tillämpningen av robotar internationellt inom byggbranschen. Baserat på denna kartläggning drar de slutsatsen att de flesta robotar är i ett inledande skede och främst prototyper finns. Vidare kom de fram till att CAD-ritningar i framtiden kommer att vara den viktigaste informationsbäraren. Dessutom förutspådde de att på den framtida arbetsplatsen kommer det att finnas ett antal olika robotar som utför olika uppgifter i specifika fabriker på plats.

### 4.3 Pågående arbete

#### 4.3.1 Akademi

Idag finns ett antal pågående initiativ på de Svenska lärosätena:

- Lunds universitet, Tekniska fakulteten, har **Center for Construction Robotics**
- Kungliga Tekniska Högskolan har **Centrum för Byggeffektivitet** och i det tvärvetenskapliga forskningscentret Digital Futures finns projektet **”Towards Safe Smart Construction: Algorithms, Digital Twins and Infrastructures”**
- Luleå tekniska universitet har det senaste decenniet bedrivit omfattande forskning inom området gruvautomation genom det EU-finansierade projektet **SIMS – Sustainable Intelligent Mining Systems** och idag i det EU-finansierade **NEXGEN-SIMS-projektet**

- Mälardalens universitet bedriver i samarbete med Robotdalen forskning inom industriell robotik, vilket även innefattar byggautomation. Ett exempel är ett projekt tillsammans med Skanska
- Linköpings universitet driver det strategiska projektet ”**Digital Transformation av Byggplatser**”, som är en fortsättning ”**Uppkopplad byggplats**”. Projektets huvudsyfte är att studera hur man uppnår effektivitet på byggarbetsplatserna genom digitalisering.
- Chalmers har skapat konsortiet **Digital Twin Cities** för att utveckla storskaliga digitala tvillingar och digital teknik för stadsplanering, design, arkitektur och digitalt byggande.

#### 4.3.2 Industri

Det finns idag ett antal Svenska företag som arbetar med automatisering och robotisering inom byggindustrin. Bland annat företagen Aquajet, Build-r, ConcretePrint, Epiroc, NCC, PEAB, Sandvik, Skanska och Volvo. Förutom föregående företag finns det dessutom ett antal andra Svenska IndTech företag vilka kan betraktas som möjliggörare för byggautomation, exempelvis ABB, Ericsson, Telia, etc.

Det är nu 34 år sedan, Tarandi et al. (1988) och Rahm (1988) skrev sina första rapporter och listade företag inom byggautomation. I Tabell 4 har en genomgång gjorts på de listade företagen från 1988 och om de är aktiva idag. Det kan noteras att tre av åtta fortfarande är aktiva, men det kan också observeras att alla de mindre företagen inte längre existerar. Det är bara de som startats av stora företag som finns kvar.

**Tabell 4 Lista över robotar som används i svensk byggindustri enligt Rahm (1988) och resultat från en internetsökning om de är aktiva idag.**

	2022	1988
FORO: Tunnelborrningsteknik FORO en bormaskin utvecklad av Atlas Copco. 2022, Epiroc som är ett självständigt företag avknoppat från Atlas Copco producerar bl.a. TBM.	X	X
BROKK 80/BROKK 100/BROKK 250. En fjärrstyrd robot utvecklad av Atlas Copco för rivning av betong. 2022 är BROKK ett världsledande företag för rivningsrobotar och har 12 säljkontor runt om i världen.	X	X
DEMEC 520. En fjärrstyrd rivningsrobot som används för att bila, men kan utrustas med grävskopa och mobilkran. Utvecklad av Diamantex AB.	Ingen verksamhet funnen	X
HANDY CRUSHER. Är ett hydraulklippverktyg för tyst, damm- och vibrationsfri rivning av betongväggar. Utvecklad av Svenska Handycrusher.	Ingen verksamhet funnen	X
LARVEN. En fjärrstyrd banddriven lastbärare som kan gå i trappor och smala språng. Larven minskar risken för rygg och klämskador. Tillverkad av Svets Mekano AB in Växjö.	Ingen verksamhet funnen	X
LASERSTYRD RORORMASKIN. Utvecklad av Leif Johansson, ABV och Chalmers Industri Teknik, CIT. Maskinen utvecklades för att jämna ut betong i valv och plattor.	Ingen verksamhet funnen	X
ELECTROLUX EUROCLEAN CLEANER ROBOT AXV-01. En dammsugare utvecklad av Electrolux AB i samarbete med ett Japanskt företag. 2022, Electrolux är en av många tillverkare av robotdammsugare.	X	X
AUTOMATISK MIXER utvecklad av BELAB och ABS, Stockholm. Mixern adderar vatten och mixar ingredienserna till en förutbestämd putsconsistens	Ingen verksamhet funnen	X

## 4.4 Forskningsfinansiärer

För att driva förändringen inom bygg och anläggningsbranschen finns ett antal forskningsfinansiärer. Den största, Trafikverket, finansierade forskning år 2021 för 758 MSEK fördelat på åtta olika portföljer. Den viktigaste ur ett byggnadsperspektiv är portföljen "Bygga" med 112 MSEK i forskningsmedel år 2021 (Styffe & Gustafsson 2022).

Det finns även ett par av de Strategiska Innovations Program (SIP) som är intressanta med hänsyn till byggautomation:

- Smart Built Environment, som startade 2016 och har som mål att utveckla digitaliseringen för att förändra strukturer och arbetssätt i byggindustrin.
- InfraSweden 2030, som startade 2017 och som arbetar för att stödja innovation i transportinfrastrukturen genom användande av nya material, ny teknik, nya arbetssätt, nya kontraktsformer och nya partnerskap.
- Swedish Mining Innovation, för gruvforskning
- Process Industrial IT and automation (PiiA)

Utöver dessa finns även Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF) samt stiftelsen för Bergteknisk forskning (BEFO) och även E2B2 som startade år 2013.

## 4.5 Framtid och trender

Samuelsson (2020) genomförde en analys av projekt inom svensk byggindustri med finansiering från olika forskningsfinansiärer "Projekt eller initiativ som utvecklar byggprocessen eller aktörer med hjälp av digitalisering". 119 projekt identifierades inom områdena BIM, IoT, Analys och Automation. 19 (16 %) av dessa projekt fanns inom delområdet automation och användning av robotar eller 3D-utskrifter.

Ett annat initiativ är Nationell färdplan för digitala byggarbetsplatser av Jeppsson (2021). Den föreslagna färdplanen har två huvudförslag: (i) Ett forum för alla medlemmar i Byggföretagen och Installationsföretagen, (ii) prioriteringar för att reducera fragmentering. Sex utvecklingsområden identifierades:

1. Överenskomna standarder för informationsutbyte
2. Öppna plattformar för datautbyte
3. 3D-modell som används som juridiskt dokument
4. Digital tvilling för både produkt och webbplats
5. Anslutningsstandarder och datastandarder som möjliggör dataflöde genom byggprocessen och stödjande IT-system
6. Pilotprojekt som visar på möjligheterna med robotar och automation

Av de digitaliseringsprojekt som identifierats av Samuelsson (2020) rörde en relativt liten del av alla projekt tillverkning med automation eller robotar. Detta kan ge en indikation på att detta område är svårt och mer krävande. Samtidigt måste en utvecklad produkt nå en teknisk beredskapsnivå (TRL) på cirka 7 till 8 för att man skall kunna avgöra om produkten kommer att fungera och vara användbar. Å andra sidan, i ett rent digitaliseringsprojekt är tiden till marknaden kortare, och det kan vara lättare att tidigt verifiera fördelarna.

Slutsatsen att utveckling av produkter för automatisering med robotar är mer krävande att utföra kan också dras från de tidiga studierna av Rahm (1988), Tarandi et al. (1988) och Johansson & Åhman (1992). De beskriver alla en framtid och anar en förändring – 34 år senare är statusen för framstegen inom byggautomation nästan densamma.

Sammanfattningsvis visar den genomförda studien att byggautomation inte är något nytt koncept i Sverige. Trots att forskning på området startade för nästan 40 år sedan har relativt begränsad utveckling skett inom området. De senaste två till tre åren har en större mängd finansiering givits till Svenska universitet och forskningsinstitutioner men pengarna går i huvudsak till digitalisering och inte till området byggautomation.

Med de gynnsamma förutsättningar som finns i Sverige kan man undra varför utvecklingen och framstegen inom automation och robotisering inte har nått längre i den svenska byggbranschen. Denna frågeställning diskuteras ytterligare i avsnitt 6.

## 5. TEMADAGAR

### 5.1 Inledning

Två temadagar hölls i maj 2021, för att diskutera tekniska möjligheter och barriärer samt affärsmodeller inom byggautomation. Temadagarna organiserades och modererades av projektgruppen för Nationellt nätverk för byggautomation med talare och deltagare från områdena byggkonstruktion, gruvdrift och robotteknik:

#### **Temadag 1: Det tekniska perspektivet**

Den första temadagen fokuserade på att förstå de nuvarande och framtida tekniska tillämpningsområdena för automatiserat byggande.

<b>Ämne</b>	<b>Talare</b>
<i>Gruvautomation</i>	Peter Burman (Boliden) Jenny Greberg (LTU)
<i>Byggautomation</i>	Ulf Håkansson (Skanska) Lars Petterson (Skanska)
<i>Robotar för automation</i>	Robert Andersson (LTH) Helena Eriksson (Cognibotics)

#### **Temadag 2: Det organisatoriska & ekonomiska perspektivet**

Fokus på den andra temadagen låg på de organisatoriska och ekonomiska förutsättningar som är nödvändiga för att möjliggöra implementering av automatiserat byggande. Lars Albinsson var inbjuden som moderator.

<b>Ämne</b>	<b>Talare</b>
<i>Vad krävs för implementering?</i>	Susanne Nelleman Ek (BIM Alliance) Lars Albinsson (Maestro)
<i>Beställarens roll</i>	Bernt Henrikssen (Automation Region)
<i>Affärsmodeller</i>	Samuel Holmström (Lundqvist Trävaru) Professor Kent Eriksson (KTH)

Nedan presenteras en kort sammanfattning av det som presenterades och diskuterades under temadagarna.

### 5.2 Temadag 1 – det tekniska perspektivet

Enligt Peter Burman på Boliden har de främsta drivkrafterna för implementering av automation inom gruvindustrin varit ökad säkerhet och ökad produktivitet.

Enligt Burman kan grunden för digitalisering av en gruva delas in i fyra steg:

1. Telekomsystem (byggande av infrastruktur; data och positionering)
2. Position och navigering (förvandlar maskiner till robotar)
3. Processteknik (för att robotisera robotisering)
4. Gruvmetoder (att tänka om i gruvdrift)



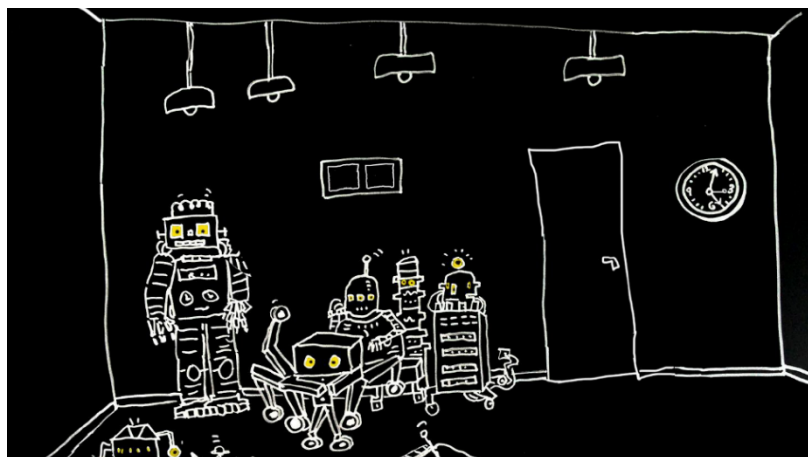
I en gruva handlar all utveckling om "lean-processer"; allt handlar om "flödet" i produktionen, det vill säga omvandlingen av en gruva från en infrastrukturverksamhet till en väl fungerande fabrik. För att uppnå detta behöver alla robotar orkestreras så att de olika systemen integreras för att samverka på ett smidigt och säkert sätt.

En viktig och intressant nyckelprestandaindikator (KPI) som Boliden använder är termen "Lights out" för att styra implementeringen av automation, illustrerad i Figur 12. Termen "Lights out" är en tillverkningsmetodik (eller filosofi) som syftar på hur länge robotar kan fungera själv, uthålligt och självständigt, utan mänsklig inblandning eller interaktion.

Jenny Greberg, programdirektör på Swedish Mining Innovation och docent vid LTU, beskriver att LKAB började använda fjärrstyrda "robotar" redan under 90-talet trots att produktiviteten var låg. Trots detta fortsatte man. Idag är de svenska gruvorna världsledande inom gruvautomation. Detta är ingen slump. Den svenska gruvindustrin har arbetat målmedvetet under lång tid för att samla "det svenska gruvklustret" som inkluderar de svenska gruvbolagen, leverantörerna, universiteten och små och medelstora företag. Tillsammans skapade de en gemensam vision och innovationsfärdplan och har arbetat strategiskt på olika nivåer med regering, myndigheter, politiker och EU.

Genom att vara affärsutvecklare för sina leverantörer menar Peter Burman att en gruva kan fungera som en avancerad testbädd för ny teknik. Genom att göra det kan Boliden och de andra svenska gruvorna utnyttja en oproportionerligt stor del av sina leverantörers forskningsbudgetar. Dessa leverantörer inkluderar företag som ABB, Ericsson, Epiroc, Volvo etc., med många miljarder i forskningsbudget.

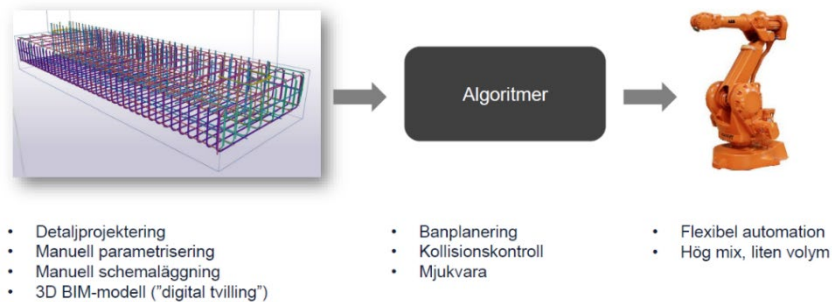
Enligt Ulf Håkansson, teknisk chef på Skanska, har byggbranschen jämfört med vanliga produktionsbranscher en hög grad av "one-piece productions", unika komponenter och arbetsuppgifter med låg volym och en hög mix av unika detaljer. Detta innebär att en CAD-modell, BIM eller en s.k. digital tvilling måste användas för att styra produktionen och den måste vara 100 % korrekt. De olika stegen för robotstyrning från en 3D-modell presenteras i Figur 13. En kritisk uppgift i många infrastrukturprojekt är najning av armeringsjärn för betongkonstruktioner. Detta arbete är tungt, med obekväma arbetsställningar. Ett proof-of-concept-upplägg i skala 1:2 utvecklades tillsammans med Robotdalen och Mälardalens universitet för automatisk produktion av armeringskorgar. Robotarnas rörelse programmerades initialt. Detta är dock inte tillräckligt flexibelt. Därför skapades en algoritm för automatiserad beräkning av vägplanering och kollisionskontroll från CAD-ritning. Den förväntade kapaciteten kommer att vara cirka en timme per ton för robotarna, medan kapaciteten för manuellt arbete är cirka tio timmar per ton, d.v.s. en effektivisering på 90 %.



Figur 12 Illustrering av konceptet "Lights out" (Från Peter Burman, Boliden med tillåtelse)

## Byggautomation Armering – Styrning av robotar

”Konvertering av digitala 3D modeller för styrning av industrirobotar”



Figur 13 Steg för robotstyrning från 3D-modell (Från Ulf Håkansson, Skanska med tillåtelse)

### 5.3 Temadag 2 – det organisatoriska & ekonomiska perspektivet

Enligt Lars Albinsson förbrukar byggprocessen av ett hus samma mängd energi som 50 års drift. Därför är det viktigt att byggprocessen är effektiv ur ett hållbarhetsperspektiv. Albinsson fortsatte därefter att beskriva skillnaden mellan en industriell produktion och hantverk. I industriell produktion separeras konstruktionen och tillverkningsprocessen, och alla designbeslut tas innan produktionen startar. Inom hantverksarbetet tas dock många av designbesluten kontinuerligt under själva tillverkningsprocessen. I princip kan graden av hantverksskicklighet i produktionen mätas som antalet mänskliga beslut som fattas under byggtiden. Idag bygger byggprocessen i hög grad på hantverk med beslut som fattas på byggarbetsplatsen och dokument såsom illustreras i Figur 14.

Enligt Albinsson handlar problemet främst om affärsmodeller och organisation. Som ett exempel använder en rörmokare bara 20 % av sin tid för faktiskt produktivt arbete, medan resten av tiden går åt till möten, ospecificerat arbete och väntan. Men så länge rörmokaren får timavlönning kommer rörmokaren inte ha något incitament till att ändra sin affärsmodell.



Figur 14 Exempel på hög andel hantverksamhet på en byggarbetsplats med manuell arbetskraft (Från Lars Albinsson, Maestro med tillåtelse).

Ett annat exempel är leveranskedjan och kostnaden för att köpa material, där hantverkaren, underleverantören, entreprenören alla lägger till 10 % vardera på kostnaden för det material som hantverkaren köper. Totalt kommer detta att resultera i en kostnadsökning på 33 % för kunden. Återigen är detta ett lönsamt system för alla inblandade utom kunden, och det finns inget incitament till förändringar.

Albinsson beskriver ytterligare ett exempel där en centraliserad leveranskedja användes. Genom att göra det erhöles en 95% minskning av materialtransporten. Om materialet skärs på plats får hantverkaren dessutom betalt för överskottsmaterial som måste kasseras. Med andra ord, köparen betalar 33% mer även för det kasserade materialet, jämfört med automatiserad tillverkning där material kan skäras exakt, och köparen bara betalar för det material som faktiskt används.

Det finns inga incitament för hantverkaren att ändra denna affärsmodell. Sammanfattningsvis driver inte den befintliga affärsmodellen förändring, och bidrar därmed inte till en ekologisk och hållbar utveckling.

En annan typ av affärsmodell presenterades av Samuel Holmström, VD på Lundqvist Trävaru. Samuel Holmström beskriver uppkomsten av deras 3-dimensionella konfigurationssystem, en internetplattform, som en bas för deras verksamhet. Kunderna kan gå till det internetbaserade systemet och rita en byggnad och definiera mått, placering av dörrar, fönster, typ av tak, etc. Även ritningar för bygglovet genereras automatiskt. Varje artikel är exakt specificerad ner till antalet skruvar och hur föremålen ska packas för transport

Samuel menar att IT-personal är avgörande för deras affärsmodell. Samuel tycker att särskilt två aspekter är störande när man pratar digitalisering: (i) att företag digitaliserar sina befintliga processer, och (ii) byggföretagen driver inte sin egen digitala utveckling. Istället är det enligt Samuel externa konsultföretag som skapar ett system i branschen och vill nå så många kunder som möjligt, där de simulerar befintliga processer.

Genom att inte driva digitaliseringsarbetet själv och ifrågasätta processerna finns risk att digitaliseringen skapar inlåsningseffekter i deras befintliga processer. Det är viktigt att äga och ha kunskap internt, vilket framgår av Samuels beskrivning av Lundqvist Trävaru.

## 6. DISKUSSION

Användningen av automatisering och robotteknik för byggnads- och infrastrukturkonstruktioner kommer innebära en grundläggande förändring av hur denna sektor fungerar. Den nya tekniken har potential att förbättra flera områden inom byggsektorn såsom produktivitet, arbetsmiljö och miljöpåverkan. För att uppnå detta och navigera i den transformation som byggbranschen står inför måste emellertid flera faktorer inom branschen åtgärdas såsom hög fragmentering, svårkontrollerbara byggarbetsplatser samt tillfälliga projektallianser med en komplex samordning av många aktörer med olika mål.

I följande delkapitel presenteras och diskuteras pågående initiativ, trender, möjligheter och utmaningar samt krav för genomförande med hänsyn till en automatisering av bygg- och anläggningsbranschen.

### 6.1 Pågående initiativ och trender

Internationellt har det sedan 60-talet varit en ständigt ökande trend inom forskning och utveckling inom områdena automation, digitalisering och robotik inom byggbranschen.

Såsom påpekades tidigare av (Bock 2015) har den S-formade trenden gått från tidiga innovationer inom konventionell byggkonstruktion mellan 1970 och 2010 innan den förvandlades till en mer disruptiv tillväxtfas av automatiserad konstruktion efter 2010, vilket har lett till prestandaförbättringar och en mer mogen och bredare implementering inom byggsektorn. Internationellt är ledande länder USA, Storbritannien, Sydkorea, Kanada, Kina, Tyskland och Schweiz med forskning som pågår på både universitet och företag. Samma trend kan också ses inom området automatisering för infrastruktur såsom tunnlar, motorvägar och broar för design, konstruktion, inspektion och underhåll.

Användningen av BIM har ökat möjligheterna till automatisering och effektivare design och planering. På lång sikt måste emellertid hela livscykeln, från planering och design till byggskede samt drift och underhåll, digitaliseras – vilket möjliggör design för robotik, effektiv logistik, en automatiserad orkestrering av produktionen och underhållet vilket illustreras i Figur 15.



**Figur 15 En digitaliserad process över hela livscykeln krävs för fullständig automatisering i framtiden.**

I litteraturstudien identifierades forskning som genomförts över hela livscykeln – från tidig planering och design till byggskede samt drift och underhåll. I flera av fallen är noggrann geometrisk modellering och schemaläggning kopplad till en digital tvilling från ett tidigt skede av projektet en av de underliggande förutsättningarna för att möjliggöra automatisering och produktion med robotar. Kontinuerlig kontroll i realtid av vad som byggs i kombination med avstämning av modellförhållanden möjliggör inte bara övervakning av framsteg i realtid, utan också av fjärr- eller helautomatiska operationer. Det är ofta kombinationen av flera tekniker, såsom sensorer, drönare och BIM-verktyg som tar effektiviteten och noggrannhet samt arbetsmiljön till en högre nivå.

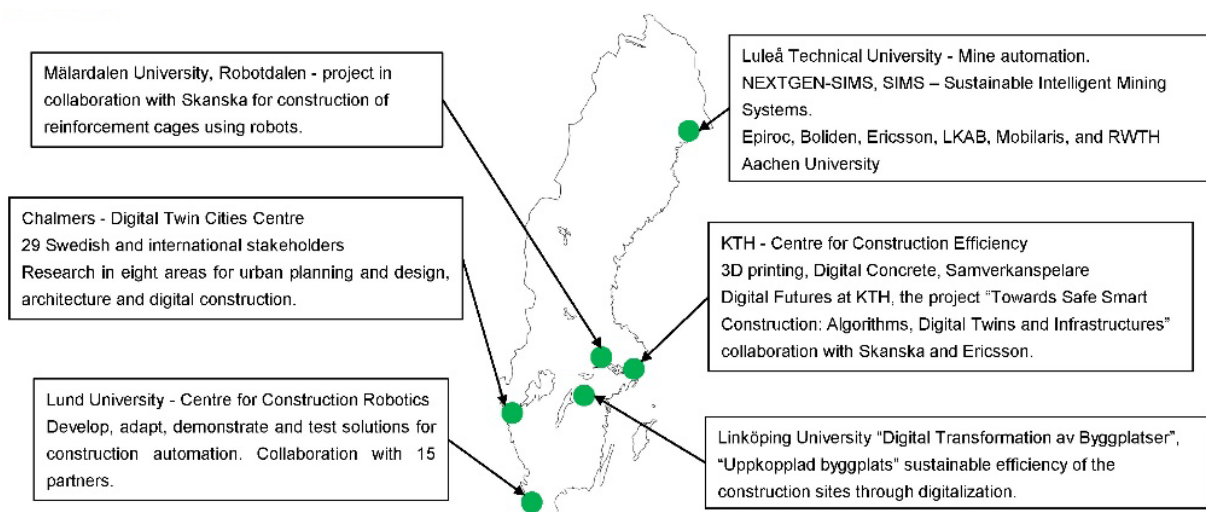
Litteraturstudien om infrastruktur visar att en exakt BIM-modell är en förutsättning för automation och robotkonstruktion. Flera exempel på autonoma fordon för schaktning, kompaktering och asfaltspridning utvecklas för närvarande. Additiv tillverkning har testats med framgång för automatiserad konstruktion av stålbroar och betongpelare.

Automatisk tillverkning av armeringskorgar med hjälp av robotar är också för närvarande under utveckling, vilka kan användas som fabriker på plats för modulär produktion. Sverige är ett av de ledande länderna inom detta område och driver även automatiseringen inom gruvindustrin. Under de senaste decennierna har gruvverksamheten utvecklats från fjärrstyrd till mer autonom självkörande teknik. Tekniken som utvecklats i gruvorna kan till viss del även användas vid tunnelbyggen med liknande förutsättningar, även om gruvorna har andra förutsättningar att investera i digital infrastruktur då arbetsplatsen är stationär och inte flyttas som för tunnelprojekt inom transportinfrastrukturen.

Flera exempel med olika typer av sensorteknik, kombinerat med IoT och molnteknik har använts för automatiserad övervakning och inspektioner. När det gäller underhåll har dock automatiseringens framsteg inte nått lika långt som för inspektioner.

I Sverige pågår ett antal större satsningar vid universiteten mot automation och digitalisering med kopplingar mot bygg- och anläggningsbranschen, där flera har startat de senaste åren. Några exempel på pågående initiativ presenteras i Figur 16.

Som framgår av Tabell 4, där vi jämför vilka av de svenska företag som Rahm (1988) identifierade inom byggautomationsområdet med de som fortfarande är verksamma 30 år senare, kan man dra slutsatsen att mindre företag med avancerad automationsteknik försvinner från marknaden. Alla



Figur 16 Exempel på pågående initiativ vid de svenska universiteten.

produkter som utvecklats av mindre nystartade företag är inte längre i produktion, medan alla produkter som utvecklats av större företag såsom Epiroc (tidigare Atlas Copco) och Electrolux fortfarande är i produktion och nu utgör viktiga delar av deras produktportfölj. Andra exempel på initiativ som inte klarat sig är putsroboten från MoRoCo, Build-r, Loop Rocks och NCC Komponent. Detta pekar mot det faktum att det är viktigt att ha en stark ekonomi och uthållighet för att framgångsrikt utveckla och implementera nya produkter. Värdet ligger huvudsakligen i den metodik och de algoritmer som utvecklas. Det finns således ett behov av långsiktigt ekonomiskt stöd för innovationsföretag inom automation för att nå sin fulla potential.

Till skillnad från tillverkningsindustrin för bilar som mestadels använder statiska robotar programmerade för att utföra repetitiva uppgifter i en kontrollerad inomhusmiljö, behöver byggbranschen robotar för att vara flexibla. För att skala upp verksamheten i en ständigt föränderlig miljö bör robotar kunna röra sig på plats och förstå omgivande förhållanden med hjälp av en mängd olika sensorer. Speciellt i interaktion med människor eller andra maskiner är noggrann kontroll och återkoppling avgörande för att minska kollisionsriskerna och säkerställa en hög byggkvalitet.

För att integrera automatisering i design-, produktions- eller inspektions- och underhållsprocesser är det viktigt att prioritera bland potentiella användningsfall. Ett sätt att börja är att identifiera arbeten på den kritiska linjen (t.ex. armeringsjärn), som kan utföras av robotar på ett isolerat sätt. Men för en långsiktig omställning är en helhetssyn viktig. I stället för att blint automatisera enskilda processer bör målen bakom omvandlingen (t.ex. högre produktivitet och bättre arbetsmiljö) vägleda en omvärdering av befintliga processer för att sedan utnyttja ny teknik för att effektivisera verksamheten och göra den säkrare. Det är här viktigt att tekniken följer arbetarnas och kundernas behov. I stället för att tvinga fram införandet av nya lösningar behövs attraktiva användargränssnitt som är lätta att använda, även om den underliggande tekniken är komplex. Att dokumentera de beslut som fattas på detta sätt kommer hjälpa till att lära av tidigare fall och ge vägledning i den osäkra och snabbt föränderliga miljön som byggbranschen nu utgör.

## 6.2 Möjligheter och utmaningar

De totala investeringarna i den svenska byggbranschen utgör cirka 11 % av den svenska bruttonationalprodukten, eller 546 miljarder SEK (Byggföretagen 2021), och de totala investeringarna i transportinfrastruktursektorn under den kommande tioårsperioden kommer att uppgå till 799 miljarder SEK (Regeringen 2021). En ökad produktivitet och effektivitet inom transportinfrastrukturen kan därmed spara stora belopp till samhället, minska användningen av naturresurser och utsläppen av koldioxid samt stärka den svenska byggindustrins konkurrenskraft. Samtidigt ökar produktiviteten inte lika snabbt som i andra sektorer i branschen. Enligt Trafikverket (2021) har kostnaderna i större planerade infrastrukturprojekt ökat mer än konsumentprisindex (KPI), och enligt Albinsson (2019) har kostnaderna i byggbranschen de senaste tjugo åren ökat åtta gånger mer än KPI. Enligt Boverket (2018) kostar dessutom brister och fel i byggbranschen årligen mellan 83 och 111 miljarder kronor.

Redan i det tidiga arbetet av Tarandi et al. (1988) var de främsta drivkrafterna för att implementera automatisering i byggbranschen minskad produktivitet i byggsektorn jämfört med andra sektorer inom industrin, farliga och ohälsosamma arbetsuppgifter, svårigheter att hitta kvalificerade arbetare och att den svenska exporten i sektorn behöver förbättras, särskilt i den konkurrensutsatta miljö som den globala byggbranschen utgör.

Potentialen för att implementera automation i byggbranschen kan bl.a. observeras i Skanskas projekt för automatisering av byggande av armeringskorgar, där produktiviteten kan ökas med en faktor tio med den nya tekniken. Samtidigt kan tungt arbete ersättas och arbetsmiljön förbättras.

Idag finns en trend inom digitaliseringen som har bidragit till stora förändringar inom olika branscher. Som ett exempel förändrade användningen av e-post kommunikationen mellan människor i förhållande till användningen av brev som distribueras via manuell posttjänst. När digitaliseringen förändrar en bransch ökar förändringstakten i den branschsektorn. Detta är ett resultat som till stor del påverkas av Moores lag, som säger att densiteten på transistorerna på kiselchips fördubblas var 18:e månad (Moore 1975).

Moores lag påverkar hårdvaruindustrin och gör det möjligt att släppa nya hårdvaruplattformar, dvs datorer, mobiltelefoner etc. med fördubblad processoreffektivitet ungefär var 18:e månad. Ett exempel på detta är utvecklingen och nya versioner av Apple iPhones under det senaste decenniet. Ökad hårdvarueffektivitet gör det möjligt att lägga till eller öka antalet nya programvarufunktioner i liknande takt. Funktioner eller tillägg som kan vara för långsamma på den tidigare hårdvaruplattformen, men fungerar bra på nästa. Därför är mjukvaruindustrin van vid att göra flera programvaruutgåvor varje år och förbättra användningen av deras programvara. De senaste decennierna av molnteknik, virtuell serverteknik och mjukvaruutvecklingsprinciper som DevOps (NoOps från Netflix) och agila mjukvaruutvecklingsmetoder som Scrum, Kanban, etc., som är inspirerade av "Lean Manufacturing" har ökat hastigheten på mjukvaruutvecklingen ännu mer. Tillsammans med automatiserade programvaruutgivningsverktyg på dessa molnplattformar kan nya programvarufunktioner eller justeringar släppas och installeras flera gånger under en 24-timmarsperiod. Denna effektivitet är också till stor del beroende av verksamhetens omfattning, dvs. antalet personer och mognaden i Agile/DevOps-organisationen, se till exempel organisationer som Spotify, Netflix eller Amazon.

Detta innebär att processorns beräkningseffekt och programvarufunktioner kan fördubblas var 18:e månad. I teorin kommer en robot att ha en duplicerad processorberäkningskapacitet inom 18 månader och den intilliggande programvaran kommer att uppdateras inom denna tidsram. Detta betyder inte att produktiviteten i byggbranschen kommer att fördubblas var 18:e månad, men det kommer att påverka användningen av avancerad teknik när den antas. Därför har denna utveckling av ny teknik potential att förändra produktiviteten i byggbranschen under lång tid framöver.

Organisationer som agerar, lär sig och förstår att skörda dessa produktivetsökningar kan utvecklas på lång sikt. Organisationer som inte anpassar sig till dessa tekniksiften löper en risk att utkonkurreras. Denna nya teknik kan initialt vara dyr, men när tekniken utvecklas kommer den att bli billigare och kan förändra affärslandskapet - en disruptiv teknik, som är ett väl beskrivet koncept (Christensen 1997). I Sverige är kollapsen av Facit 1971-1972 på grund av elektronikens framfart ett välkänt exempel på hur teknik kan störa en marknad och vad som händer med företag som missar att anpassa sig till ett tekniksifte. Hasselblad är ett annat svenskt exempel på ett företag som nästan kollapsade på grund av ett styrelsebeslut 1996 att inte fullfölja investeringarna under sina nästan 15 år av utveckling inom digital teknik. På grund av användningen av den digitala tekniken skapas således nya möjligheter på marknaden och när prestandan för denna teknik förbättras blir den även attraktiv inom nya användningsområden (Sandstrom 2011).

I eran av artificiell intelligent generaliserar Kurzweil (2001) Moores lag för att täcka all teknik och förutspår att åren 2000-2099 kommer att motsvara 20 000 års teknikutveckling med hastigheten år 2000. Detta innebär att den acceleration som vi idag upplever som snabbt, kommer att bli ännu snabbare i framtiden – exponentiell tillväxt.

För att kunna ta del av denna utveckling finns det dock ett antal hinder som måste övervinnas. De viktigaste hindren som identifierats i detta arbete är:

- Projekten inom byggbranschen är komplexa där byggarbetsplatserna består av en blandning av många aktörer, material och processer som behöver samordnas i den omgivande byggda miljön.
- Idag bär varje projekt sina egna kostnader fullt ut, men det finns ingen innovation eller förändring av processer som kan finansieras av enskilda projektkostnader, till skillnad mot en helt industrialiserad process.
- Designen och byggskedet knyts ihop och bygger på beslut från hantverkare på plats. Detta arbetssätt är en konsekvens av hur digitaliseringen görs med dagens mjukvara. För att kunna implementera automatisering måste en fullständig digital tvilling göras.
- Affärsmodeller med timpriser och underleverantörer är ineffektiva, men saknar incitament för förändring.
- Leveranskedjan är inte centraliserad och det finns inga incitament för hantverkaren att ändra sin affärsmodell.
- Branschen saknar "*a sense of urgency*" för att implementera den nya tekniken.

För att övervinna dessa hinder kan några möjliga lösningar vara att:

- digitalisera hela processen och använda *en* IT-plattform för design, planering och produktion, med syfte att minska antalet beslut på plats, d.v.s. använda en digital tvilling som är 100 % komplett,
- separera design och dimensionering från produktion, så att så få beslut som möjligt ska tas på själva byggarbetsplatsen,
- identifiera separata moduler eller uppgifter som kan automatiseras,
- investera i produktionsteknik som skrivs av från flera projekt för att öka förmågan till större investeringar och etablera partnerskap för samarbete,
- använda en centraliserad försörjningskedja,
- tänka om och återuppfinna nya processer tillsammans med beställare,
- ersätta affärsmodellen där konsulter och underleverantörer får betalt på timbasis.

Slutligen, genom att implementera automatisering kan arbetsplatsen och byggbranschen bli mer attraktiva med enklare rekrytering som följd.

### 6.3 Krav för implementering

Automatiseringen av de svenska gruvorna har varit en framgångssaga och de svenska gruvorna är idag världsledande inom sitt område. Även om förutsättningarna för automatisering i en gruva är annorlunda jämfört med en byggarbetsplats finns likheter, och den svenska byggbranschen kan lära sig av detta arbete. Organiseringen av det svenska gruvklustret, och tillsammans etablera en gemensam vision och en strategisk färdplan för framtiden var sannolikt nyckelfaktorer för denna framgång. Denna typ av nationellt samarbete för en gemensam vision kan inte tydligt ses i byggsektorn som för närvarande är mer fragmenterad. Flera initiativ pågår inom området digitalisering och automatisering vid de svenska universiteterna, i byggföretagen, bland leverantörer och små och medelstora företag, och det vore önskvärt om dessa kunde samarbeta mot en gemensam vision och även etablera en strategisk färdplan tillsammans.

Detta innebär också att det behövs nya strategiska partnerskap för att allokera investeringar som främjar automatisering till byggbranschen. Gruvindustrin har samarbetat i partnernätverk tillsammans med stora företag som Epiroc, ABB, Volvo och Eriksson genom att marknadsföra gruvindustrin som ett användningsområde för dessa företags teknologier. På samma sätt kan automatisering inom byggbranschen inte drivas ensamt, utan måste utvecklas i strategiska partnerskap och genom att sälja in byggbranschen som ett lukrativt område för tillämpning av lösningar för automatisering och robotisering.



Det är också viktigt att dela kunskap och kopiera bästa praxis för att skala upp investeringarna i automatisering inom byggande. Ju större marknaden blir, desto snabbare kommer utvecklingen att bli. Industrikluster är en nyckel till framgång, inklusive små och medelstora företag, stora företag, universitet, byggföretag (t.ex. Skanska, NCC, Peab) och leverantörer av utrustning och system (t.ex. Ericsson, ABB, Volvo).

En helt digitaliserad designprocess krävs också för att kunna implementera automatisering för produktion och underhåll inom byggbranschen. Hur man sätter standarder och utvecklar system för systemen är här en viktig forskningsfråga.

Användningen av robotar i den svenska byggbranschen är inget nytt och arbetet pågick redan på 1980-talet. Fortfarande, mer än 30 år senare har inte mycket hänt på byggarbetsplatserna med avseende på genomförandet av automatisering. Som framgår av jämförelsen baserad på Rahm (1988) i Tabell 4 framstår det som mycket viktigt att stora företag deltar och kan säkerställa långsiktiga investeringar för att innovationerna ska lyckas överleva och bli framgångsrika. Detta är i sig inte förvånande eftersom det kräver stora investeringar över lång tid för att utveckla och implementera robotar för automation – ytterligare en anledning till ökat samarbete.

En annan viktig faktor för ett framgångsrikt genomförande av automation i de svenska gruvorna är möjligheten att använda gruvorna som testbäddar. Det kan förstås initialt till viss del sänka produktionen, och till exempel har LKAB därför fördelat delar av sina gruvor som separata testbäddar för att inte störa produktionen.

För infrastrukturektorn har Trafikverket en viktig roll som största beställare. På samma sätt som för gruvorna bör vissa delar av framtida projekt helst fördelas som testbäddar för automatisering och implementering av nya innovationer. Ett problem med denna strategi är att den skulle störa byggandet. Därför skulle "artificiella projekt" som fungerar som testbäddar kunna vara en möjlig lösning. Detta är emellertid kostsamt och kräver stora investeringar från Trafikverket och andra aktörer. Om sådana unika testbäddar skapades är nationellt samarbete mellan kunder, universitet, byggföretag, leverantörer och små och medelstora företag avgörande.

Dessutom spelar både offentliga och privata beställare en stor roll i omställningen mot ökad automatisering inom byggandet. Beställaren måste utveckla och implementera kompetenser och riktlinjer för hur automatiseringsalternativ ska prioriteras. Upphandling är ett starkt verktyg för att främja automatisering och göra det möjligt för leverantörer att kommersialisera automatisering och robotisering. Vid upphandling behöver beställarna fokusera på livscykeleffektivitet istället för kortsiktiga ekonomiska fördelar.

Vidare är affärsmodeller som främjar ökad automatisering och nya arbetssätt ett starkt verktyg för både offentliga och privata kunder. De nuvarande affärsmodellerna tenderar dock att främja och uppmuntra befintliga arbetssätt och kan skapa inlåsningar. Offentlig upphandling är en stor drivkraft för förändring, det är därför viktigt att det finns kompetens inom dessa områden hos beställarna.

Det finns exempel på byggföretag som anammat nya affärsmodeller där affärsområdet består av tjänsteerbjudanden, kundengagemang och produktplattformar. Dessa företag har ett skifte i tankesätt och har profilerat sig som teknik-, logistik- och/eller säljbolag snarare än byggföretag. De har också nya rekryteringsstrategier som lockar talanger från andra branscher.

Följande nyckeltal (KPI) kan användas som ett mått på graden av automatisering i byggbranschen:

- Antal beslut som fattats av en hantverkare på plats

- Mängden levererade varor som saknas på plats eller den tid en hantverkare måste vänta på en produkt eller antalet saknade delar
- ”*Light out time*”, vilket är en filosofisk term som används för att förstå hur lång tid automatiseringsprocessen kan pågå utan mänsklig inblandning

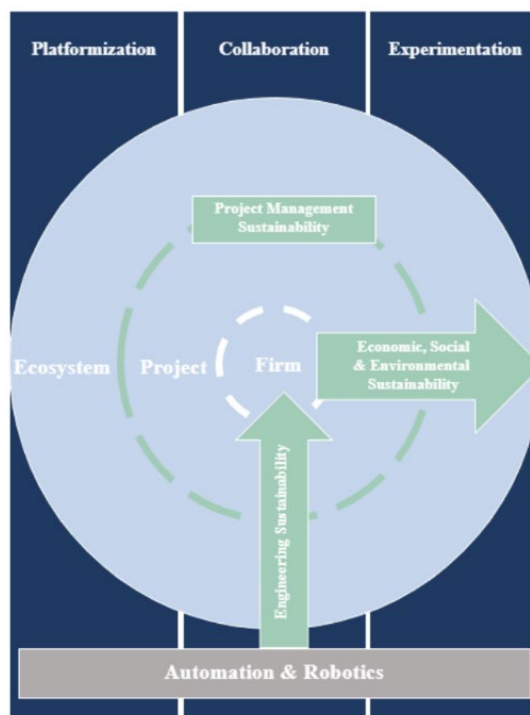
## 6.4 Affärsmodeller, projekt och konsekvenser för deras ekosystem

Såsom illustreras i Figur 17 är den tekniska hållbarheten en förutsättning för ett framgångsrikt projektgenomförande. För att i slutändan skapa en positiv ekonomisk, social och miljömässig påverkan är projektstyrningsstrukturerna och de omgivande förhållanden under vilka robottekniken implementeras viktiga. För att skala upp automatisering och robotteknik och ta itu med nuvarande ineffektivitet krävs åtgärder på både företags-, projekt- och ekosystemnivå.

På företagsnivå öppnar införandet av ett användarcentrerat livscykelperspektiv nya möjligheter för datadriven, serviceorienterad affärsverksamhet. För att utnyttja dessa möjligheter måste ett företag bygga interna funktioner för att äga eller kontrollera verksamheter som logistik, kundresan och produktplattformen. Detta kräver i sin tur en förändring av personalens utbildningskrav och anställningspraxis.

I projekt lägger detta långsiktiga perspektiv stor vikt vid kundens roll och upphandlingen av rätt partners för att gemensamt skapa innovationer som ser bortom kortsiktiga ekonomiska vinster. Partnerskap hjälper till att kompensera för höga initiala investeringskostnader och förhindra strider genom inter-organisatoriskt lärande.

Utöver själva byggnadsarbetena måste kompletterande infrastruktur som trådlösa nätverk finnas på plats för att möjliggöra automatisering och robotikapplikationer på plats. Dessutom bör finansierings- och försäkringsavtal återspegla de förändrade villkor som följer av den omfattande användningen av teknik och den påföljande förskjutningen av projektrisken.



Figur 17 Automatiseringens inverkan på infrastrukturens hållbarhet (Hoeft et al. 2021), CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Även bortom enskilda projekt finns ett stort behov av ökad samverkan för att skapa en trygg och attraktiv bransch. Den nuvarande, till viss del begränsade, användningen av ny teknik begränsar en utbredd användning av automatisering. För att skapa förtroende och visa att koncepten fungerar är finansiering av prototyper och testbäddar avgörande. Framgångsrika demonstrationer måste delas med branschen och visa upp bästa praxis och lärdomar. Dessutom finns det en enorm marknadsmöjlighet för tredje part om sektorn tillhandahåller testbäddar för skräddarsydd utveckling och lockar investeringar.

På det hela taget har automatisering och robotteknik en enorm potential att främja mer hållbara byggnads- och infrastrukturkonstruktioner, oavsett om det är ur ett ekonomiskt, miljömässigt eller socialt perspektiv. Detta kräver dock större ansträngningar för att öka lösningarnas tekniska mognad genom iterativ testning, tvärvetenskapliga samarbeten och integration av aktörer utanför den traditionella sektorn. Genom att utnyttja digitala tvillingar och andra plattformar för interaktioner mellan branschaktörer kan åtgärder effektiviseras och förtroendet ökas när man bygger på en gemensam informationsbärare. Dessutom måste experiment uppmuntras både inom företag och i projektnätverk. Framför allt kommer det att behövas en tydlig vision om "Varför" bakom automatisering och ett innovationsvänligt tankesätt för att anpassa alla olika intressenter som är involverade och kanalisera sina ansträngningar till en verklig förändring av branschen.

## 7. SLUTSATSER

Trenderna är tydliga, internationellt och nationellt finns en ökande trend inom forskning och utveckling inom områdena automation, digitalisering och robotik inom byggbranschen. Samma trend kan också ses inom området automatisering för infrastruktur som tunnlar, motorvägar och broar för design, konstruktion, inspektion och underhåll. Fall där automation tillämpats täcker hela livscykeln från planering och design till byggskede och underhåll.

Automatisering har potential att kraftigt öka *produktiviteten*, förbättra *arbetsmiljön* samt bidra till en mer *hållbar samhällsutveckling*.

Utvecklingen de sista decennierna har gått relativt långsamt inom byggsektorn generellt och speciellt med koppling mot automatisering. I denna rapport har ett flertal hinder identifierats som bidragit till detta. Några möjliga lösningar för att övervinna dessa hinder är bl.a. att:

- digitalisera hela processen och använda *en* IT-plattform för design, planering och produktion, med syfte att minska antalet beslut på plats, d.v.s. använda en digital tvilling som är 100 % komplett,
- separera design och dimensionering från produktion, så att så få beslut som möjligt ska tas på själva byggarbetsplatsen,
- identifiera separata moduler eller uppgifter som kan automatiseras,
- investera i produktionsteknik som skrivs av från flera projekt för att öka förmågan till större investeringar och etablera partnerskap för samarbete,
- använda en centraliserad försörjningskedja,
- tänka om och återuppfinna nya processer tillsammans med beställare,
- ersätta affärsmodellen där konsulter och underleverantörer får betalt på timbasis.

För storskalig implementering bör byggföretag, universitet, leverantörer och små och medelstora företag samla och sätta upp en gemensam vision och en strategisk färdplan för innovation med syfte att genomdriva automatisering och digitalisering. Färdplanen ska innehålla strategier för långsiktig finansiering. För att genomföra detta är en nationell samordning och samarbete mellan intressenterna avgörande där testbäddar också är nödvändiga.

## 8. REFERENSER

- ABB. 2021. *Mining automation and the need for innovations towards autonomous mining* [Online]. Available: <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-automation>.
- Aghaei Chadegani, A., Salehi, H., Md Yunus, M.M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M. & Ale Ebrahim, N. 2013. A comparison between two main academic literature collections: Web of science and scopus databases. *Asian Social Science*, 9(5), 18-26.
- Aghimien, D.O., Aigbavboa, C.O., Oke, A.E. & Thwala, W.D. 2019. Mapping out research focus for robotics and automation research in construction-related studies: A bibliometric approach. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(5), 1063-1079.
- Albinsson, L. 2019. Building ships on ground, Build 4.0 Project Planning: How shipbuilding principles can increase construction efficiency.
- Anyadike, N. 2017. *Mine automation clears giant hurdle* [Online]. MINING TECHNOLOGY. Available: <https://www.mining-technology.com/features/featuremine-automation-clears-giant-hurdle-5760844/>.
- Aria, M. & Cuccurullo, C. 2017. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975.
- Atlas Copco 2009. Next Generation System for Unmanned LHD Operation in Underground Mines. 2009.
- Aziz, A., Schelén, O. & Bodin, U. 2020. A Study on Industrial IoT for the Mining Industry: Synthesized Architecture and Open Research Directions. *IoT*, 1(2).
- Balaguer, C. 2000. Open Issues and Future Possibilities in the EU Construction Automation. *Proceedings of the 17th IAARC/CIB/IEEE/IFAC/IFR International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- Balaguer, C. 2009. Robot-Aided Tunnel Inspection and Maintenance System. *Proceedings of the 2009 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2009)*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- Balaguer, C. 2017. Autonomous Robotic System with Tunnel Inspection Tool Positioning. *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. Tribun EU, s.r.o., Brno.
- Balaguer, C. & Abderrahim, M. 2008. Trends in Robotics and Automation in Construction.
- Bliss, M. 2018. *How Technological Innovation is Impacting the Mining Sector* [Online]. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development. Available: <https://www.igfmining.org/technological-innovation-impacting-mining-sector/>.
- Bock, T. 1988. Robot-Oriented Design. 5th ISRC.
- Bock, T. 2015. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, 59, 113-121.
- Bock, T. & Linner, T. 2015. *Robot oriented design*. Cambridge university press.
- Bock, T., Linner, T. & Ikeda, W. 2012. Exoskeleton and humanoid robot technology in construction and built environment. The future of humanoid Robots - Research and Applications. .
- Bonchis, A., Duff, E., Roberts, J. & Bosse, M. 2014. Robotic Explosive Charging in Mining and Construction Applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(1), 245-250.
- Boverket 2018. Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn, Rapport 2018:36.
- Byggföretagen. 2021. *Totala Bygginvesteringar - Fasta bruttoinvesteringar i byggnader och anläggningar enligt SCB:s Nationalräkenskaper (NR)* [Online]. Available: <https://byggforetagen.se/statistik/bygginvesteringar/> [Accessed 2021-06-15].
- Bäckström, A. 2018. *Prognosstyrd dynamisk vägdrift* [Online]. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF). Available: <https://www.sbuf.se/Projektsida?project=a698a358-6264-4682-b679-50250224e318>.
- Chen, Q., García de Soto, B. & Adey, B.T. 2018. Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement. *Automation in Construction*, 94, 22-38.
- Chen, S.S. & Shirolé, A.M. 2006. Integration of information and automation technologies in bridge engineering and management: Extending the state of the art. *Transportation research record*, 1976(1), 2-12.

- Christensen, C.M. 1997. *The innovator's dilemma*.
- Cipolla, R. 2015. A Low-Cost Robotic System for the Efficient Visual Inspection of Tunnels. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015)*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- Costin, A., Adibfar, A., Hu, H. & Chen, S.S. 2018. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257-281.
- CSIRO. 2002. *Blast Hole Charging Automation* [Online]. Available: <https://research.csiro.au/robotics/blast-hole-charging-automation/>.
- CSIRO. 2004. *Load Haul Dump (LHD) Automation* [Online]. Available: <https://research.csiro.au/robotics/lhd-automation/>.
- Czarnowski, J., Dąbrowski, A., Maciaś, M., Główska, J. & Wrona, J. 2018. Technology gaps in Human-Machine Interfaces for autonomous construction robots. *Automation in Construction*, 94, 179-190.
- Davila Delgado, J.M., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M. & Owolabi, H. 2019. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26.
- Davis, G.A. & Newman, A.M. 2008. Modern strategic mine planning. *AusIMM, Carlton, Australia, 2008*. 129 - 139.
- Dragt, B.J., Camisani-Calzolari, F.R. & Craig, I.K. 2005. An overview of the automation of load-haul-dump vehicles in an underground mining environment. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 37-48.
- Dwivedi, S.N., Jones, G., Banerjee, S. & Srivastava, S. 1989. Formulation of design guidelines for automated robotic assembly in outerspace. *JPL, California Inst. of Tech., Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics, Volume 1, 1989*.
- Epiroc. 2021a. *Machine automation* [Online]. Available: <https://www.epiroc.com/sv-se/innovation-and-technology/automation-and-information-management/automation-and-information-management-surface/machine-autonomy>.
- Epiroc 2021b. Års- och hållbarhetsredovisning 2021.
- Ericsson 2018. 5G business value: A case study on automation in mining. An Ericsson Consumer & IndustryLab Insight Report.
- Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G. & Buchanan, C. 2020. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of constructional steel research*, 172, 106233.
- Gharbia, M., Chang-Richards, A., Lu, Y., Zhong, R.Y. & Li, H. 2020. Robotic technologies for on-site building construction: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 32.
- Goger, G. & Bisenberger, T. 2020. Digitalization in infrastructure construction – Developments in construction operations. *Geomechanik und Tunnelbau*, 13(2), 165-177.
- Gustafson, A. 2011. Automation of Load Haul Dump machines. Luleå University of Technology.
- Hartman, H.L. & Mutmansky, J.M. 2002. *Introductory mining engineering*. Hoboken, N.J.: John Wiley.
- Hoefl, M., Kronsell, S., Manzoor, S., Johansson, F., Gustafson, A., von Hanslingen, T. & Eriksson, K. 2022. Construction automation and robotics in infrastructure. *TRITA-ABE-RPT-2121*.
- Hoefl, M., Pieper, M., Eriksson, K. & Bargstädt, H.-J. 2021. Toward Life Cycle Sustainability in Infrastructure: The Role of Automation and Robotics in PPP Projects. *Sustainability*, 13(7).
- Hosseini, M.R., Maghrebi, M., Akbarnezhad, A., Martek, I. & Arashpour, M. 2018. Analysis of Citation Networks in Building Information Modeling Research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(8).
- Howe, A.S. 1998. *A new paradigm for life-cycle management of kit-of-parts building systems*. . University of Michigan.
- Hustrulid, W., Kuchta, M. & Martin, R. 2013. *Mine planning. Open Pit Mine Planning and Design*. CRC Press/Balkema.
- International Mining. 2020. *Epiroc and Combitech continue to break new ground in mine automation* [Online]. Available: <https://im-mining.com/tag/lhd-automation/> [Accessed June 02 2021].
- Jardón, A. 2014. Towards Fully Automated Tunnel Inspection: A Survey and Future Trends. *Proceedings of the 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC)*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).

- Jennemyr, L. 2019. *Advancements in Tunneling and Underground Excavation by Drill & Blast* [Online]. Available: <https://tunnelingonline.com/advancements-in-tunneling-and-underground-excavation-by-drill-blast/>.
- Jeppsson, J. 2021. Nationell färdplan digitala byggarbetsplatser - beslutsunderlag till byggföretagen och installatörsföretagen.
- Johansson, J.-O. & Åhman, P. 1992. Robotar i byggbranschen - möjligheter och användning områden. Informationsinsatser. FoU-Väst Rapport 9202.
- Khoury, J., Amine, K. & Saad, R.A. 2019. An Initial Investigation of the Effects of a Fully Automated Vehicle Fleet on Geometric Design. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Kim, H., Orr, K., Shen, Z., Moon, H., Ju, K. & Choi, W. 2014. Highway alignment construction comparison using object-oriented 3D visualization modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(10).
- Kim, M.J., Chi, H.L., Wang, X. & Ding, L. 2015. Automation and Robotics in Construction and Civil Engineering. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 79(3-4), 347-350.
- Kim, T., Lee, D., Lim, H., Lee, U., Cho, H. & Cho, K. 2020. Exploring research trends and network characteristics in construction automation and robotics based on keyword network analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*.
- Kontothanasis, P., Krommyda, V. & Roussos, N. 2019. *BIM and Advanced Computer-Based Tools for the Design and Construction of Underground Structures and Tunnels*. IntechOpen.
- Kuenzel, R., Teizer, J., Mueller, M. & Blickle, A. 2016. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*, 71, 21-33.
- Kurzweil, R. 2001. *The Law of Accelerating Returns* [Online]. Available: <https://www.kurzweilai.net/the-law-of-accelerating-returns> [Accessed 2022-05-23].
- Larsson, Ö. 2021. Swedish IndTech.
- Leander, J., Andersson, A. & Karoumi, R. 2010. Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge. *Engineering Structures*, 32(3), 854-863.
- Leonidas, E. & Xu, Y. 2018. The Development of an Automatic Inspection System Used for the Maintenance of Rail Tunnels. *2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 6-7 Sept. 2018 2018. 1-6.
- Lin, P.H., Tserng, H.P. & Lin, C.C. 2006. Automated construction of the Paghuashan tunnel for Taiwan High Speed Rail (THSR) project. *Automation in Construction*, 15(5), 627-639.
- Loupos, K., Amditis, A., Stentoumis, C., Chrobocinski, P., Victores, J., Wietek, M., Panetsos, P., Roncaglia, A., Camarinopoulos, S., Kalidromitis, V., Bairaktaris, D., Komodakis, N. & Lopez, R. 2014. Robotic intelligent vision and control for tunnel inspection and evaluation - The ROBINSPECT EC project. *2014 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE) Proceedings*, 16-18 Oct. 2014 2014. 72-77.
- Marshall, J.A., Murphy, P.F. & Daneshmend, L.K. 2008. Toward Autonomous Excavation of Fragmented Rock: Full-Scale Experiments., *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008. 562-566.
- Menendez, E., Victores, J.G., Montero, R., Martínez, S. & Balaguer, C. 2018. Tunnel structural inspection and assessment using an autonomous robotic system. *Automation in Construction*, 87, 117-126.
- Moavenzadeh, F. 1985. CONSTRUCTION'S HIGH-TECHNOLOGY REVOLUTION. *Technology review*, 88(7), 32-41.
- Momeni, M., Relefors, J., Khatri, A., Pettersson, L., Papadopoulos, A.V. & Nolte, T. 2022. Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell. *Automation in Construction*, 133, 103990.
- Moravec, H.P. 2000. *Robot: Mere machine to transcendent mind*. Oxford University Press on Demand.
- Morell, J. 2017. Self-driving mining trucks. *Mechanical Engineering Magazine*. The American Society of Mechanical Engineers.
- Najafi, F.T. & Naik, S.M. 1989. Potential applications of robotics in transportation engineering. *Transportation Research Record*, (1234), 64-73.
- Neves, A.C., Gonzalez, I., Leander, J. & Karoumi, R. 2017. Structural health monitoring of bridges: a model-free ANN-based approach to damage detection. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(5), 689-702.

- Neves, A.C., Leander, J., González, I. & Karoumi, R. 2019. An approach to decision-making analysis for implementation of structural health monitoring in bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(6), e2352.
- Noone, G. 2020. *What does the future hold for automation in the mining industry?* [Online]. NS Energy. Available: <https://www.nsenerybusiness.com/features/automation-mining-industry-future/> [Accessed May 28 2021].
- NRC 2002. *Evolutionary and Revolutionary Technologies for Mining*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Orica. 2020. *Orica and Epiroc unveil prototype system for first stages of underground automation* [Online]. Available: <https://www.orica.com/news-media/news-media/orica-and-epiroc-unveil>.
- Osmani, A., Haas, C. & Hudson, W.R. 1996. Evaluation of road maintenance automation. *Journal of Transportation Engineering*, 122(1), 50-58.
- Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H. & Bock, T. 2018. A framework of indicators for assessing construction automation and robotics in the sustainability context. *Journal of Cleaner Production*, 182, 82-95.
- Paulsson, S.-A. 2009. *Framtiden tillhör den kompetente* [Online]. Available: <https://www.automationregion.com/framtiden-tillhor-den-kompetente/> [Accessed 20220510].
- Radopoulou, S.C. & Brilakis, I. 2016. Improving Road Asset Condition Monitoring. *Transportation Research Procedia*, 2016. 3004-3012.
- Rahm, H.G. 1988. Robots in the Swedish construction industry. *The 5th International Symposium on Robotics in Construction, June 6-8, Tokyo, Japan. , 1988*.
- Regeringen. 2020. *Sweden's climate policy framework (In Swedish)*. Available on: <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/miljo-och-klimat/mal-for-miljo/> [Online].
- Regeringen 2021. *Framtidens infrastruktur - hållbara investeringar i hela Sverige*. Prop. 2020/2021:151. In Swedish.
- Salet, T.A., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P. & Laagland, H.L. 2018. Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236.
- Samuelsson, O. 2020. *Digitaliseringsstrategier i den svenska bygg- och installationsbranschen - en kartläggning*.
- Sandstrom, C. 2011. Hasselblad and the shift to digital imaging. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 55-66.
- Sandvik. 2021. *Automation solutions: Revolutionize your surface drilling operations* [Online]. Available: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/landing-page/surface-drilling-automation/> [Accessed May 31 2021].
- SBUF. 2022. *Armeringsstation - robottillverkning av armering (In Swedish)*. Ongoing SBUF project 13556. Available on: <https://sbuf.se/Projektsida?project=c864ed26-8d58-4f63-ad0f-bb9a857df3b8> [Online].
- Schunnesson, H. 2009. Modern tools and equipment for tunnelling and drifting. *International Seminar on Safe and Rapid Development Mining : 06/05/2009 - 07/05/2009*. Nedlands, WA: Australian Centre for Geomechanics.
- Shah, R.K. 2014. A new approach for automation of location-based earthwork scheduling in road construction projects. *Automation in Construction*, 43, 156-169.
- Silfwerbrand, J. 2022. *Bropelare av SKB med kvarsittande 3D-utskrivna betongform - en pilotstudie*. TRITA-ABE-RPT-2131, Betongbyggnad, Bygghälsa, KTH. .
- Son, H., Kim, C., Kim, H., Han, S.H. & Kim, M.K. 2010. Trend analysis of research and development on automation and robotics technology in the construction industry. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(2), 131-139.
- Sorge, R., Buttafoco, D., Debenedetti, J., Menozzi, A., Cimino, G., Maltese, F. & Tiberi, B. 2019. BIM implementation – Brenner Base Tunnel project. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. CRC Press.
- Styffe, M. & Gustafsson, K. 2022. *Forskning och innovation. Årsrapport 2021*.
- Tarandi, V., Birke, H., Pettersson, U., Pierrou, Ö. & Sundquist, H. 1988. *Industrirobotar i byggindustrin, förstudie*. Bygghälsa, R15:1988.
- Toh, C.K., Sanguesa, J.A., Cano, J.C. & Martinez, F.J. 2020. Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476(2233).



- Topf, A. 2017. *Goldcorp partners with IBM to hunt for exploration targets at Red Lake* [Online]. Available: <http://www.mining.com/goldcorp-partners-ibm-hunt-exploration-targets-red-lake/> [Accessed May 31 2021].
- Trafikanalys 2021. Yttrande över Trafikverkets inriktningsunderlag inför transportinfrastrukturplanering för perioden 2022-2033. dnr 2020/73376.
- Trafikverket 2021. Förslag till nationell plan för transportinfrastrukturen 2022-2033. Publikationsnummer: 2021:186 (In Swedish).
- Victores, J.G., Martínez, S., Jardón, A. & Balaguer, C. 2011. Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration. *Automation in Construction*, 20(5), 629-636.
- Vieira, T., Ulvestad, Ø., Cabral, P. & Geicke, A. 2022. Randselva bridge, Norway: Designing and building solely based on BIM models. *Structural Concrete*.
- Walker, J. 2019. *AI in Mining – Mineral Exploration, Autonomous Drills, and More* [Online]. Available: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/ai-in-mining-mineral-exploration-autonomous-drills/> [Accessed May 31 2021].
- Wordsworth, S. 2021. *How reliable wireless communication is driving autonomous mining* [Online]. International Industrial Vehicle Technology. Available: <https://www.ivtinternational.com/features/how-reliable-wireless-communication-is-driving-autonomous-mining.html> [Accessed June 1 2021].
- Zanen, P.P.A., Hartmann, T., Al-Jibouri, S.H.S. & Heijmans, H.W.N. 2013. Using 4D CAD to visualize the impacts of highway construction on the public. *Automation in Construction*, 32, 136-144.
- Åhman, P. 2013. Robotar i byggbranschen - Möjligheter och användningsområden. Etapp IV - Kunskapsuppbyggnad och informationsspridning. Del I. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond SBUF.