

Tekoäly osana rakennushankkeen johtamista

Building 2030 osahankkeen loppuraportti

Kirjoittajat¹:

Antti Peltokorpi, Olli Seppänen & Roope Nyqvist, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos

20.1.2025

¹ Tutkimuksen toteutuksessa on ollut mukana Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Building 2030 tutkimushankkeen yrityskumppanit: Admicom, A-Insinöörit, Fira, Haahtela, Hilti, Skanska, YIT, Granlund, Jatke, Lujatalo, Parma, Pohjola Rakennus, Ramboll, Ramirent, Rejlers, SRV, Stark, Trimble ja Vastuu Group.

Lisätiedot: Antti Peltokorpi, antti.peltokorpi@aalto.fi

Sisällysluettelo

1	Tiivistelmä	3
2	Johdanto.....	4
2.1	Tutkimuksen tausta.....	4
2.2	Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät	4
3	Tulokset	6
3.1	Tekoälyn käyttö rakennushankkeiden paloturvallisuuden arvioinnissa.....	6
3.1.1	Tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät.....	6
3.1.2	Tulokset	6
3.1.3	Yhteenveto ja johtopäätökset	7
3.2	Generatiivinen tekoäly rakennusalan asiakirjojen ristiriitojen tunnistamisessa	8
3.2.1	Tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät.....	8
3.2.2	Tulokset	8
3.2.3	Yhteenveto ja johtopäätökset	9
3.3	Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö ja esteet rakentamisen johtamisessa ..	9
3.3.1	Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö: tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät.....	9
3.3.2	Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö: tulokset	10
3.3.3	Tekoälyn käytön esteet	15
3.3.4	Tekoälyn käytön esteiden yhteenveto ja johtopäätökset	30
4	Yhteenveto ja johtopäätökset	32
5	Lähdeluettelo.....	33

1 Tiivistelmä

Tämä raportti tarkastelee generatiivisen tekoälyn sovelluksien käyttömahdollisuuksia ja niiden vaikutuksia osana rakennushankkeiden johtamista, sekä esteitä, joita tekoälyn tehokkaaseen hyödyntämiseen liittyy. Tekoälyn soveltaminen on yleistynyt nopeasti, ja se tarjoaa uusia ratkaisuja erityisesti tiedon analysoinnin, tehtävien automatisoinnin ja päätöksenteon tueksi. Tämä tutkimus selvittää, kuinka erityisesti generatiivinen tekoäly voi parantaa rakentamisen tehokkuutta ja tuottaa arvoa sekä organisaatioille että yhteiskunnalle laajemmin.

Tutkimuksen keskeinen tulos on tuoda esiin generatiivisen tekoälyn eri sovellusalueet, joilla on potentiaalia luoda merkittäviä parannuksia rakentamisen johtamisessa. Käyttötapoja on tunnistettu yhdessä hankkeeseen osallistuneiden yritysten kanssa. Tekoälyn käytöstä on tutkimuksen perusteella hyötyä etenkin seuraavissa tehtävissä: 1) Kokousten puheenjohtajan ja sihteerin tehtävät, 2) Hankkeen viestinnän ja tilannetietoisuuden parantaminen, 3) Projektin tietojen analysointi ja parantaminen, sekä 4) Riskienhallinta.

Generatiivinen tekoäly (kuten kielimallit, kuvageneraattorit ja muut luovat tekoälysovellukset) soveltuvat erityisen hyvin etenkin tekstien tuottamiseen, tarkastamiseen ja analysointiin. Testatut sovellukset eivät vielä tutkimuksen tekohetkellä osanneet luotettavasti käsitellä 2D tai 3D-suunnitelma-aineistoja tai monimutkaisia taulukoita. Tekoälyllä potentiaalia, mutta sitä kannattaa opettaa yrityksen tai toimialan datalla. Suunnittelunalat ja yritykset, joilla on data hallussa (esim. dokumentointi ja muutostenhallinta) ovat muita valmiimpia tekoälyn hyödyntäjiä.

Tässä raportissa esitellyjen generatiivisen tekoälyn käyttötapojen osalta on painotettu niiden käytännönläheisyyttä ja soveltuvuutta erilaisiin rakentamisen johtamisen tehtäväkokonaisuuksiin. Eri käyttötapojen välillä on kuitenkin merkittäviä eroja, jotka vaativat räätälöityjä ratkaisuja ja toimintamalleja vastatakseen kunkin toimijan erityistarpeisiin.

Raportissa käsitellään myös tekoälyyn liittyviä keskeisiä haasteita, kuten tietosuojaa, eettisiä kysymyksiä ja teknologian käyttöönoton vaatimuksia. Tekoälyn käyttöönotto vaatii strategista suunnittelua, jotta sen hyödyt voidaan maksimoida ja mahdolliset riskit minimoida. Tuloksien perusteella havaittiin keskeiseksi myös kehittää osaamista ja varmistaa, että tekoälyn käyttö toteutetaan lainsäädännön ja hyvien eettisten periaatteiden mukaisesti.

Lopuksi raportti esittää suosituksia organisaatioille tekoälyn käyttöönoton tueksi esteiden murtamiseksi. Suositukset korostavat henkilöstön koulutuksen, tietoturvan ja selkeiden tavoitteiden merkitystä, jotta tekoäly voidaan integroida osaksi organisaation toimintaa vastuullisella ja kestäväällä tavalla. Näin tekoäly voi toimia kilpailuetuna ja tukena organisaation pitkän aikavälin tavoitteiden saavuttamisessa.

2 Johdanto

2.1 Tutkimuksen tausta

Tekoälymallit ja niiden käyttösovellukset (esim. ChatGPT, Gemini ja Claude) ovat kehittyneet nopeasti. Tekoäly (AI, Artificial Intelligence) viittaa järjestelmiin, jotka voivat suorittaa tehtäviä, jotka normaalisti vaativat ihmisen älykkyyttä, kuten oppimista, päätöksentekoa ja kielen ymmärtämistä. Rakennusalalla tekoälyllä on monia sovelluksia. Tekoäly voidaan jakaa ainakin kolmeen eri osa-alueeseen:

1. **Generatiivinen tekoäly:** Kykenee tuottamaan ja ymmärtämään luonnollista kieltä ja kuvia. Esimerkkejä: ChatGPT, Claude ja Gemini.
2. **Robotiikka:** Mekaanisten laitteiden, kuten robottien, ohjaus ja automatisointi. Esimerkki: Spot-robottikoira rakennustyömailla.
3. **Asiantuntijajärjestelmät:** Järjestelmät, jotka tukevat asiantuntijoiden työtä, tyypillisesti joko sääntöpohjaisesti tai oppivien algoritmien avulla (hyödyntäen koneoppimista). Esimerkki: Tietomallitarkastelut rakennusprojekteissa tai koneoppivien menetelmien tuetut suunnitteluohjelmat.

Tekoälyn on arvioitu korvaavan kokonaan monia työrooleja ja lisäksi tarjoavan tukea erilaisiin asiantuntijatehtäviin. Generatiivinen tekoäly vaikuttaa etenkin tietotyöhön, joka liittyy ammatteihin, joissa on korkeammat palkat ja koulutus (Chui ym. 2023, Eloundou 2023). Ohjelmistokehittäjät, jotka käyttivät GitHub Copilotia tekivät tehtäviään 56 % nopeammin kuin ne jotka eivät käyttäneet (Cihon ym. 2023). Tekoälyä käyttävät konsultit olivat huomattavasti tuottavampia (12,2 % enemmän tehtäviä ja 25,1 % nopeammin) ja tuottivat huomattavasti laadukkaampia tuloksia (yli 40 %) (DellAqua ym. 2023).

McKinsey arvioi generatiivisen tekoälyn vaikututtavan rakentamisen liiketoimintaan 0,7-1,2 % alan liikevaihdosta (Cihon ym. 2023). Suomalaisen talonrakentamisen liikevaihdolla (Tilastokeskus 2022) kokonaisvaikutus olisi noin 167–285 milj. euroa vuodessa. Aallon alustavat tutkimukset tekoälykielimallin käytöstä rakennushankkeen riskienhallinnassa osoittaneet, että tekoälystä voisi olla merkittävä lisäarvo rakennushankkeen johtamisessa (Nyqvist ym. 2024). Tarkempia etenkin geneeristen kielimallien sovellusalueita ja -menetelmiä ei ole kuitenkaan vielä tutkittu kattavasti.

2.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Tämä tutkimus keskittyy generatiivisen tekoälyn hyödyntämiseen rakentamisen johtamisessa. Tavoitteena on selvittää missä rakennushankkeen johtamistehtävissä ja prosesseissa tekoäly voisi tuoda lisäarvoa.

Tutkimus pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- **Missä rakennushankkeen johtamisen prosesseissa tekoälystä on hyötyä?**

- **Miten tekoälyä tulisi hyödyntää rakennushankkeen johtamisen prosesseissa?**

Käytännössä tutkimus jakautuu kolmeen osateemaan:

- 1. Tekoälykielimallien mahdollisuudet rakennushankkeen johtamisen prosesseissa**
 - a. esim. tehtävien automatisointi ja laadun parannus
- 2. Projektiasiakirjojen ja muiden aineistojen analyysi generatiivisen tekoälyn avulla**
- 3. Tekoälyn hyödyntäminen suunnitelmien arvioinnissa**
 - a. mm. suunnitelmien vaatimuksenmukaisuus, laatu ja rakennettavuus

Tutkimusmenetelmät valittiin kuhunkin osateemaan erikseen. Menetelminä hyödynnettiin mm. haastattelututkimusta, kyselyitä, työpajatyöskentelyä sekä todellisista projekteista kerättyjen dokumenttien analysointia. Tuloksia validoitiin neljässä työpajassa, joihin osallistui noin 20–30 asiantuntijaa erilaisista rakentamisen arvoketjun yrityksistä, mukaan lukien suunnittelijat, konsultit, pääurakoitsijat, erikoisurakoitsijat, tuotevalmistajat, ohjelmistoyritykset ja rakentajat. Tutkimuksen tulokset raportoitiin lisäksi opinnäytetöiden ja tutkimusjulkaisujen muodossa.

3 Tulokset

Tässä osiossa esitetään tutkimuksen keskeiset tulokset. Tuloksien läpikäynti alkaa kahden hankkeen aikana tehdyn diplomityön esittelyllä: (1) tekoälyn käyttö rakennushankkeiden paloturvallisuuden arvioinnissa ja (2) generatiivinen tekoäly rakennusalan asiakirjojen ristiriitojen tunnistamisessa. Diplomitöiden jälkeen tuloksissa siirrytään kattamaan generatiivisen tekoälyn potentiaalista käyttöä rakentamisen johtamisessa yleisesti ja tekoälyn hyödyntämisen esiteitä.

3.1 Tekoälyn käyttö rakennushankkeiden paloturvallisuuden arvioinnissa

3.1.1 Tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Anthony Laun diplomityö “Using artificial intelligence in evaluating fire safety design of construction projects” keskittyy generatiivisen tekoälyn soveltamiseen rakennushankkeiden paloturvallisuuden arvioinnissa. Rakennusprojektien paloturvallisuus on kriittinen osa suunnittelua ja toteutusta, ja tekoälyn avulla voidaan tunnistaa riskejä sekä analysoida mahdollisia paloturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä ennakoivasti. Tavoitteena oli tutkia tekoälyn (OpenAI generatiivisen tekoälymallin GPT-4) kykyä paloturvallisuussuunnitelmien arvioinnissa. Tuloksien avulla pyrittiin ymmärtämään tekoälyn kykyä parantaa paloturvallisuussuunnittelun tehokkuutta ja tarkkuutta.

Tutkimuksen tavoitteina oli (1) arvioida kielimallien suorituskkyä rakennushankkeiden suunnittelun vaatimustenmukaisuuden arviointiprosessin kussakin vaiheessa ja (2) tutkia menetelmiä edellä mainittujen tehtävien helpottamista kielimallien avulla. Tutkimusmenetelmät sisältsivät datankeruun paloturvallisuutta koskevista rakennusprojekteista ja analyysin tekoälymallien avulla.

3.1.2 Tulokset

Diplomityön tutkimustulokset osoittavat, että GPT-4 pystyy poimimaan sääntö- ja suunnittelutietoa tekstipohjaisista sääntely- ja teknisistä asiakirjoista, joiden esitysmuoto on järjestetty ja jäsennelty tarkasti ja luotettavasti. Lisäksi esivalmennettu malli pystyy poimimaan tietoa taulukoista, joiden tietorakenne on yksinkertainen, käyttämällä o-shot (mallille annetaan tehtäviä ilman esimerkkivastauksia) ja few-shot (mallille annetaan tehtävä, mutta sen lisäksi tarjotaan muutamia esimerkkejä oikeista ratkaisuksista) kehotuksia, mutta se ei pysty täysin saamaan tietoa taulukoista, joiden tietorakenne on monimutkainen.

GPT-4 pystyy tulkitsemaan paloturvallisuutta koskevia merkintöjä ja symboleja korkearesoluutiosissa teknisissä piirustuksissa, mutta se ei pysty suorittamaan tarkkoja tilantunnistustehtäviä, kuten symbolien laskemista ja paikantamista sekä viivakohteiden mittaamista. GPT-4o

pystyy kuitenkin poimimaan tekstimuotoista suunnittelutietoa piirustuskuvista 1-shot-kehottuksella tarkasti ja kokonaisuudessaan. Tekoälyn avulla paloturvallisuuteen liittyvää dataa voidaan siis näissä rajoissa käsitellä nopeasti ja kattavasti, mikä tukee suunnitteluprosessia. Tekoälymallien kehittyessä voidaan odottaa niiden kyvykkyyksien parantuvan, kuten jo nähtiin tutkimuksen aikana tapahtuvan.

GPT-4 pystyy suorittamaan tehokkaasti vaatimustenmukaisuuden analysointitehtäviä, kuten yleisten olosuhteiden tarkistamista ja numeerisia vertailuja hyvällä tarkkuudella, erityisesti uloskäyntien leveyksien arvioinnissa. Sen suorituskkyky on kuitenkin rajallinen joissakin paloturvallisuussuunnitelmissa, mikä johtuu alakohtaisen tarkan tiedon ja analyysilogiikan puutteesta, jota tekoälymallit hyödyntävät annettujen kommentojen suorittamiseen.

Esikoulutetun GPT-4-mallin mukauttamista tietograafien avulla suositellaan hallusinaatio-ongelmien vähentämiseksi ja vaatimustenmukaisuusanalyysin tarkkuuden lisäämiseksi. Yksityiskohtaisia ajatusketjuehdotteita, joissa on jäsenneltyjä, alakohtaisia ohjeita, olisi käytettävä esivalmennetun mallin tehokkuuden parantamiseksi koko suunnittelun arviointiprosessin suorittamisessa.

Tutkimuksen perusteella tekoälyn hyödyntäminen rakennushankkeiden paloturvallisuudessa tarjoaa uusia mahdollisuuksia suunnittelun laadun parantamiseen ja kustannussäästöihin. Tekoälytyökaluja voidaan käytännössä käyttää esimerkiksi suunnittelijoiden apuna arvioimaan paloturvallisuusratkaisuja, mikä helpottaa päätöksentekoa ja auttaa tunnistamaan ongelmia ja löytämään parhaita ratkaisuita.

3.1.3 Yhteenveto ja johtopäätökset

Laun diplomityöllä voidaan osoittaa, että tekoälyn käyttö rakennushankkeiden paloturvallisuuden arvioinnissa tarjoaa etuja niin tarkkuudessa kuin tehokkuudessaakin. Tekoälymallien avulla voidaan parantaa paloturvallisuussuunnittelua analysoimalla suuria datamääriä, minkä tekeminen perinteisin menetelmin voi olla työlästä.

Tutkimuksessa huomattiin myös rajoitteita ja niiden korjaamiseksi tarvittavia toimenpiteitä. On esimerkiksi suositeltavaa, että asiakirjoissa olevat monimutkaiset taulukot olisi jäsennellävä uudelleen, jotta ne olisi helpompi käsitellä tekoälysovelluksilla, kuten GPT-4:n tai räätälöityjen GPT-mallien avulla. Tällä voidaan osin vastata kielimallien nykyrajoitteisiin ja mahdollistaa sovellusten tehokkaamman käytön.

Diplomityössä esitellyistä edistysaskelista huolimatta GPT-malleilla ei ole vielä saavutettu täydellistä tarkkuutta ja luotettavuutta täysin automatisoiduissa vaatimustenmukaisuuden analysoinnissa. Tutkimusta olisi jatkettava tietämysgraafien kehittämisellä ja tarkentamisella yksityiskohtaisen sääntelyn vaikutusten tunnistamiseksi ja tietämysgraafipohjaisten kielimallien soveltamisen laajentamiseksi suunnittelun arviointiin palo- ja muilla tekniikan aloilla.

3.2 Generatiivinen tekoäly rakennusalan asiakirjojen ristiriitojen tunnistamisessa

3.2.1 Tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Tapio Pulkkinen diplomityö “Generative AI for identifying conflicts in construction industry documents” keskittyy generatiivisen tekoälyn kielimallien (kuten GPT-4) käyttöön rakennusalan asiakirjojen ristiriitaisuuksien tunnistamisessa. Rakennusprojekteissa syntyy suuri määrä tekstipohjaista aineistoa, kuten sopimuksia ja kokouspöytäkirjoja, joista yli 80 % on jäsenymätöntä. Manuaalinen analyysi on työlästä, ja sen vuoksi ristiriidat asiakirjojen välillä jäävät usein huomaamatta, mikä voi johtaa viivästyksiin, kustannusylityksiin tai jopa osapuolten väliin riitoihin.

Diplomityössä tutkittiin OpenAI tekoälymallin GPT-4 kykyä havaita ristiriitoja rakennusalan dokumenteista itsenäisen käytön lisäksi myös semanttisen haun ja tietograafitekniikoiden avulla. Tutkimusaineistona käytettiin suomalaisia rakennusprojekteja.

3.2.2 Tulokset

Diplomityön tulokset osoittivat, että GPT-4:ssa on potentiaalia rakennusasiakirjojen ristiriitojen tunnistamisessa, mutta sen toiminta ei vielä ole riittävän tarkkaa laajamittaiseen käyttöön. GPT-4 pystyi tunnistamaan tiettyjä ristiriitoja, kuten ristiriitaisia sopimusehtoja ja eroja aikatauluissa, mutta se teki myös virheellisiä johtopäätöksiä luokittelemalla konfliktittomiksi katsottavia tietoja ristiriitaisiksi. Tämä viittaa siihen, että käytetyllä mallilla ei vielä ole riittävää toimialakohtaista tietoa tarkkojen ja luotettavien analyysien tekemiseen rakennusalan monimutkaisista asiakirjoista.

Semanttinen haku ja tietograafitekniikat, joita myös testattiin tutkimuksessa, eivät parantaneet GPT-4 suorituskkyä odotetusti. Näiden menetelmien käytössä havaittiin olevan lisähaasteita, kuten monimutkaisuutta ja kustannustehottomuutta, minkä vuoksi niiden käyttö ristiriitojen tunnistamisessa ei ole hyödyllistä. Semanttinen haku saattoi palauttaa laajoja tulosjoukkoja, mutta näiden tulosten käsittely ja oikean ristiriitatiedon poimiminen osoittautui ongelmalliseksi ilman merkittävää ihmistyötä.

Vaikka suuret kielimallit, kuten GPT-4, eivät tässä vaiheessa ole riittävän tarkkoja ristiriitojen havaitsemisessa, ne tarjoavat lupaavan työkalun dokumenttien analysointiin ja tiedon poimimiseen. GPT-4 suoriutuu hyvin yksinkertaisista tehtävistä, kuten yksittäisten termien tunnistamisesta ja yksinkertaisten ristiriitojen erottamisesta, mutta monimutkaisempien konfliktien, kuten juridisten sopimuslausekkeiden ja projektin yksityiskohtaisten aikataulujen, tunnistaminen vaatii jatkokehitystä.

Tärkeä havainto tutkimuksessa oli, että kielimallit voivat hyödyntää suuria tietomääriä tehokkaasti, mutta jotta ne voisivat tunnistaa tarkasti rakennusalan asiakirjojen ristiriidat, niitä on

hienosäädettävä ja koulutettava alan erityispiirteisiin. Jatkotutkimuksessa tulisi keskittyä tekoälymallien toimialakohtaiseen hienosäätöön ja tiedonhallintamenetelmien kehittämiseen, jotta ristiriitojen tunnistaminen olisi sekä tarkempaa että kustannustehokkaampaa.

3.2.3 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimuksessa havaittiin, että generatiivinen tekoäly, kuten GPT-4, tarjoaa potentiaalin tehostaa rakennusalan asiakirjojen analysointia, erityisesti jäsentelemättömän datan hyödyntämisessä. Vaikka kielimallit pystyvät tunnistamaan joitain ristiriitoja asiakirjoissa, niiden luotettavuus monimutkaisten ristiriitojen, kuten sopimuslausekkeiden ja projektin yksityiskohtaisten aikataulujen osalta, on vielä rajallinen. Tämä johtuu pääasiassa kielimallien puutteellisesta toimialakohtaisesta tietämyksestä, minkä vuoksi ne usein tekevät virheellisiä tulkintoja. Lisäksi semanttinen haku ja tietograafitekniikat eivät parantaneet analyysin tarkkuutta, ja niiden käyttö osoittautui liian monimutkaiseksi ja kustannustehottomaksi.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että vaikka kielimallit eivät tällä hetkellä ole riittävän luotettavia ristiriitojen tunnistamiseen ilman merkittävää jatkokehitystä, niillä on suuri potentiaali tulevaisuudessa. Kielimallien hienosäätöä toimialakohtaiseksi tulisi jatkaa, ja kehityksen myötä näistä malleista voisi tulla arvokkaita työkaluja rakennusalan tiedonhallinnassa. Tulevat tutkimukset voisivat keskittyä erityisesti mallien tarkkuuden parantamiseen sekä parempien menetelmien kehittämiseen, jotka mahdollistavat suurten ja monimutkaisten tekstidokumenttien analysoinnin tarkemmin ja tehokkaammin.

3.3 Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö ja esteet rakentamisen johtamisessa

3.3.1 Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö: tausta, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Generatiivisen tekoälyn kehitys on edennyt nopeasti viimeisten vuosien aikana, ja erityisesti uusimmat mallit, kuten GPT-4o tai Claude 3, ovat tuoneet merkittäviä parannuksia tekoälyn kykyyn ymmärtää ja tuottaa sisältöä kuten tekstiä, kuvia ja ääntä.

Rakennusalalla tekoäly on yhä entistä keskeisemmässä roolissa digitalisaation edistämisessä, ja sen avulla voidaan ratkaista monia alalla pitkään vallinneita haasteita. Tekoälyllä on potentiaalia optimoida rakennushankkeiden prosesseja, kuten riskienhallintaa ja aikataulutusta, ja sen avulla voidaan tunnistaa ristiriitaisuuksia projektidokumenteista sekä parantaa suunnitelmien laatua. Tekoälyn avulla rakennushankkeiden johtaminen voi tehostua ja muuttua entistä tarkemmaksi ja ennakoivammaksi.

Tämän osatutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten generatiivinen tekoäly voi tukea rakennusprojektien johtamista ja missä tehtävissä sillä on suurin potentiaali tuoda lisäarvoa. Erityisesti tarkastellaan generatiivisen tekoälyn kykyä automatisoida tehtäviä ja parantaa niiden laatua asiantuntijaa tukevana työkaluna. Tekoälyn avulla voidaan tehostaa rakennusprosessien eri

vaihteita, kuten dokumenttien analysointia ja aikataulutusta, mikä vähentää virheitä ja parantaa kokonaislaadun hallintaa. Tutkimus pyrki tunnistamaan ne johtamisen osa-alueet, joissa tekoäly voi tuoda merkittäviä parannuksia tehokkuuteen ja ennakoitavuuteen.

Tutkimuksessa käytettiin useita menetelmiä, kuten kyselyitä ja fokusryhmäkeskusteluja, joiden avulla kartoitettiin tekoälyn käytön esteitä ja potentiaalisia käyttötapoja rakennusprojekteissa. Kyselyihin ja keskusteluihin osallistui suomalaisia rakennusalan ammattilaisia, joiden näkemykset ja kokemukset auttoivat tunnistamaan ne alueet, joissa tekoäly voi tuoda lisäarvoa, sekä ne haasteet, jotka rajoittavat sen käyttöä. Näiden menetelmien avulla saatiin arvokasta tietoa alan nykytilasta ja mahdollisuuksista tekoälyn hyödyntämisessä.

3.3.2 Generatiivisen tekoälyn potentiaalinen käyttö: tulokset

3.3.2.1 Potentiaaliset käyttötavat

Tekoälyllä on rakennushankkeissa monia käyttötapoja, jotka parantavat prosessien tehokkuutta ja tarkkuutta. Esimerkiksi asiakirjojen analyysi voidaan automatisoida tekoälyn avulla, jolloin virheiden määrä vähenee ja tiedon käsittely nopeutuu. Suunnittelunohjauksessa tekoäly auttaa optimoimaan päätöksiä ja parantamaan projektien laatua. Lisäksi tehtävien osittainen automatisointi keventää työnjohtajien taakkaa. Paloturvallisuussuunnitelmien arvioinnissa tekoäly kykenee analysoimaan suunnitelmien kattavuuden ja tunnistamaan mahdolliset uhat. Generatiivinen tekoäly voi myös havaita ristiriitaisuuksia dokumenteissa ja parantaa riskien hallintaa rakennusprojekteissa, mikä vähentää mahdollisten ongelmien riskiä.

Käytännön esimerkit osoittavat, että tekoälyä voidaan hyödyntää eri rakennushankkeiden johtamisen osa-alueilla, tuottaen lisäarvoa. Esimerkiksi asiakirjojen analysoinnissa tekoäly voi nopeuttaa tiedon käsittelyä ja vähentää inhimillisten virheiden määrää, mikä parantaa prosessien tarkkuutta. Tehtävien suunnittelussa tekoäly voi auttaa optimoimaan resursseja ja aikatauluja, mikä tekee projektien hallinnasta sujuvampaa ja vähentänyt viivästyksiä.

Tutkimuksen aikana käytiin työpajoissa läpi potentiaalisia generatiivisen tekoälyn käyttötapoja rakentamisen johtamisessa, joista tiivistettiin seitsemän potentiaalista käyttötapaa ja Building2030 osallistujien tekemänä asiantuntija-arviona saatiin potentiaalisuuden määritelmä, jotka näkyvät alla taulukossa 1.

Taulukko 1. Yhteenveto mahdollisista tavoista käyttää generatiivista tekoälyä rakentamisen hallinnassa (n=24)

Tehtävä	Esimerkkitapoja käyttää generatiivista tekoälyä	Potentiaali (0–10)
Puheenjohtajan ja sihteerin tehtävät	- Kokouspöytäkirjojen laatiminen - Aiempien ratkaisemattomien kysymysten esille ottaminen - Vastuualueiden jakaminen - Jatkokysymysten laatiminen	8,4±2

	- Ratkaisuehdotusten ja skenaarioiden laatiminen	
Viestinnän ja tilannetietoisuuden parantaminen	- Viestinnän ja yhteistyön parantaminen eri sidosryhmien välillä (esim. räätälöidyt viestintäratkaisut) - Tehokkaan tiedonvaihdon edistäminen (automaatio) - Tilannekuvan luominen - Rooliin perustuva räätälöity tilannekuva - Suodatetut tehtäväluettelot yksilöille - Ehdotetut ratkaisut tehtävien toteuttamiseksi - Tilannekuvan analyysi työmaakuvatiedoista - Ennakoiva kunnossapito (esim. laitteiden ja koneiden reaaliaikainen seuranta vikojen ennakoimiseksi ja jätteiden vähentämisen tukemiseksi). - Suorituskykyanalyysi (esim. automaattinen suorituskykyindikaattorien mittaus) optimointia varten	8,3±1,5
Tietojen analysointi ja parantaminen	- Tiedon etsiminen aineistosta - Tietojen analysointi - Tietojen parantaminen (esim. hankeasiakirjat, kuten hankesuunnitelmat, hankintasuunnitelmat ja laadunvarmistussuunnitelmat). - Laadunvalvonta (esim. materiaalien ja valmistusneiden töiden tarkastukset, jotka perustuvat eritelmiin ja hankkeista saatuihin dokumentointitietoihin) - Tuettu kustannusanalyysi ja budjetointi	8,1±2,3
Riskienhallinta	- Riskinhallintamenettelyjen määrittely - Riskien tunnistaminen - Riskianalyysi - Hallintastrategioiden kehittäminen - Aiemmistä hankkeista saatujen (hajanaisten) tietojen analysointi - Turvallisuuden seuranta ja analysointi kuvien, videon ja äänen perusteella - Kustannusten ylitysanalysit	8,1±1,6
Toteutussuunnitelmien analysointi ja parantaminen	- Tekstisuunnitelmien analysointi ja kirjoittaminen. - Konseptien ja skenaarioiden luominen - Erikoisohjelmistojen avulla teknisten toteutussuunnitelmien analysointi ja laatiminen	7,7±1,8
Kestävyyden ja ympäristövaikutusten arviointi	- Suunnitelmien analysointi ja parannusehdotusten laatiminen ympäristövaikutusten vähentämiseksi ja kestäväen rakentamisen edistämiseksi - Avustaminen materiaalien ja resurssien optimoinnin tunnistamisessa. - Vaatimustenmukaisuuden todentamisen tukeminen	7,6±1,3
Aikataulut	- Aikataulun analysointi ja valmistelu. - Tarvittavien resurssien arviointi ja resurssien kohdentaminen - Työaikataulun suunnittelu - Aikataulujen dynaaminen mukauttaminen muuttuvien olosuhteiden perusteella - Toimitusketjun hallinta, markkinasuuntausten, historiatietojen ja dynaamisten ennusteiden analysointi aikataulujen parantamiseksi	7,1±1,9

Yhteensä	8,3±1,3
-----------------	----------------

Seuraavaksi jokainen pääkäyttötapa käydään yksitellen läpi, tarkentaen taulukon esimerkkejä.

3.3.2.2 Puheenjohtajan ja sihteerin tehtävät

Generatiiviselle tekoälylle arvioitiin suurin potentiaali puheenjohtajan ja sihteerin tehtävissä, keskiarvolla 8,4, mikä korostaa generatiivisen tekoälyn havaittua tehokkuutta hallinnon automatisoinnissa.

Esimerkkinä puheenjohtajan ja sihteerin tehtävistä voidaan mainita, että generatiivinen tekoäly pystyy kirjoittamaan kokoustallenteet (esim. työmaakokousten muistiinpanot, urakoitsijakokousmuistiot tai suunnittelukokousten pöytäkirjat) lähes välittömästi ja tuottamaan automaattisesti laaditut kokouspöytäkirjat.

Kokonaiset tallenteet kokouksista voidaan myös syöttää tekoälylle ja pyytää sitä parantamaan ihmisen laatimia muistioita kokouksesta tallenteiden pohjalta. Tällä voidaan saada taltioitua kokouksista myös piirteitä, jotka yksittäisiltä ihmiskirjaajilta voi jäädä tekemättä.

Lisäksi generatiivinen tekoäly voi avustaa ihmispuheenjohtajaa tarjoamalla vertailevan analyysin nykyisestä kokouksesta aiempiin kokouksiin ja hankeasiakirjoihin. Analyysin avulla voidaan nostaa esiin asioita, jotka on jätetty huomiotta, luoda jatkokeskusteluita ja luoda ehdotuksia tai skenaarioita olemassa olevien ongelmien ratkaisemiseksi.

3.3.2.3 Viestinnän ja tilannetietoisuuden parantaminen

Toiseksi korostettiin generatiivisen tekoälyn roolia viestinnän ja tilannetietoisuuden parantamisessa rakennushankkeissa (keskiarvo 8,3). Tämä havainto korostaa generatiivisen tekoälyn havaittua kykyä virtaviivaistaa toimintaprosesseja ja lisätä sidosryhmien sitoutumista. Nämä havainnot viittaavat siihen, että generatiivinen tekoäly edistää entistä verkottuneempaa ja herkemmin reagoivaa rakentamisen johtamista.

Generatiivinen tekoäly voi räätälöidä toimijakohtaisia viestintäratkaisuja tiivistämällä hanke-tietoja (esim. kokouspöytäkirjoja, muistioita, työmaan valokuvia) muotoon, joka sisältää vain tietyn sidosryhmän kannalta olennaiset tiedot (esim. yhteenveto arkkitehtien arkkitehtuurikysymyksistä arkkitehteille, tai analysoida automaattisesti työmaan valokuvia työturvallisuuspuutteiden tunnistamiseksi).

Lisäksi generatiivinen tekoäly voi edistää tiedon jakamista automaation avulla. Henkilökohtaisten yhteenvetojen, viestien, tehtävien ja ratkaisuehdotusten luominen voitaisiin jakaa ihmisen valvonnassa laadunvarmistuksen vuoksi tai jopa ilman ihmisen vuorovaikutusta helpottaen ajantasaisen tilannekuvan ylläpitoa.

Tilannetietoisuuden edistämiseksi generatiivinen tekoäly voi lisäksi luoda roolipohjaisia tilannekuvia projektitiedoista, suodattaa tai luoda tehtäväluetteloita yksilöille ja ehdottaa ratkaisuja tehtävien toteuttamiseksi.

3.3.2.4 Tietojen analysointi ja parantaminen ja riskienhallinta

Kolmanneksi ja neljänneksi potentiaalisuutensa mukaan ovat, generatiivisen tekoälyn soveltaminen tietojen analysointiin ja parantamiseen sekä riskienhallintaan, jotka saivat kumpikin keskimäärin 8,1 pistettä arviossa. Tämä arvosana korostaa generatiivisen tekoälyn koettua tehokkuutta hankeanalyysin ja -dokumentaation parantamisessa, sekä riskienhallinnassa.

Generatiivista tekoälyä voitaisiin käyttää tiedon etsimiseen suurista tietomääristä, tietojen analysointiin ja parannusten tekemiseen. Tietojen parantamiseen voi kuulua hankesuunnitelmien ja suunnittelukuvausten tarkistaminen tai jopa asiakirjojen, kuten hankesuunnitelmien, hankintasuunnitelmien, laadunvarmistussuunnitelmien ja sopimusten, kirjoittaminen, joita ihmisasiantuntijat voivat työstää, viimeistellä ja käyttää.

Lisäksi kielimuurit voidaan poistaa; generatiivinen tekoäly voi ymmärtää useita kieliä ja tuottaa tuloksia riippumatta siitä, onko sille toimitetuissa tiedoissa eri kieliä. Näin ollen on mahdollista, että paikallisen kielitaidon merkitys hankkeen sidosryhmille vähenee. Esimerkiksi tehtäväsuunnitelmat eri suoritteiden toteuttamisesta voidaan yksilöidä automaattisesti työtä suorittavan henkilön omalle kielelle.

Tutkimuksessa todettiin, että riskien tunnistamista, analysointia ja hallintastrategioita voidaan parantaa. Generatiivista tekoälyä voidaan käyttää koko projektin riskinhallintaprosessissa alkaen riskinhallintamenettelyjen ja -menetelmien määrittelystä riskien tunnistamisen, riskianalyysin ja riskinhallintastrategioiden kehittämisen kautta. Generatiivisella tekoälyllä on potentiaalia analysoitaessa monipuolista ja hajanaista tietoa, jota ihmisten on usein työlästä ja vaikeaa käsitellä.

Lisäksi generatiivista tekoälyä voidaan käyttää turvallisuusseurannassa ja -analyysissä, joka perustuu erilaisiin työmailta saatuihin tietoihin (esimerkiksi kuviin, videoihin ja ääniin), sekä riskianalyysien tekemiseen kustannus- ja rahoitustietojen perusteella.

3.3.2.5 Toteutussuunnitelmien analysointi ja parantaminen

Toteutussuunnitelmien analysointi ja parantaminen sai keskimääräisen potentiaalipistemäärän 7,7. Havainnollistavana esimerkkinä voidaan mainita, että generatiivinen tekoäly voisi analysoida ja parantaa olemassa olevia suunnitelmia ja luoda uusia suunnitelmia (esim. hankesuunnitelmia, laadunvalvontasuunnitelmia tai tehtäväkohtaista suunnittelua), luoda konsepteja ja skenaarioita, joita ihmisasiantuntijat voisivat viimeistellä. Generatiivista tekoälyä voitaisiin käyttää myös erikoistuneissa ohjelmistoissa (esim. rakennesuunnittelun optimoinnissa) ohjelmiston nykyisten valmiuksien parantamiseksi.

Toteutussuunnitelmista lupaavia alustavia tuloksia on saatu erityisesti konseptuaalisten suunnitelmien laatimisesta. Teknisesti tarkkojen toteutuskuvien laatiminen on generatiivisen tekoälyn sovelluksille ollut vaikeaa, mitä luonnoskuville ei puolestaan vaadita. Kielimallien vahvuus onkin ehdottomasti nykytilan mukaisesti tekstimuotoisten suunnitelmien laadinnassa, kuten rakennusselostuksien tekstimuotoisten osuuksien parantamisessa, jossa tekoälyn käyttö voi nopeuttaa ja parantaa ihmisen tekemää työtä merkittävästi.

3.3.2.6 Kestävyyden ja ympäristövaikutusten arviointi

Tutkimuksessa selvitettiin generatiivisen tekoälyn merkittävää roolia kestävän kehityksen ja ympäristövaikutusten arvioinnin edistämiseksi. Tulokset osoittavat sen mahdollisuudet edistää ympäristön kannalta vastuullisia rakennuskäytäntöjä.

Tämä osa generatiivisen tekoälyn soveltamista korostaa teknologian kykyä analysoida ja ehdottaa parannuksia ympäristöjalanjäljen pienentämiseksi, mikä edistää siirtymistä kohti kestävämpiä rakennusmenetelmiä ja resurssien käyttöä. Nämä havainnot korostavat ympäristönäkökohtien sisällyttämistä rakentamisen hallintaan, mikä edistää alan pyrkimyksiä kestäväan kehitykseen. Generatiivisella tekoälyllä on potentiaalista kykyä analysoida kestävyyssuorituskykyä ja ehdottaa toimivia parannuksia, ja täten edistää kestävän kehityksen roolia rakennusallalla.

Yhtenä mahdollisuutena suomalaiselle rakentamiselle on koota kotimaista ympäristödataa yhteen tietokantaan, jolla saatavilla olevat johtavat tekoälymallit voidaan kouluttaa huomioimaan paikallinen toimintakulttuuri ja vaatimukset. Tätä uutta alueellisesti koulutettua mallia voitaisiin tällöin käyttää vastuullisen rakentamisen tukiälynä.

3.3.2.7 Aikataulutus

Aikataulutus sai valituista tehtävistä alhaisimmat potentiaaliset pisteet. Tämä osoittaa, että vaikka generatiivisella tekoälyllä on potentiaalia muutoksiin eri rakentamisen johtamisen osaluissa, sen integroiminen aikataulutustehtäviin vaatii yhä lisätutkimuksia ja mukauttamista, jotta sen potentiaali voidaan hyödyntää täysimääräisesti ja jotta voidaan vastata erityisiin suunnittelun ja resurssien jakamisen haasteisiin.

Tutkimuksessa testattujen sovelluksien (esim. GPT-4o ja Gemini) kyvyt käsitellä perinteisiä jana-aikatauluja ja paikka-aikakaavioita ovat olleet heikkoja. Tekoälylle on ollut vaikea ymmärtää kuvamuotoisia aikatauluja. Toisaalta tekoälylle on ollut helppo ymmärtää tekstimuotoisia kuvauksia töistä ja laatia aikataulujapohjia tekstimuotoisena esimerkiksi osana tehtäväsuunnitelmia.

3.3.2.8 Muita mahdollisuuksia generatiivisen tekoälyn käyttöön

Tutkimushankkeen aikana havaittiin myös potentiaalisia generatiivisen tekoälyn käyttötapoja, joita alkuperäisessä työpajatyöskentelyssä ja arvioinnissa ei katettu tarkasti. Muita potentiaalisia käyttötapoja voi olla prosessien määrittely, robotiikka ja hankesuunnittelu.

Prosessien määrittelyllä tarkoitetaan, että generatiivista tekoälyä voidaan käyttää johtamisjärjestelmän laatimiseen. Esimerkiksi määrittää hankkeen kuvauksien perusteella millaisia johtamisprosesseja tulee hankkeelle perustaa ja miten eri johtamistehtävät integroidaan.

Robotiikan havaittiin kehittyneen tutkimushankkeen aikana ja vaikka sen rooli johtamisessa on yhä pieni, voidaan maalata tulevaisuuskuva missä robotiikan avulla saadaan etenkin ajantasaista tilannekuvan päivitystä työmailta johtamisen tueksi. Myös käytännön suoritteiden automatisointia robotiikan avulla voidaan nähdä tulevaisuudessa.

Kolmantena, koska tutkimuksessa rajattiin rakentamisen johtamisen tehtäviä pääosin rakentamisaikaan, hankesuunnittelua ei syvällisesti käsitelty. On kuitenkin syytä mainita, että suurten kielimallien edut korostuvat luovissa laadullista arviointia sisältävissä tehtävissä. Täten generatiivisen tekoälyn sovelluksilla voidaan argumentoida olevan merkittäviä potentiaalisia hyötyjä hankesuunnittelun tukena.

3.3.3 Tekoälyn käytön esteet

Seuraavassa osassa käsitellään rakennusteollisuuden esteitä, jotka liittyvät tehokkuuden parantamiseen ja arvon tuottamiseen tekoälyn avulla. Jatkuvista ponnisteluista huolimatta tehokkuuden parantamista ovat haitanneet pysyvät esteet. Kehittyvä tekoäly, joka kykenee vastaamaan ihmisen kykyjä tai jopa ylittämään ne joissain tehtävissä, tarjoaa uudenlaisen tilaisuuden ratkaista rakentamisen johtamisen aiempia ongelmia.

Aiemmissa tutkimuksissa on tutkittu tekoälyä rakentamisessa, mutta tekoälyteknologioiden, kuten ChatGPT:n, Gemini tai Clauden, tehokas käyttöönotto on vielä suurelta osin hyödyntämättä, ja niissä on keskitytty lähinnä tiettyjen valmiuksien testaamiseen luomatta kattavaa kuvaa esteistä, jotka haittaavat tekoälyn täysimääräistä hyödyntämistä. On olemassa potentiaalia merkittäviin edistysaskeliin, kun tunnistetaan ja arvioidaan paremmin nykyisiä tekoälyn käytön esteitä.

Tunnistamalla tekoälyn esteitä voi optimaalisesti suunnata resursseja alueisiin, joilla on eniten potentiaalia, ja paljastaa akilleenkantapäät. Koska tekoälyllä on kyky nopeuttaa edistystä rakentamisessa, tässä tutkimuksessa pyritään tutkimaan sen käytön esteitä tehokkuuden ja arvon saamisen lisäämiseksi. Tunnistamalla tekoälyn käyttöönoton esteet tutkimus pyrkii edistämään rakentamisen johtamista kohti innovatiivisempia ja tehokkaampia tuloksia.

Tässä osiossa keskitytään tekoälyn hyödyntämisen esteisiin rakentamisen johtamisessa, tunnustetaan kirjallisuudesta neljätoista keskeistä estettä, joilla voi olla merkitystä, ja tarkastellaan kunkin esteen kriittisyyttä sekamenetelmällisen lähestymistavan avulla, johon sisältyy kvalitatiivista ja kvantitatiivista aineistoa, joka on saatu fokusryhmäkeskustelusta ja arviointikyselylomakkeesta, joka toteutettiin Building2030-hankkeen aikana ja joka tarjosi arvokkaita reaali maailman näkökulmia tutkimukseen.

Tulokset paljastavat monenlaisia esteitä ja niiden kriittisiä piirteitä ja tarjoavat käytännön näkemyksiä niiden ymmärtämiseksi ja hallitsemiseksi. Tässä raportissa nämä havainnot myös asetetaan laajempaan kontekstiin, keskustellaan teoreettisista, käytännön ja hallinnollisista vaikutuksista ja määritetään tulevia tutkimussuuntia.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tutkimus tarjoaa kattavan tunnistuksen ja arvioinnin tekoälyn esteistä rakentamisen johtamisessa ja edistää keskustelua tekoälyn roolista myönteisen muutoksen aikaansaamisessa rakennusallalla. Tämä on linjassa tekoälyn täyden potentiaalin saavuttamisen tavoitteen kanssa ja merkitsee edistysaskelta tekoälyn teoreettisessa ja käytännön ymmärtämisessä rakentamisen johtamisessa.

3.3.3.1 Tekoälyn käytön esteet: kirjallisuuskatsaus

Tekoälyn kehittyminen rakentamisessa on edennyt automaation alkuvaiheista pitkälle kehittyneisiin tekoölyyn perustuviin ratkaisuihin, jotka kohdistuvat tiettyihin ongelmiin. Viime aikoina alalle on kehitetty generatiivisia tekoälyteknologioita, jotka lupaavat mullistaa sekä rakentamisen analyyttiset että luovat näkökohdat (Abioye ym. 2021, Ghimire ym. 2024).

Tekoälyn varhaiset sovellukset rakennusallalla helpottivat pääasiassa perustietojen analysointia ja rutiinitehtävien automatisointia, ja myöhemmät edistysaskeleet sisälsivät koneoppimista hankkeiden aikataulutuksen parantamiseksi (Amer ja Golparvar-Fard 2021) ja robotiikan hyödyntämistä fyysisissä tehtävissä, kuten betonitöissä. Generatiivisen tekoälyn suosion ja kykyjen kasvu merkitsee siirtymistä kohti rakentamisen luovien näkökohtien, kuten suunnittelun, parantamista tehokkuuden ja turvallisuuden parantamisen ohella (Abioye ym. 2021, Bolpagni ym. 2021, Ghimire ym. 2024), mikä korostaa tekoälyn kasvavaa vaikutusta rakentamisen hallintakäytäntöjen optimoinnissa.

Generatiivinen tekoäly, joka on tekoälyn alaryhmä, on erityisesti suunniteltu tuottamaan uutta dataa, joka muistuttaa sen harjoitusdataa ja pystyy tuottamaan monimutkaisia tuotoksia, kuten tekstiä, kuvia tai ääntä (Banh ja Strobel 2023). Suuret kielimallit, yksi generatiivisen tekoälyn luokka, käsittelevät ja tuottavat ihmisen kieltä laajojen datakokoelmien perusteella. Näiden mallien kyky ymmärtää asiayhteyksiä, vivahteita ja tekoälyn sisällyttämislle rakentamisen johtamiseen on useita esteitä, jotka on tiivistetty ja kuvattu taulukossa 2. Nämä esteet korostavat ratkaisujen kehittämisen tärkeitä osa-alueita, jotta voidaan varmistaa tekoälyn tehokas hyödyntäminen rakennushallinnossa. Kun esteisiin puututaan, alan yleinen myönteinen kehitys voidaan toteuttaa tehokkaasti.

Tekoälyn nykyisessä integroinnissa rakentamiseen on käytetty aiemmin pääasiassa koneoppimista, robotiikkaa ja data-analytiikkaa, jotka yhdessä parantavat projektinhallintaa, turvallisuutta ja toiminnan tehokkuutta (Abioye ym. 2021, Bolpagni ym. 2021, Ghimire ym. 2023, Ivanova ym. 2023). Koneoppimiseen perustuvat ratkaisut ovat parantaneet merkittävästi aikataulutuksen tarkkuutta, robotiikka on automatisoinut manuaalisia tehtäviä, ja kehittyneellä analytiikalla on pyritty parantamaan suorituskykyä esimerkiksi riskienhallinnan alalla. Nämä

teknologiset edistysaskeleet merkitsevät siirtymää kohti entistä tietovetoisempaa ja teknologisesti kehittyneempää rakennusalaan, mikä muuttaa perusteellisesti käytäntöjä ja koko alaa (Rafsanjani ja Nabizadeh 2023).

Taulukko 2. Tekoälyn hyödyntämisen esteet

Esteet	Kirjallisuuslähteet
Hyväksymisvastarinta: Rakennusteollisuus on perinteisesti hidas omaksumaan uutta teknologiaa. Tekoälyn kaltaisten korkean teknologian ratkaisujen integroinnille on kulttuurisia ja logistisia esteitä. Ihmisten on vaikea pysyä nopean teknologisen kehityksessä mukana. Ihmisten ja organisaatioiden on kyettävä sopeutumaan nopeasti muuttuvaan ympäristöön, ja tämä johtaa siihen, että suuri osa potentiaalista jää hyödyntämättä.	Abioye ym. 2021, Ivanova ym. 2023, Papadaki ym. 2023, Liu L ym. 2024, Love ym. 2023, Wang ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Egwim ym. 2024, Liu Q ym. 2024
Kulttuurikysymykset ja selitettävissä oleva tekoäly: Rakennusala, joka on yksi vähiten digitalisoituista aloista, vallitsee vahva uusien teknologioiden vastustamisen kulttuuri. Vastarintaa lisää monien tekoälyjärjestelmien ”black-box”-luonne, sillä ne eivät selitä päätöksiään. Avoimuuden puute voi haitata luottamusta ja hyväksyntää rakennusalan ammattilaisten keskuudessa.	Abioye ym. 2021, Dwivedi ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Robinson ym. 2021, Baduge ym. 2022, Brynjolfsson ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Papadaki ym. 2023, Wach ym. 2023, Egwim ym. 2024, Ghimire ym. 2024
Taloudelliset rajoitteet, kuten korkeat aloituskustannukset: Tekoälyteknologian alkuinvestoinnit voivat olla korkeat, mikä tekee siitä esteen etenkin pienemmille yrityksille. (Uudet työkalut ja sovellukset ovat merkittävästi alentaneet aloituskustannuksia).	Abioye ym. 2021, Dwivedi ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Brynjolfsson ym. 2023, Ivanova ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Papadaki ym. 2023, Wang ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Dodampegama ym. 2024, Ghimire ym. 2024, Liang ym. 2024, Liu L ym. 2024
Tietoturva ja yksityisyys: Rakennusalan yritysten on otettava käyttöön yhä enemmän digitaalisia työkaluja, ja niiden on otettava huomioon myös lisääntyneet riskit, jotka liittyvät tietoturvaan ja yksityisyyteen.	Abioye ym. 2021, Ivanova ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Wach ym. 2023, Wang ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Egwim ym. 2024, Liang ym. 2024, Liu L ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024

Talenttipula ja tekoälyvalmiuksien ymmärtäminen: Rakennusalalla on huomattava pula ammattilaisista, joilla on kokemusta tekoälystä. Tämä puute tekee alan erityistarpeisiin räätälöityjen tekoälyratkaisujen kehittämisen ja toteuttamisen haastavaksi. Merkittävä este on myös se, että ammattilaisten on vaikea ymmärtää ja ennustaa tekoälyn ominaisuuksia ja rajoituksia. Ymmärtämättömyys voi johtaa siihen, että tekoälyä ei käytetä asianmukaisesti, mikä johtaa virheisiin ja heikentyneeseen suorituskykyyn.	Abioye ym. 2021, Dwivedi ym. 2021, Haefner ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Robinson ym. 2021, Zhang ym. 2021, Brynjolfsson ym. 2023, Dell'Acqua ym. 2023, Egwim ym. 2023, Ivanova ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Papadaki ym. 2023, Wang ym. 2023, Datta ym. 2024, Dodampegama ym. 2024, Liu L ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024
Etiikka ja hallinto: Eettiset näkökohdat ja tehokkaiden hallintokehysten tarve ovat ratkaisevan tärkeitä, etenkin kun tekoälyllä alkaa olla yhä keskeisempi rooli kriittisissä päätöksentekoprosesseissa rakentamisessa. Vastuullisuuteen, oikeudenmukaisuuteen ja avoimuuteen liittyvät kysymykset ovat merkittäviä huolenaiheita, jotka on otettava huomioon.	Abioye ym. 2021, Dwivedi ym. 2021, Wach ym. 2023, Ghimire ym. 2024, Liang ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024
Vähäinen digitalisaatio ja käsityön hallitsevuus: Rakentaminen on hyvin vähän digitalisoitunut muihin aloihin verrattuna, ja se luottaa pitkälti käsityöhön. Tämä tilanne johtaa tehottomuuteen, kuten hankkeiden viivästymisiin, kustannusvajauksiin, heikkoon laatuun, epäetoiseen päätöksentekoon ja alhaiseen tuottavuuteen. Lisäksi manuaalisen työn tehtäviä on vaikea parantaa esimerkiksi generatiivisilla tekoälyratkaisuilla.	Ivanova ym. 2023
Tietojen yhteentoimivuuteen ja laatuun liittyvät kysymykset: Tämä vaikeuttaa erilaisten digitaalitekniikoiden integrointia rakennushankkeiden eri vaiheissa. Tämä este vaikuttaa saumattomaan tiedonkulkuun ja rajoittaa digitaalisen muutoksen mahdollisia hyötyjä. Myös tietojen laatu vaihtelee, mikä vaikeuttaa niiden hyödyntämistä ja vaikuttaa tekoälysovellusten tehokkuuteen. Lisäksi alakohtaisten avoimien tietokokonaisuuksien, esimerkiksi rakennusten rakennesuunnitelmien, määrä on edelleen vähäinen, mikä haittaa tekoälyn kehittämistä ja vertailuanalyysijä.	Dwivedi ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Zhang ym. 2021, Baduge ym. 2022, Brynjolfsson ym. 2023, Ivanova ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Wang ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Dodampegama ym. 2024, Egwim ym. 2024, Ghimire ym. 2024, Liang ym. 2024, Liao ym. 2024, Liu L ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024

Tuotetun sisällön laatu, hallusinaatiot, valvontakysymykset ja muut tekniset rajoitukset: Teknologia, kuten ChatGPT, voivat tuottaa tuotoksia, jotka kärsivät huonosta laadusta, vääristä tiedoista, väärennetyistä sisällöistä ja algoritmisesta puolueellisuudesta johtuen suurista, moninaisista ja joskus epäluotettavista tietokoneaisuuksista, joihin ne on koulutettu. Esimerkiksi GPT-4 ja Gemini 1 eivät ymmärrä kuvia pdf-dokumenteissa, eivätkä ne pysty lukemaan luotettavasti Gantt-kaavioita, paikka-aika kaavioita ja tahtiaikatauluja. Ratkaisut ovat myös usein riittämättömiä lukemaan taulukoita, joita ei ole erityisesti optimoitu tekoälyä varten, mutta joita ihmisten on silti helppo lukea.	Haefner ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Love ym. 2023, Wach ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Ghimire ym. 2024, Liang ym. 2024, Liao ym. 2024, Liu Q ym. 2024
Toimialan hajanainen rakenne ja toimitusketjuun liittyvät ongelmat: Rakennusala on erittäin pirstaloitunut, mikä vaikeuttaa uusien teknologioiden standardointia ja laajaa käyttöönottoa. Pirstaleisuus johtaa usein päätöksentekoprosessien hajanaisuuteen ja tehottomuuteen.	Robinson ym. 2021, Liu Q ym. 2024
Sääntelyyn ja standardointiin liittyvät kysymykset: Rakentamisen digitaalitekniikkaa koskevien yhtenäisten säännösten ja standardien puute lisää monimutkaisuutta. Tämä johtaa erilaisiin käytäntöihin ja vaikeuttaa uusien digitaalisten työkalujen integrointia koko alalla.	Abioye ym. 2021, Dwivedi ym. 2021, Pan ja Zhang 2021, Robinson ym. 2021, Zhang ym. 2021, Brynjolfsson ym. 2023, Dell'Acqua ym. 2023, Ivanova ym. 2023, Lin ym. 2023, Love ym. 2023, Papadaki ym. 2023, Wang ym. 2023, Dodampegama ym. 2024, Egwim ym. 2024, Liu L ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024
Teknologian saatavuus: Rakennusalan kehityksen kannalta keskeinen tekijä on strateginen riippuvuus tiettyistä teknologioista, erityisesti tekoälyratkaisuista. Näiden teknologioiden saatavuus voi olla rajoitettua joillakin alueilla, mikä johtuu maailmanlaajuisista toimitusketjujen haasteista ja kansainvälisestä kilpailusta. Tekoälyn tehokas käyttö rakennusalalla edellyttää, että näiden teknologioiden saanti on varmistettu, mikä voi vaatia uusia strategioita toimitusketjujen hallintaan ja teknologiainvestointeihin. Osa ratkaisuksista voi olla myös saatavissa vain tiettyjen yritysten tai ekosysteemien sisällä rajoittaen	Abioye ym. 2021, Ivanova ym. 2023, Papadaki ym. 2023

kilpailua. Lisäksi kansainvälisesti monilla rakennustyömailla ei ole vankkaa internet-yhteyttä ja laskentatehoa, joita tarvitaan tekoälysovellusten tukemiseen. Tämä infrastruktuurivaje voi rajoittaa tekoälyteknologioiden tehokkuutta ja luotettavuutta työmaalla.	
Integroinnin haasteet (tekoälyn ja nykyisten tehtävien vaatimukset) sekä ihmisen ja tekoälyn yhteistyöongelmat: Tekoälyn integroiminen nykyisiin työprosesseihin ja järjestelmiin aiheuttaa merkittäviä haasteita, erityisesti silloin, kun tekoälyn ominaisuudet eivät ole täysin linjassa tehtävän vaatimusten kanssa. Tämä epäsuhta voi johtaa tuottavuuden ja laadun heikkenemiseen. Lisäksi tekoälyn tehokkuus riippuu suuresti siitä, miten hyvin ihmiset pystyvät tekemään sen kanssa yhteistyötä. Yhteistyössä tehdyt virheet voivat johtaa tehokkuuden heikkenemiseen ja virheellisiin tuloksiin. Tekoälymenetelmien kattavat katsaukset ja integroidut arvioinnit puuttuvat rakentamisen alalta.	Dwivedi ym. 2021, Dell'Acqua ym. 2023, Lin ym. 2023, Wang ym. 2023, Barjuei ym. 2024, Liang ym. 2024, Liao ym. 2024, Liu L ym. 2024, Liu Q ym. 2024, Wagar 2024
Integroinnin haasteet (tekoäly ja robotiikka): Tekoälyn ja robotiikan integroiminen olemassa oleviin järjestelmiin (esim. jätehuolto) aiheuttaa logistisia ja teknisiä haasteita. Tarve tehdä huomattavia muutoksia uusien teknologioiden käyttöönottamiseksi voi olla merkittävä este.	Barjuei ym. 2024, Dodampegama ym. 2024, Liang ym. 2024

Tekoälyn hyödyntämisen mahdolliset hyödyt rakentamisen hallinnassa ovat moninaiset, kuten tehokkuuden parantaminen, päätöksenteon tehostaminen, parempi riskienhallinta (Nyqvist ym. 2024) ja luovuuden lisääminen. Nämä edistysaskeleet lupaavat merkittäviä taloudellisia ja ympäristöön liittyviä hyötyjä, resurssien käytön optimointia ja jätteiden minimointia, mikä ohjaa rakennusalaan kohti kestävämpiä ja kustannustehokkaampia käytäntöjä (McKinsey & Company 2023), mikä perustele tarvetta tunnistaa ja voittaa nykyiset esteet.

Toistaiseksi tutkimus tekoälysovellusten käytön esteistä rakentamisen hallinnassa on tuottanut epätäydellisiä ja vaihtelevia tuloksia, mikä estää näiden teknologioiden tehokkaan käytön potentiaalisen arvon saamisen. Yksittäiset tutkimukset käsittelevät tekoälyn käytön erityisiä esteitä ja ongelmia, esimerkiksi vaikka koneoppiminen on erinomainen ennakoivassa analytiikassa, se on vahvasti riippuvainen suurista tietokokonaisuuksista. Robotiikka tarjoaa lisää tarkkuutta ja nopeutta fyysisiin tehtäviin, mutta siihen liittyy korkeita kustannuksia ja se ei sovellu tehtävien vaihteluun. Data-analytiikka voi parantaa riskienhallintaa merkittävästi, vaikka sen tehokkuus riippuu taustalla olevien tietojen laadusta (Kamari ja Ham 2022). Nämä oivallukset

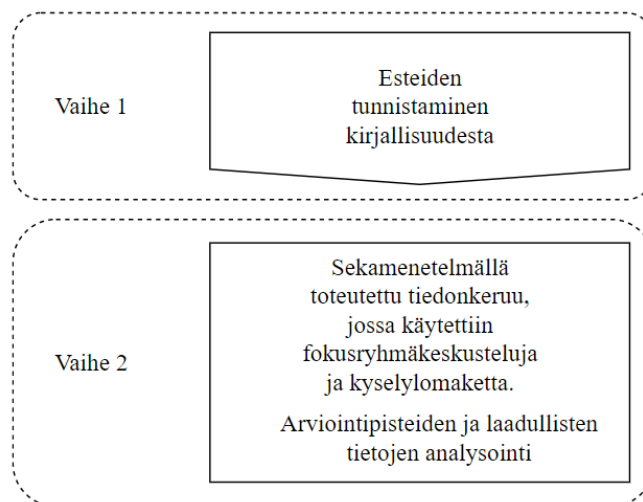
korostavat, että tarvitaan toimialakohtaista yhteenvedoa esteistä, jotta voidaan tukea integrointistrategioita, joilla vastataan ainutlaatuisiin haasteisiin ja hyödynnetään täysimääräisesti tekoälyteknologioiden potentiaalia (Bolpagni ym. 2021).

Lisäksi rakentamisen johtamisen tutkimus paljastaa, että kattava ymmärrys tekoälyn esteiden koko kirjosta ja niiden kriittisyyden arvioinnista (eli mitkä esteet ovat merkittävimpiä?) puuttuu, jotta voitaisiin maksimoida sen myönteiset vaikutukset alalle (Ivanova ym. 2023, Egwin ym. 2024). Edellä taulukossa 2 yksilöityjen ja yhteenvetona esitettyjen esteiden arviointia on kiireellisesti tutkittava lisää. Arvioinnin avulla voidaan pyrkiä integroimaan tekoäly tehokkaasti nykyisiin käytäntöihin, mikä edistää innovointia ja tarkoittaa, että tämä on kasvava akateemisen tutkimuksen ala.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tekoälyn käytön esteiden arviointi (ks. taulukko 3) on edelleen tärkeää rakentamisen hallinnan edistämiseksi, sillä vastaavanlainen kattava analyysi puuttuu nykyisistä tieteellisistä julkaisuista.

3.3.3.2 Tekoälyn käytön esteet: tutkimusasetelma ja -menetelmät

Tämän tutkimuksen tutkimusasetelma on kehitetty tunnistamaan ja analysoimaan tekoälyn hyödyntämisen esteitä rakentamisessa. Tutkimus on kaksivaiheinen, kuten kuvassa 1 näkyy, ja siinä käytetään sekamenetelmästrategiaa, jossa hyödynnetään kyselylomakkeesta ja fokusryhmäkeskustelusta saatuja laadullisia ja määrällisiä tietoja.



Kuva 1. Tutkimusprosessi

Tutkimusmatka alkoi kattavalla kirjallisuuskatsauksella, jossa kartoitettiin aiemmin havaittuja esteitä (täydellinen yhteenvedo esteistä on taulukossa 2). Kirjallisuuskatsaus tehtiin etsimällä vertaisarvioituja tieteellisiä lehtiä ja konferenssijulkaisuja, jotka liittyivät tekoälyyn ja rakennushallintoon. Käytettiin tieteellisiä kirjallisuustietokantoja, kuten ScienceDirect ja Google Scholar. Tekoälyratkaisujen nopean kehityksen vuoksi kirjallisuuskatsauksessa painotettiin uudempia julkaisuja, jotta varmistettiin, että tunnistettuja esteitä ei laimenneta vanhentuneilla

tuloksilla. Tutkimuksessa otetaan huomioon myös julkaisut, jotka ovat julkisesti saatavilla kesäkuuhun 2024 asti.

Seuraavassa toisessa vaiheessa arvioitiin tekoälyn hyödyntämisen esteitä rakentamisen hallinnassa. Toisessa vaiheessa käytettiin fokusryhmäkeskustelua ja kyselylomaketta laadullisen ja määrällisen palautteen saamiseksi.

Tutkimuksen taustalla on suora vuorovaikutus alan asiantuntijoiden kanssa, mikä edistää käytännön ymmärrystä tekoälyn sovelluksista ja niiden käytön esteistä rakennushallinnossa. Tämä metodologinen linjaus helpottaa vivahteikasta analyysia esteistä, jotka haittaavat rakentamisen johtamisen kehittämistä tekoälyn avulla, ja pyrkii yhdistämään teoreettiset tutkimukset ja reaaliaikaisen sovellettavuuden.

Tutkimukseen osallistui suomalaisia rakennusalan ammattilaisia, ja siihen osallistui 21 yritystä, mikä takaa laajan kirjon alan näkökulmia. Toukokuussa 2024 järjestettiin fokusryhmäkeskustelu, johon osallistui 30–40 henkilöä. Se rakentui tekoälysovellusten ja alustavien tutkimustulosten esittelyjen ympärille ja herätti yksityiskohtaista palautetta ja keskustelua, mikä rikastutti tutkimusta syvällisellä alan tietämyksellä.

Kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia tietoja kerättiin ja analysoitiin, jotta saataisiin selville tekoälyn käytön akilleenkantapää rakennushallinnossa. Lopuksi analyysia täydennettiin tutkijan näkemyksillä, jotta saatiin keskusteluosio, joka sisältää teoreettisia, hallinnollisia ja käytännöllisiä näkemyksiä esteistä ja niiden ratkaisemisesta tutkijoille ja alan ammattilaisille.

Hyvien eettisten standardien noudattaminen tutkimusaineiston käsittelyssä oli mahdollista, kun osallistujien vastausten anonymiteetti ja luottamuksellisuus varmistettiin huolellisesti. Tutkimuksen eettistä luotettavuutta vahvistettiin tiedottamalla vastaajille siitä, miten tietoja kerättäisiin ja hyödynnettäisiin, mikä hälvensi mahdollisia arkaluonteisten tietojen käsittelyyn liittyviä huolia.

3.3.3.3 Tekoälyn esteiden tutkimuksen tulokset

Tämän tutkimuksen tulokset on jaoteltu kolmeen osaan: 1) kvantitatiivinen kriittisyysarviointi, 2) kvalitatiivinen analyysi ja 3) tulosten yhteenveto. Näiden havaintojen avulla tutkimus paljastaa laadullisia ja määrällisiä näkökohtia esteistä, jotka haittaavat tekoälyn käyttöä rakennushallinnossa.

Taulukossa 3 esitetyn määrällisen arvioinnin perusteella voidaan päätellä, että vastaajat pitävät tekoälyn käytön esteitä rakennushallinnossa vähäisinä, sillä kokonaiskeskiarvo on 5,7 asteikolla 0–10.

Taulukko 3. Tekoälyn käytön esteet ja niiden kriittisyys (n=22)

Esteet	Kriittisyys (keskiarvo 0-10)
Osaajapula ja tekoälyvalmiuksien ymmärtäminen	7,1±1,8
Tietojen yhteentoimivuuteen ja laatuun liittyvät ongelmat	7±1,9
Tuotetun sisällön laatu, hallusinaatit, valvontakysymykset ja muut teknologiset rajoitukset	6,9±2,6
Käyttöönoton vastustus	6,8±2
Toimialan hajanainen rakenne ja toimitusketjuun liittyvät ongelmat	6,4±2,2
Integraatiohaasteet (tekoälyn ja nykyisten tehtävien vaatimukset) sekä ihmisen ja tekoälyn yhteistyöongelmat	6,1±1,8
Tietoturva ja yksityisyys	6±2,7
Kulttuurikysymykset ja selitettävissä oleva tekoäly	5,5±2,4
Vähäinen digitalisaatio ja manuaalisen työn hallitsevuus	5,5±2,4
Etiikka ja hallinto	5,2±2,9
Integraatiohaasteet (tekoäly ja robotiikka)	4,5±2,5
Säätelyyn ja standardointiin liittyvät kysymykset	4,5±2,1
in liittyvät kysymykset	4±2,1
Teknologian saatavuus	
Taloudelliset rajoitteet, kuten korkeat aloituskustannukset	4±2,4
Yhteensä	5,7±2,3

Jokaisen esteen kohdalla oli kuitenkin poikkeavia vastaajia, jotka pitivät esteitä erittäin merkittävinä (arvio 8–10), ja vastaajia, jotka pitivät esteitä hyvin merkityksettöminä (arvio 0–4).

Kriittisimmät esteet, joiden keskiarvo oli 7 tai enemmän, olivat osaajapula ja tekoälyominaisuuksien ymmärtäminen sekä tietojen yhteentoimivuuteen ja laatuun liittyvät ongelmat. Molempien esteiden pistemäärien keskihajonnat olivat suhteellisen alhaiset, mikä osoittaa vastaajien näkemysten olevan hyvin yhtenäisiä.

Kiinnostavaa on, että kriittisimpiä esteitä olivat sekä inhimilliset että teknologiaan liittyvät esteet, joista inhimillisiä olivat muun muassa osaajapula ja tekoälyominaisuuksien ymmärtäminen sekä käyttöönottovastarinta. Teknologiaan liittyvistä esteistä kriittisimpinä pidettiin tietojen yhteentoimivuuteen ja tietojen laatuun liittyviä kysymyksiä sekä sisällön yleistä laatua, hallusinaatioita, valvontakysymyksiä ja muita teknologisia rajoituksia. Nämä tulokset viittaavat siihen, että vaikka merkittävintä estettä voidaan pitää ihmiskeskeisenä kysymyksenä, kokonaiskuva on, että molemmat näkökohdat ovat merkittäviä.

Lisäksi neljä estettä sai alhaisen kriittisyyspisteytyksen, joka vaihteli välillä 4–4,5. Näistä vähiten kriittisiä olivat teknologian saatavuus ja taloudelliset rajoitteet, kuten korkeat aloituskustannukset. On huomattava, että tutkimus tehtiin Suomessa, ja voidaan väittää, että nämä vähäiset esteet arvioitaisiin korkeammiksi erityisesti kehitysmaissa. Voidaan kuitenkin myös väittää, että generatiivisen tekoälyn yleistymisen on vähentänyt näiden esteiden kriittisyyttä, sillä generatiivisia tekoälyratkaisuja voidaan pitää käyttäjille (esim. GPT-4o) matalampina esteinä kuin aiempia tekoälyratkaisuja (esim. räätälöityjen koneoppimisohjelmistojen koulutus).

Yhteenvedona voidaan todeta, että vastaajat suhtautuvat yleisesti ottaen optimistisesti tekoälyyn rakentamisen johtamisessa, koska esteiden keskimääräinen kriittisyys on alhainen. Jos käsitys esteiden enimmäkseen alhaisesta tai pahimmillaan keskinkertaisesta kriittisyydestä edustaisi esteiden todellista vaikutusta, voitaisiin todeta, että tekoäly otetaan helposti käyttöön rakentamisen johtamisessa.

Kyselylomakkeella pyydettiin vastaajilta myös laadullista palautetta, joka yhdistettiin fokusryhmäkeskusteluun. Aineistosta voidaan tehdä yhteenveto kahdesta tärkeimmästä havainnosta. Ensimmäinen on se, että esteet liittyvät toisiinsa, ja toinen on se, että vastaajat analysoivat jo esteitä miettimällä niihin liittyviä toimia niiden poistamiseksi.

Tutkimuksessa ehdotettiin ideoita esteiden poistamiseksi, kuten prosessien standardointia ja tietojen tallentamista tiettyssä muodossa. Nämä vastaukset osoittavat, miten alan ammattilaiset käyttävät esteitä ratkaisujen suunnittelun ponnahduslautana.

Myös laadullisessa aineistossa oli nähtävissä vastakkaisia mielipiteitä, samoin kuin vastakkaisissa määrällisissä tuloksissa. Yksi vastaaja vastasi kyselyyn, että muutosvastarinta on merkittävin este, kun taas toinen vastaaja totesi, että yleinen tekoälyn vastustaminen ei ole merkittävää ja että tekoälyn käyttöön siirrytään vasta, kun se osoittaa hyötyjä ihmisille ja rahallisia hyötyjä yrityksille.

Tässä tutkimuksessa tunnistettiin kirjallisuuden avulla neljätoista keskeistä estettä, jotka haittaavat tekoälyn tehokasta hyödyntämistä rakennushallinnossa, ja tehtiin kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen arviointi alan asiantuntijoiden avulla. Ihmisiin liittyvät esteet, kuten osaajapula ja riittämätön ymmärrys tekoälyominaisuuksista, nousivat esiin erityisen kriittisinä sekä määrällisissä että laadullisissa havainnoissa.

Teknologiset esteet, kuten tietojen yhteentoimivuus ja laatukysymykset, ovat myös merkittäviä haasteita. Tulosten mukaan tiedonhallintakäytäntöjen parantaminen ja korkealaatuisten, yhteensopivien tietokokonaisuuksien varmistaminen ovat ratkaisevia askeleita näiden esteiden voittamiseksi.

Laadullisesta palautteesta kävi ilmi, että vastaajat pitivät esteitä toisiinsa kytkeytyvinä, joita ei voitu havaita määrällisessä arvioinnissa, mikä viittaa siihen, että yhden ongelman ratkaiseminen voi lieventää useita muita. Esimerkiksi vahvat poliittiset päätökset ja prosessien standardointi mainittiin toimenpiteinä, joilla voitaisiin ratkaista useita esteitä samanaikaisesti. Tämä toisiinsa kytkeytyneisyys korostaa kokonaisvaltaisen lähestymistavan tärkeyttä tekoälyn integrointiin rakennushallinnossa liittyvien haasteiden ratkaisemisessa.

Tunnistetuista esteistä huolimatta vastaajat suhtautuivat asiaan yleisesti ottaen optimistisesti. Esteiden keskimääräinen kriittisyyspisteytys oli suhteellisen alhainen, mikä osoittaa, että uskotaan tekoälyn mahdollisuuksiin menestyksekkääseen käyttöönnotossa rakennushallinnossa. Tätä optimismia lieventää se, että sekä inhimilliset että teknologiset kysymykset on ratkaistava, jotta tekoälyn hyödyt voidaan hyödyntää täysimääräisesti, kuten myös analysoidussa laadullisessa palautteesta ja keskusteluissa todettiin.

Tutkimuksessa korostetaan, että on keskityttävä kriittisimpiin esteisiin, ja laadulliset keskustelut ja vastaukset paljastivat mielenkiintoisia ajatuksia siitä, miten esteisiin voitaisiin puuttua, mikä ylitti tämän tutkimuksen alkuperäisen soveltamisalan. Näiden mahdollisten toimien pohjimiseksi seuraavassa keskusteluosuudessa on kuitenkin esitetty lyhyitä, käytännönläheisiä näkemyksiä siitä, miten esteisiin voitaisiin puuttua.

3.3.3.4 Vastaustoimenpiteitä esteisiin ja yhteenveto tuloksista

Pelkästään olemassa olevien esteiden tunnistaminen ja arviointi voi lisätä tietoisuutta. Tietoisuuden jälkeen voidaan ottaa seuraava tärkeä askel kohti tekoälyn arvon talteenottoa: ideoida periaatteita esteiden poistamiseksi ja toimia niiden mukaisesti. Käytännön askeleena kohti tunnistettujen esteiden poistamista kirjoittajat ehdottavatkin seuraavia periaatteita esteiden poistamiseksi, jotka esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Ehdotetut menetelmät tekoälyn hyödyntämisen esteiden poistamiseksi

Esteet	Menetelmä esteen poistamiseksi
Osaajapula ja tekoälyvalmiuksien ymmärtäminen	- Kehitetään alakohtaisia tekoälykoulutusohjelmia ja edistetään monialaista yhteistyötä. - Investoiminen johtajien tekoälylukutaitoon, tekoälytyökalujen hyödyntäminen koulutuksessa ja kannustimien luominen tekoälyn käyttöönotolle ovat ratkaisevia askeleita. - Tekoälyn läpinäkyvyyden ja selitettävyyden parantaminen, jotta voidaan varmistaa asianmukainen luottamus tekoälyyn.

Tietojen yhteen- toimivuuteen ja laatuun liittyvät kysymykset	- Standardoitujen tietomuotojen ja -protokollien luominen koko toimialalle. - Edistetään integroitujen tiedonhallintajärjestelmien käyttöönottoa, jotta voidaan varmistaa parempi tiedonvaihto eri välineiden ja alustojen välillä. - Säännölliset tietojen tarkastukset ja validointiprosessit tietojen korkean laadun ylläpitämiseksi. - Edistetään tiedonhallinnan ja vastuullisuuden kulttuuria, jotta voidaan varmistaa tekoälysovelluksissa käytettävien tietojen tarkkuus ja luotettavuus.
Tuotetun sisällön laatu, hallusinaa- tiot, valvontakysy- mykset ja muut tekniset rajoituk- set.	- Tekoälyn tuotosten validointi- ja verifiointiprosessien toteuttaminen. - Inhimillisen valvonnan sisällyttäminen tekoälyn virheisiin liittyvien riskien vähentämiseksi. - Tekoälymallien säännölliset päivitykset ja ylläpito suorituskyvyn ja luotettavuuden parantamiseksi. - Vankkojen palautemekanismien kehittäminen, jotta ongelmat voidaan tunnistaa ja korjata nopeasti ja varmistaa, että tekoälyjärjestelmät toimivat hyväksyttävien parametrien sisällä ja tuottavat luotettavia ja tarkkoja tuloksia.
Hyväksymisvasta- rinta	- Tekoälyn konkreettisten hyötyjen osoittaminen pilottihankkeiden ja tapaustutkimusten avulla. - Kattavan koulutuksen ja tuen tarjoaminen pelkojen lievittämiseksi ja luottamuksen rakentamiseksi tekoälyteknologioihin. - Sidosryhmien ottaminen mukaan päätöksentekoprosessiin varhaisessa vaiheessa ja niiden huolenaiheiden avoin käsittely edistää sitoutumista ja luottamusta. - Kannustinohjelmien luominen ja menestystarinoiden korostaminen voivat motivoida vastahakoisia ammattilaisia omaksumaan tekoälyn, mikä helpottaa sujuvampaa käyttöönottoa ja integrointia nykyisiin työnkulkuihin.
Toimialan haja- nainen rakenne ja toimitusketjuun liittyvät ongelmat	- Yhteistyön ja viestinnän edistäminen kaikkien sidosryhmien välillä. - Integroitujen projektinhallinta-alustojen käyttöönotto koordinoinnin ja tiedon jakamisen tehostamiseksi. - Alan laajuisten standardien ja protokollien käyttöönotto voi parantaa yhteentoimivuutta ja vähentää tehottomuutta. - Edistämällä strategisia kumppanuuksia ja liittoutumia, jotka voivat vahvistaa toimitusketjua ja varmistaa sujuvampaa toiminnan ja tekoälyratkaisujen paremman integroinnin.
Integraatiohaas- teet (tekoälyn ja nykyisten tehtä- vien vaatimukset) sekä ihmisen ja tekoälyn	- Kehittää tekoälyjärjestelmiä, jotka sopivat saumattomasti yhteen nykyisten työnkulkujen ja tehtävien vaatimusten kanssa. - Perusteellisen koulutuksen ja tuen tarjoaminen voi auttaa käyttäjiä sopeutumaan uusiin teknologioihin.

yhteistyöhön liittyvät ongelmat	- Tuottavuutta ja tarkkuutta voidaan parantaa kannustamalla yhteistyöhön perustuvaa lähestymistapaa, jossa ihmisten asiantuntemus ja tekoälyominaisuudet täydentävät toisiaan. - Suunnittelemalla käyttäjäystävällisiä käyttöliittymiä ja laatimalla selkeitä protokollia ihmisen ja tekoälyn vuorovaikutusta varten.
Tietoturva ja yksityisyys	- Toteutetaan vankat kyberturvallisuustoimenpiteet ja tietosuojaprotokollat. - Salaus ja turvalliset pääsynvalvontatoimenpiteet voivat suojata arkaluonteisia tietoja. - Tietoturvakäytäntöjen säännöllinen päivittäminen ja tarkastaminen varmistaa, että ne pysyvät tehokkaina kehittyviä uhkia vastaan. - Tietoturvan parhaita käytäntöjä koskevan koulutuksen tarjoaminen kaikille työntekijöille edistää valppaan toimintakulttuurin kehittymistä. - Asiaankuuluvien säännösten ja standardien noudattaminen auttaa ylläpitämään luottamusta ja varmistaa tietojen vastuullisen käsittelyn.
Kulttuurikysymykset ja selittävä tekoäly	- Edistää osallistavaa ympäristöä, jossa arvostetaan erilaisia näkökulmia ja yhteistyötä. - Koulutuksen tarjoaminen tekoälyn roolista ja hyödyistä voi auttaa kuroma umpeen kulttuurieroja ja lisäämään hyväksyntää. - Tekoälyjärjestelmien läpinäkyvyys ja selkeät, ymmärrettävät selitykset niiden päätöksistä lisäävät käyttäjien luottamusta. - Ottamalla sidosryhmät mukaan tekoälyn kehitysprosessiin voidaan varmistaa, että teknologia vastaa kulttuurisia arvoja ja alan tarpeita.
Vähäinen digitalisaatio ja manuaalisen työn hallittavuus	- Otetaan vähitellen käyttöön digitaalisia välineitä ja teknologioita. - Koulutuksen ja tuen tarjoaminen voi auttaa työntekijöitä siirtymään manuaalisista prosesseista digitaalisiin prosesseihin. - Digitalisaation tuomien tehokkuus- ja tuottavuushyötyjen korostaminen voi motivoida käyttöönottoa. - Pilottiohjelmien toteuttaminen ja onnistuneiden tapaustutkimusten esittely voi osoittaa hyödyt. - Käyttäjäystävällisten digitaalisten ratkaisujen luominen, jotka täydentävät nykyisiä työnkulkuja, helpottaa sujuvampaa integrointia ja edistää laajempaa hyväksyntää työntekijöiden keskuudessa.
Etiikka ja hallinto	- Luo selkeät eettiset ohjeet ja hallintokehykset. - Toteutetaan toimintatapoja, joilla varmistetaan läpinäkyvyys, oikeudenmukaisuus ja vastuullisuus tekoälyn käytössä. - Poliittikkojen säännöllisellä tarkistamisella ja päivittämisellä voidaan käsitellä kehittyviä eettisiä huolenaiheita.

	- Sidosryhmien ottaminen mukaan tekoälyn hallinnan kehittämiseen ja valvontaan varmistaa erilaiset näkökulmat ja rakentaa luottamusta. - Eettisiä tekoälykäytäntöjä koskevan koulutuksen tarjoaminen ja vastuullisuuskulttuurin edistäminen auttavat ylläpitämään korkeat eettiset standardit tekoälysovelluksissa.
Integroinnin haasteet (tekoäly ja robotiikka)	- Varmista järjestelmien saumaton yhteentoimivuus. - Standardoitujen protokollien ja rajapintojen kehittäminen voi helpottaa tätä integraatiota. - Kattavan koulutuksen ja tuen tarjoaminen auttaa työntekijöitä toimimaan tehokkaasti vuorovaikutuksessa tekoälyohjatun robotiikan kanssa. - Tekoäly- ja robotiikka-asiantuntijoiden välisen yhteistyön kannustaminen voi johtaa tehokkaampiin ja käyttäjäystävällisempiin ratkaisuihin. - Pilottihankkeiden toteuttaminen näiden integraatioiden testaamiseksi ja hiomiseksi voi tunnistaa mahdolliset ongelmat jo varhaisessa vaiheessa, mikä takaa sujuvamman käyttöönoton ja toiminnan todellisissa skenaarioissa.
Säätelyyn ja standardointiin liittyvät kysymykset	- Aktiivinen yhteistyö säätelyelinten ja alan järjestöjen kanssa selkeiden standardien ja ohjeiden kehittämiseksi. - Olla ajan tasalla kehittyvistä säädöksistä varmistetaan vaatimustenmukaisuus ja autetaan ennakoimaan tulevia vaatimuksia. - Yhteistyö alan kollegojen kanssa yhdenmukaisten standardien puolesta voi edistää yhdenmukaisuutta ja vähentää monimutkaisuutta. - Osallistumalla alan foorumeihin ja työryhmiin voidaan vaikuttaa käytännöllisten ja merkityksellisten standardien luomiseen, mikä helpottaa tekoälyn sujuvampaa käyttöönottoa ja integrointia koko alalla.
Teknologian saatavuus	- Investoi kohtuuhintaisiin ja skaalautuviin teknologisiin ratkaisuihin. - Yhteistyö teknologiatoimittajien kanssa kustannustehokkaiden vaihtoehtojen tarjoamiseksi voi parantaa pienempien yritysten saatavuutta. - Koulutuksen ja tuen tarjoamisella varmistetaan, että kaikki käyttäjät voivat hyödyntää uutta teknologiaa tehokkaasti. - Edistämällä valtion ja teollisuuden avustuksia tai tukia.
Taloudelliset rajoitteet, kuten korkeat aloituskustannukset	- Tutki rahoitusvaihtoehtoja, kuten leasingia, avustuksia ja tukia. - Pilottihankkeiden toteuttamisella voidaan osoittaa investointien tuotto ja luoda perusteita investoinneille. - Yhteistyö teknologiatoimittajien kanssa skaalautuvien ratkaisujen löytämiseksi voi vähentää alkukustannuksia. - Vaiheittaisen lähestymistavan omaksuminen mahdollistaa asteittaisen investoinnin, mikä minimoi rahoitusriskin ja antaa yrityksille

	mahdollisuuden jakaa kustannukset ajan mittaan samalla, kun ne saavat lisäetuja.
--	--

Taulukon 4 perusteella voidaan tiivistää kolme pääasiallista tapaa käsitellä neljäätoista estettä. Ensinnäkin koulutus ja tuki. Voisimme korostaa koulutuksen ja tuen tarvetta tekoälyn käyttöönotossa ja integroinnissa. Koulutuksella ja tuella voidaan kuroa umpeen kulttuurisia kuiluja, lisätä hyväksyntää ja varmistaa tekoälyteknologian tehokas käyttö. Koulutuksen ja tuen avulla voimme myös parantaa ihmisen, tekoälyn ja robotin kykyjen täydentävää toimintaa.

Toinen tärkeä tapa poistaa esteitä on yhteistyö ja viestintä. Sidosryhmien välisellä yhteistyöllä ja viestinnällä voidaan pyrkiä tehostamaan koordinoitua ja tiedonvaihtoa. Kumppanuuksien ja liittoutumien edistäminen voi vahvistaa toimitusketjuja, ja sidosryhmien ottaminen mukaan päätöksentekoprosessiin jo varhaisessa vaiheessa voi vähentää monia esteitä, kuten käyttöönottoa koskevaa vastustusta ja kulttuurikysymyksiä.

Kolmanneksi standardointi ja protokollat. Standardoitujen tietomuotojen, protokollien ja rajapintojen luominen yhteentoimivuuden parantamiseksi ja tehottomuuden vähentämiseksi voi ratkaista useita esteitä, kuten tekoälyn sisällön laatuun ja tietojen yhteentoimivuuteen liittyvät ongelmat. Alan laajuisten standardien ja hallintokehysten käyttöönotolla voidaan myös varmistaa tekoälyn käytön avoimuus, oikeudenmukaisuus ja vastuullisuus. Eettisten ohjeiden kehittämistä, toimintatapojen säännöllistä tarkistamista ja päivittämistä sekä yhteistyötä sääntelyviranomaisten ja toimialajärjestöjen kanssa vaatimustenmukaisuuden ylläpitämiseksi ja tulevien vaatimusten ennakoimiseksi voidaan myös pitää tärkeänä.

Tekoälyratkaisusta saatavan arvon saamisen esteiden poistaminen ja niiden poistaminen merkitsee käytännössä sitä, että arvioitujen hyötyjen hyödyntämismahdollisuudet ovat huomattavat. Esimerkiksi Kansainvälinen valuuttarahasto arvioi, että tekoäly vaikuttaa lähes 40 prosenttiin työpaikoista ympäri maailmaa (International Monetary Fund, 2024),

McKinsey arvioi, että tuottavuuden parantaminen maailmanlaajuisessa rakennusteollisuudessa tekoälyn ja muiden digitaalisten ratkaisujen avulla voisi lisätä maailmantalouteen jopa 1600 miljardia dollaria vuodessa (Barbosa ym., 2017), ja lisäksi myöhemmin arvioitiin, että generatiivisen tekoälyn vaikutus tuottavuuteen voisi lisätä kaiken tekoälyn vaikutusta 15–40 prosentilla (Chui ym., 2023). Siksi käytännön ja hallinnolliset toimet jäljellä olevien esteiden poistamiseksi ovat ratkaisevan tärkeitä näiden merkittävien taloudellisten hyötyjen vapauttamiseksi.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa tarkastellaan kattavasti tekoälyn hyödyntämisen esteitä rakentamisen johtamisessa. Tutkimuksessa tunnistetaan ja arvioidaan neljäätoista keskeistä estettä, ja se valottaa sekä inhimillisiä että teknologisia haasteita, jotka estävät tekoälyteknologian tehokkaan käyttöönoton. Inhimilliset esteet, kuten osaajapula ja

riittämätön ymmärrys tekoälyominaisuuksista, osoittautuivat erityisen kriittisiksi, kun taas teknologiset esteet, kuten tietojen yhteentoimivuus ja laatu, olivat myös merkittäviä. Tämä korostaa tarvetta parantaa tiedonhallintakäytäntöjä ja laadukkaita tietokokonaisuuksia näiden esteiden voittamiseksi.

Alan ammattilaisilta saadussa laadullisessa palautteessa korostettiin näiden esteiden yhteenkietoutuneisuutta, mikä viittaa siihen, että yhden ongelman ratkaiseminen voi lieventää useita muita. Esimerkiksi vahvat poliittiset päätökset ja prosessien standardointi mainittiin toimenpiteinä, joilla voitaisiin samanaikaisesti puuttua useisiin esteisiin. Tämä toisiinsa kytkeytyneisyys korostaa kokonaisvaltaisen lähestymistavan merkitystä, kun puututaan haasteisiin, jotka liittyvät tekoälyn integrointiin rakennushallinnossa. Tunnistetuista esteistä huolimatta vastaajien yleinen näkemys oli optimistinen, mikä osoittaa uskoa tekoälyn mahdollisuuksiin toteuttaa se menestyksekkäästi alalla.

Tämän tutkimuksen tulokset edistävät sekä teoreettista että käytännön ymmärrystä tekoälystä rakennushallinnossa. Tutkimus on linjassa olemassa olevan kirjallisuuden kanssa, mutta tarjoaa myös uusia näkemyksiä esteiden kriittisyydestä ja paljastaa ristiriitaisuuksia kirjallisuudessa suosittujen aiheiden ja niiden todellisen vaikutuksen välillä. Nämä näkemykset viittaavat siihen, että vaikka taloudellisiin rajoitteisiin ja sääntelyyn liittyviin kysymyksiin viitataan paljon, ne eivät ehkä ole yhtä kriittisiä kuin muut esteet. Tutkimuksessa käytetty sekamenetelmällinen lähestymistapa, jossa yhdistetään määrällisiä ja laadullisia tietoja, tarjoaa vankan arvion näistä esteistä ja käytännön vaikutuksia alan sidosryhmille.

Tulevassa tutkimuksessa olisi jatkettava tekoälyn hyödyntämisen esteiden tutkimista eri maantieteellisissä ja alakohtaisissa yhteyksissä, jotta tulosten yleistettävyyttä voitaisiin parantaa. Tekoälyteknologioiden nopea kehitys tarkoittaa, että esteet ovat liikkuva kohde, mikä edellyttää jatkuvaa tutkimusta, jotta ne pysyvät ajan tasalla. Kun nämä esteet poistetaan, rakennusteollisuus voi paremmin hyödyntää tekoälyn ominaisuuksia, mikä lopulta edistää innovointia ja parantaa tehokkuutta. Tämä tutkimus on merkittävä edistysaskel tekoälyn liittyvien haasteiden ymmärtämisessä ja hallinnassa rakennushallinnossa, ja se edistää laajempaa keskustelua tekoälyn roolista alan muutoksessa.

3.3.4 Tekoälyn käytön esteiden yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimus osoittaa, että generatiivisella tekoälyllä on merkittävä potentiaali parantaa rakennusprojektien johtamista ja prosessien tehokkuutta. Kuitenkin sen täysimittaisen hyödyntämisen tiellä on useita esteitä, kuten teknologian ymmärtämisen puute, osaajapula ja konservatiivinen suhtautuminen uusiin ratkaisuihin. Näistä esteistä huolimatta näkymät ovat optimistiset, ja alan ammattilaiset näkevät tekoälyn integroinnin rakennushankkeisiin pitkällä aikavälillä mahdollisena ja kannattavana, mikä voi johtaa merkittäviin parannuksiin prosessien laadussa ja projektien lopputuloksissa.

Esteiden ylittämiseksi on tärkeää panostaa standardointiin ja koulutukseen. Tekoälyn käyttöönottoa voidaan edistää luomalla selkeitä standardeja, jotka parantavat teknologian yhteensopivuutta ja käytettävyyttä eri projekteissa. Lisäksi ammattilaisten kouluttaminen tekoälyteknologian käytössä auttaa poistamaan osaamisvajeen ja lisäämään ymmärrystä sen hyödyistä. Avoimuus ja yhteiset prosessit ovat myös keskeisiä, sillä ne vähentävät tekoälyyn liittyviä pelkoja ja epäluuloja, kun käyttäjät ymmärtävät paremmin, miten järjestelmät toimivat ja miten ne voivat parantaa työn tehokkuutta ja laatua.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämä raportti käsittelee generatiivisen tekoälyn hyödyntämisen mahdollisuuksia ja haasteita rakentamisen johtamisessa. Tekoälyn kehitys on ollut viime vuosina huomattavaa, ja sen vaikutukset ulottuvat laajasti eri sektoreille. Tämä korostaa tarvetta syventää ymmärrystä ja kehittää osaamista tekoälyratkaisujen tehokkaaseen hyödyntämiseen myös rakentamisessa. Vaikka tekoäly tarjoaa merkittäviä etuja erityisesti tiedon analysoinnissa ja päätöksenteon tukena, on tärkeää myös tunnistaa ja hallita siihen liittyviä riskejä, kuten tietosuojaja eettisiä kysymyksiä.

Johtopäätöksenä voidaan esittää, että tekoälyn käyttöönotto vaatii strategista lähestymistapaa, jossa otetaan huomioon niin teknologiset kuin organisatoriset näkökulmat. Yrityksille ja organisaatioille on olennaista kehittää osaamista tekoälyn käytöstä johtamisen työkaluna, jotta käyttöönotto johtaa todellisiin hyötyihin. Osaaminen tarkoittaa paitsi rakentamisen substanssiosaamisen varmistamista johtajalta, niin myös eri tekoälysovelluksiin ja niiden käyttöön perehtymistä. Lisäksi tekoälyn käyttöönotossa on tärkeää varmistaa riittävä tietoturvan ja eettisten periaatteiden mukainen toiminta. Näin voidaan luoda kestävä perusta tekoälyn hyödyntämiselle.

Tutkimuksen perusteella on suositeltavaa, että organisaatiot panostavat henkilöstön kouluttamiseen ja kehittävät tekoälystrategian, joka huomioi liiketoiminnan tarpeet ja eettiset periaatteet. Eri toimialoilla on erilaiset lähtökohdat ja tavoitteet tekoälyn hyödyntämiselle, ja siksi räätälöity lähestymistapa on suositeltavaa. Tämä auttaa varmistamaan, että tekoälyn käyttö on vaikuttavaa ja tukee organisaation pitkän aikavälin tavoitteita.

Lopuksi voidaan todeta, että tekoälyn käyttöön liittyvä tutkimus ja kehitystyö on jatkuvaa, ja sen vaikutuksia tullaan seuraamaan ja arvioimaan tarkasti myös tulevaisuudessa. Tekoälyn mahdollisuudet ovat laajat, mutta niiden täysimääräinen hyödyntäminen edellyttää turvallista ja vastuullista kehitystä alan toimijoilta.

5 Lähdeluettelo

Abioye, S. O., ym. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 1–13.

Amer, F., & Golparvar-Fard, M. (2021). Modeling dynamic construction work template from existing scheduling records via sequential machine learning. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101198.

Baduge, S. K., ym. (2022). AI in reducing inefficiencies in the construction industry. *Applied AI in Engineering*, 20, 1–10.

Banh, L., & Strobel, G. (2023). Generative artificial intelligence. *Electronic Markets*, 33(63), 1–17.

Barbosa, F., ym. (2017). Reinventing construction: A route to higher productivity. McKinsey Global Institute.

Barjuei, S., ym. (2024). Challenges in integrating AI and robotics in construction. *Automation in Construction*, 135, 104122.

Bolpagni, M., ym. (2021). *Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills*. Springer International Publishing.

Brynjolfsson, E., ym. (2023). Economic impacts of generative AI in construction. *MIT Sloan Management Review*, 15, 1–34.

Chihon, Y., ym. (2023). The impact of AI on developer productivity: Evidence from GitHub Copilot. Cornell University arXiv software engineering working paper, arXiv:2302.06590.

Chui, M., ym. (2023). The economic potential of generative AI: The next productivity frontier. McKinsey & Company.

Dell’Acqua, M., ym. (2023). Productivity gains through generative AI in construction. *Management Science Review*, 56, 1–25.

DellAqua, M., ym. (2023). Navigating the jagged technological frontier: Field experimental evidence of the effects of AI on knowledge worker productivity and quality.

Dodampegama, D., ym. (2024). Overcoming high-cost barriers in construction AI adoption. *Automation and Computing*, 135, 104199.

Dwivedi, Y. K., ym. (2021). Addressing the digital divide in the construction industry: Role of AI and IoT. *Digital Technology for Smart Construction*, 44, 1–15.

Egwim, C. N., ym. (2024). Artificial intelligence in the construction industry: A systematic review of the entire construction value chain lifecycle. *Energies*, 17(182), 1–21.

Eloundou, T., ym. (2023). GPTs are GPTs: An early look at the labor market impact potential of large language models. OpenAI.

Ivanova, S., ym. (2023). Artificial intelligence methods for the construction and management of buildings. *Sensors*, 23(8740), 1–35.

Kamari, M., & Ham, Y. (2022). AI-based risk assessment for construction site disaster preparedness through deep learning-based digital twinning. *Automation in Construction*, 134, 104091.

Liang, X., ym. (2024). Ethical frameworks for AI in construction decision-making. *Construction Ethics Review*, 25, 1–19.

Liao, C. (2024). Enhancing project management through generative AI applications. *Building Information Modeling Advances*, 23(12), 1–30.

Liu, L., ym. (2024). Talent challenges in adopting AI in construction: A cross-industry perspective. *Energies*, 17(182), 1–21.

Liu, Q., ym. (2024). Exploring interoperability and data challenges for AI in construction. *Sustainability*, 16(12), 1–22.

Love, P. E. D., ym. (2023). Risk management and decision-making in construction with AI. *Computers in Industry*, 148, 1–25.

McKinsey & Company. (2023). The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year. McKinsey Global Institute.

Nyqvist, R., Peltokorpi, A., & Seppänen, O. (2024). Can ChatGPT exceed humans in construction project risk management? *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(13), 223–243.

Nyqvist, R., Peltokorpi, A., & Seppänen, O. (2024). Integration of generative artificial intelligence across construction management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1389, 012011.

Pan, Y., & Zhang, L. (2021). AI transparency in decision-making: Challenges in construction management. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 34, 1–15.

Papadaki, M., ym. (2023). Addressing cultural and logistic challenges of AI integration in construction. *Applied Sciences*, 13, 1–23.

Rafsanjani, H. N., & Nabizadeh, A. H. (2023). Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Computers in Human Behavior Reports*, 11, 100319.

Robinson, H., ym. (2021). Fragmentation in construction supply chains and the role of AI integration. *Construction Supply Chain Management Journal*, 8, 1–19.

Tilastokeskus. (2022). Rakentamisen liikevaihtotilastot. Haettu osoitteesta: <https://www.stat.fi/julkaisu/ckt9wvgqw72q60c443hv3efaq>.

Wagar, A. (2024). Intelligent decision support systems in construction engineering: AI approaches. *Expert Systems with Applications*, 249(123503), 1–22.

Wang, H., ym. (2023). Overcoming digital barriers in construction through generative AI. *Buildings*, 14, 1–20.