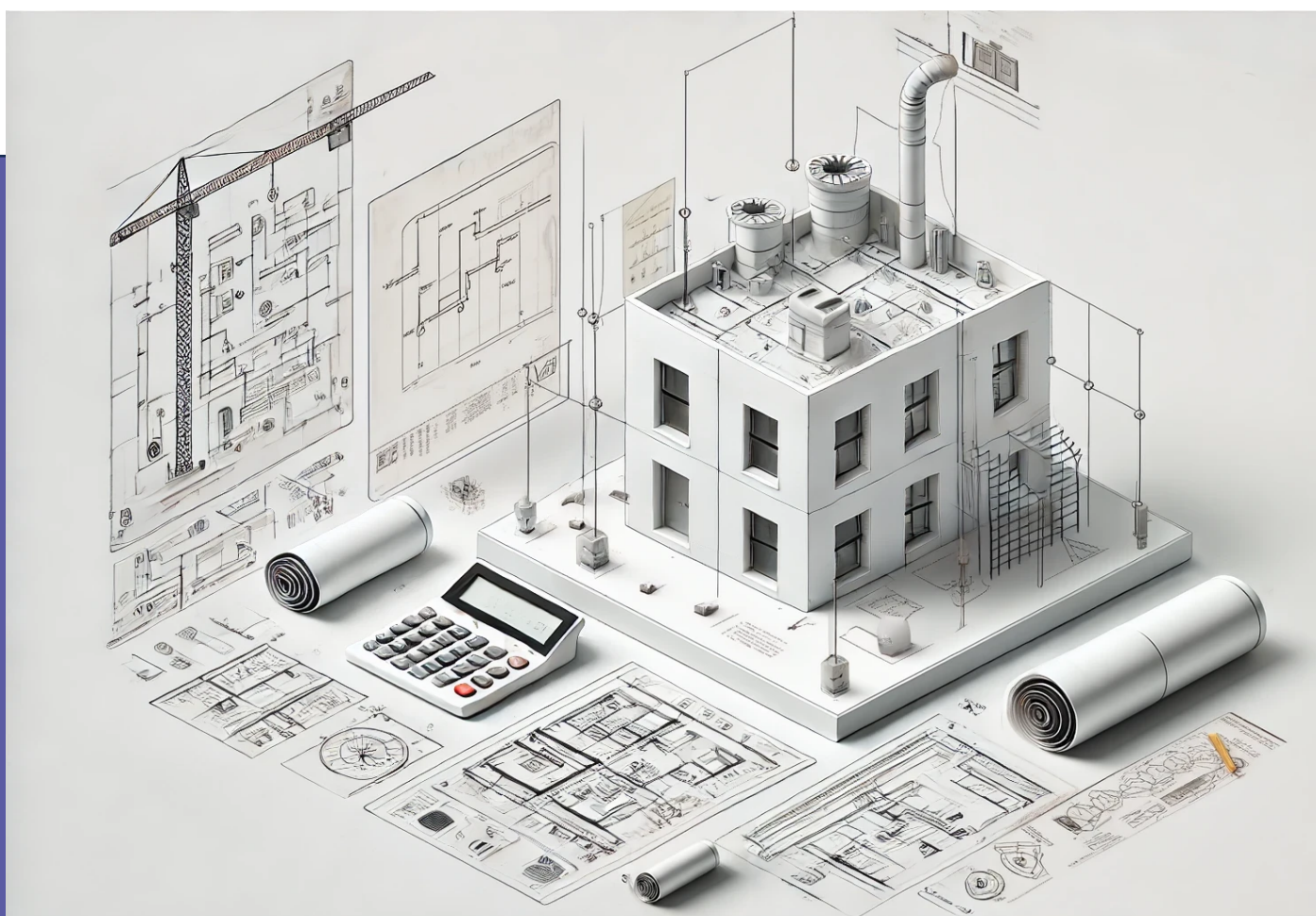


THI5 Määrälaskennan digitalisointi ja tekoälyn hyödyntämisen mahdollisuudet

Kirjoittajat: Tampereen yliopisto: Joonas Vierijärvi, Sofia Öhman, Anni Luoto, Matias Kallio, Mika Lehtimäki, Osku Torro, Tuomas Valkonen, Arto Saari ja Piia Sormunen



Tiivistelmä

Rakennusalan tuottavuus on kehittynyt hitaasti: vuosina 2000–2022 sen vuotuinen keskimääräinen kasvuvauhti (CAGR) oli MCKinseyn raportin mukaan vain 0,4 %. Rakennusala on luonteeltaan pirstaleinen ja tiedonkulun hallinta on täten haastavaa. Building Information Modeling (BIM) eli rakennusten tietomallintamisen on toivottu ratkaisevan tiedonkulun ongelmia ja helpottavan yhteistyötä. BIM ei kuitenkaan ole pystynyt varmistamaan saumatonta tiedonkulkua eri sidosryhmien välillä.

Määrälaskentaprosessissa urakoitsija pyrkii muodostamaan kokonaiskuvan rakennukseen tarvittavista materiaaleista. Lähtötietona urakoitsija käyttää suunnittelijan tuottamaa materiaalia, mikä koostuu useista eri dokumenteista. Jatkuvasti kehittyvä tekoäly on osoittautunut toimivaksi suurten tietomassojen analysoinnissa ja eri tehtävien suorittamisessa. Täten tekoälyn soveltaminen määrälaskentaprosessissa on tutkimusaiheena kiinnostava.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten määräluettelo automaattisesti muodostetaan suunnittelijan toimittamasta materiaalista. Määrälaskennan nykyprosessia selvitettiin asiantuntijatyöpajoin, haastatteluin ja kirjallisuuskatsauksella. Määrälaskentaprosessista muodostettiin prosessikaavio, jota käytettiin pohjana haastatteluissa. Haastatteluissa kaavion prosessia validoitiin ja prosessiin liittyviä ongelmia selvitettiin. Tämän lisäksi tekoälyagenteilla toteutettiin (POC) Proof of Concept määräluettelon luonnista. Lopuksi tuloksia analysoitiin ja niiden suhdetta kirjallisuuteen pohdittiin.

Tutkimus osoitti, että nykyinen määrälaskentaprosessi on vain näennäisesti digitaalinen. Suurin osa määrälaskennasta tapahtuu tasokuvista. Sekä haastattelut että kirjallisuus tukevat tätä tulosta. Tietomallit voisivat osaltaan automatisoida määrälaskentaa, mutta niiden käyttö on vähäistä mallien vaihtelevan laadun ja dokumenttien hierarkian takia. Mallien heikko laatu vaikeuttaa myös tekoälyagenttien käyttöä määrälaskennassa - huonosti määritelty tietosisältö tekee mallin sisällön tulkinnasta vaikeaa myös tekoälyagentille.

Hyvälaatuinenkaan rakennuksen tietomalli ei itsessään sisällä kaikkia tarvittavia tietoja täydellisen massalistan luontiin. Osa massalistan luontiin vaikuttavista tiedoista löytyy muista dokumenteista (esim- Laiteluettelot ja työselostus). Toisaalta mallinnustavat ja tekniset rajoitteet määrittävät mitä tietomalli sisältää (esim. kannakkeet eivät yleisesti ole tietomallissa). Tekoälyagenteja soveltaessa tietomallin ja muun dokumentaation vaikutus massalistaan on tärkeä tiedostaa ja huomioida.

Tekoälyn potentiaali määrälaskennan automatisaatiossa on huomattava, mutta täyden potentiaalin saavuttaminen vaatii laadukasta tietomallia. Pelkkä tekoälyn käyttö ei myöskään riitä poistamaan prosessin hukkaa, vaan myös prosessia, sopimuksia ja tiedonhallintaa tulee kehittää. Lisäksi jatkotutkimuksessa ymmärrystä muiden dokumenttien vaikutuksesta massaluetteloon tulee syventää, jotta tekoälyagenteille osataan antaa riittävästi informaatiota täydellisten massalistojen luontiin.

Alkusanat

Tämän projektin toteutuksesta on vastannut Tampereen yliopiston tutkijaryhmä: väitöskirjatutkija Joonas Vierijärvi, väitöskirjatutkija Sofia Öhman, väitöskirjatutkija Matias Kallio, projektipäällikkö Anni Luoto, tutkijatohtori Mika Lehtimäki, tutkijatohtori Osku Torro, Professori Arto Saari ja professori (associate) Piia Sormunen.

Hanke toteutettiin yhteistyössä Building 2030 kanssa järjestämällä yhteiset työpajat talven ja kevään 2026 aikana.

Projektin ohjausryhmään ovat osallistuneet aktiivisesti seuraavat henkilöt:

Magnus Siren, LVI-Info

Risto Asp, Sähköinfo

Mika Repo, ETS NORD

Tuomas Hietala, Sweco

Jani Riikonen, Bravida

Kimmo Liukkonen, QMG

Ilkka Kallioinen, Granlund

Tero Järvinen, Granlund

Kerkko Niemi, Granlund

Panu Mustakallio, Halton

Joonas Vierijärvi, MagiCAD

Mikko Puustinen, MagiCAD

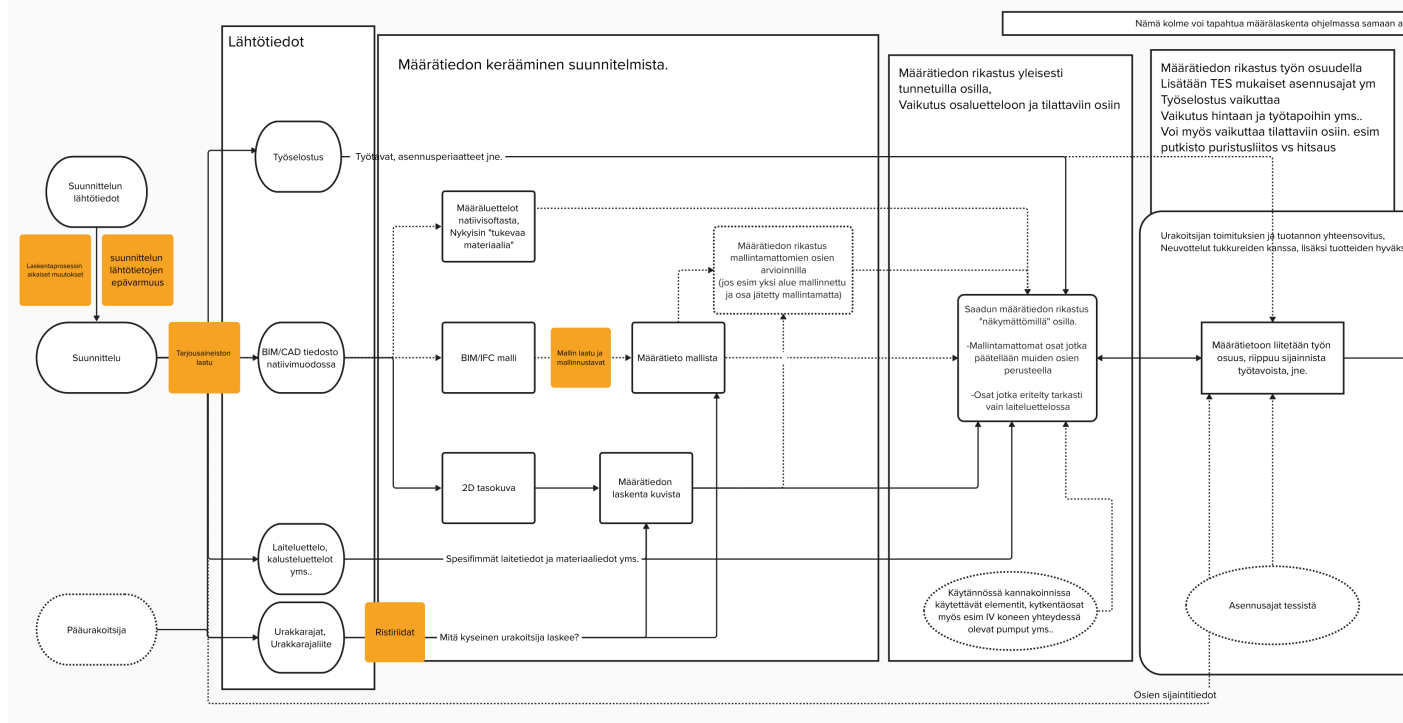
Kiitos kaikille hankkeeseen osallistuneille.

Tampereella 30.09.2026

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	6
1.1	Tutkimuksen tausta	6
2	Kirjallisuuskatsaus	7
2.1	Määrälaskennan nykytilanne	8
2.1.1	2D pohjainen määrälaskenta	8
2.1.2	BIM pohjainen määrälaskenta.....	8
2.2	Kirjallisuudessa esiin tulleet ongelmat määrälaskennassa.....	9
2.2.1	Nykyisen prosessin ongelmat.....	9
2.2.2	Teknologioiden rajoitteet	9
2.2.3	Ihmisten toimintatavat.....	10
2.3	Kirjallisuudessa esitetyt ratkaisut	10
2.3.1	Esitetyt ratkaisut nykyisen prosessin ongelmiin	10
2.3.2	Esitetyt ratkaisut vastaamaan teknologisiin rajoitteisiin	11
2.3.3	Esitetyt ratkaisut ihmisten toimintatapojen muuttamiseksi	11
2.4	Teknologiaselvitys: tekoälyagentit suunnittelusta hankintaan	11
2.4.1	Hankintaa palveleva tietosisältö	12
2.4.2	Tuotetiedon yhdistäminen ja agenttinen tuotevertailu.....	13
2.4.3	Tulosten tarkistaminen ja hyväksyminen.....	14
3	Tutkimusmenetelmät	16
3.1	Asiantuntijahaastattelut	16
3.2	Asiantuntijatyöpaja.....	17
3.3	IFC-tiedon lukeminen ja jalostaminen tekoälyagenteilla	18
4	Tulokset	20
4.1	Asiantuntijahaastattelut tulokset	20
4.1.1	Nykyprosessi.....	20
4.1.2	Mallin laatu ja mallinnustavat	20
4.1.3	Laskentaprosessin aikaiset muutokset ja aikataulu	21
4.1.4	Tarjousaineiston laatu	21
4.1.5	Suunnittelun lähtötietojen epävarmuus	22
4.1.6	Tuotevaihdot.....	22
4.1.7	Numeeristen mittarien puute.....	22
4.2	Työpajatyöskentelyn tulokset	22
4.3	Massaluettelon automaattinen luominen tekoälyllä.....	23
4.3.1	Kehitetty agenttinen ratkaisu.....	23
4.3.2	Määrälaskennan tulokset	25
4.3.3	Agenttien kohtaamat ongelmat.....	26
5	Pohdinta	27
6	Yhteenveto	29
7	Lähteet	31

Liite 1. Kuvaaja Määräluettelon synnystä ja prosessin ongelmakohtista



I Johdanto

I.1 Tutkimuksen tausta

Tutkimus toteutettiin Tampereen yliopiston ja Building 2030 -verkoston yhteishankkeena osana Talotekniikka 2030 -kokonaisuutta. Hanke rakentuu aiemmissa työpaketeissa tehtyjen havaintojen päälle: TH12-työpaketissa todettiin, että tekoäly kykenee hakemaan suunnitelmaan sopivia tuotteita eri tietokannoista ja vertailemaan niitä monikriteerisesti muun muassa hinnan, energiatehokkuuden, saatavuuden ja hiilijalanjäljen perusteella.

Hankkeen tavoitteena oli selvittää, miten määrälaskenta voidaan digitalisoida siten, että suunnittelijoilta saatavat tietosisällöt, erityisesti vakioidut tietomallit ja niihin liitetty talotekniset osatiedot, muodostavat automaattisesti rakennuksen digitaalisen osaluettelon. Osaluettelo toimii edelleen pohjana kustannusarvioille, hankinnoille ja materiaalivirtojen optimoinnille. Tavoitteeseen liittyi kokeellinen Proof-of-Concept (PoC), jossa tekoälyagentti ehdottaa osaluettelon perusteella tuotetietokannoista vaihtoehtoisia tuotteita ottaen huomioon tekniset ominaisuudet, sertifikaatit, hinnan, hiilijalanjäljen ja energiatehokkuuden. Kokeilun tarkoituksena oli osoittaa tekoälyn potentiaali erityisesti monimutkaisten kyselyjen ja eri datalähteiden yhdistelyn osalta. Samalla hanke toimi rakennusalan tekoälyn testilaboratorion pilottina, jossa tekoälypohjaisia prosesseja voidaan arvioida turvallisesti ennen laajempaa käyttöönottoa.

Raportti etenee tavoitteiden mukaisessa järjestyksessä. Luvussa 2 esitetään kirjallisuuskatsaus määrälaskennan nykytilaan, tunnistettuihin ongelmiin ja kirjallisuudessa esitettyihin ratkaisuihin. Luku 2 kokoa myös hankkeessa tehdyn teknologiaselvityksen. Luvussa 3 kuvataan käytetyt tutkimusmenetelmät: asiantuntijahaastattelut, agenttipohjainen PoC sekä asiantuntijatyöpajat. Luvussa 4 esitetään näiden tulokset menetelmittäin, ja luvussa 5 tuloksia tarkastellaan suhteessa kirjallisuuteen sekä arvioidaan tutkimuksen luotettavuutta ja rajoituksia. Luku 6 kokoa keskeiset johtopäätökset ja jatkokehityskohteet

Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli kartoittaa millä tavoin määrälaskentaa on tutkittu. Et-sintä rajattiin aluksi LVIS- kontekstiin. Tällä rajauksella ei löydetty riittävästi aineistoa, joten aihetta laajennettiin yleisesti rakennusosalalle. Artikkeleita etsittiin mm. google scholarin kautta hakusanoilla: HVAC quantity takeoff, Quantity takeoff plumbing ja BIM based Quantity takeoff. Artikkeleita haettiin myös ChatGPT ja Geminin avulla. Lopulta tarkasteltavaksi valikoitui 22 eri artikkelia, jotka jaoteltiin seuraaviin ryhmiin käsitellyn aiheen perusteella: LVIS, ARK/RAK tai Kokoava. LVIS kategorian artikkelit käsitelivät lämmitys, jäähdytys, käyttövesi, viemäri tai sähkö puolelta tehtävää määrälaskentaa. ARK/RAK kategoriassa laskettiin esim. betonin tai seinämateriaalien määriä. Kokoavat artikkelit taas käsitelivät aihetta laajemmin ja pyrkivät luomaan kokonaiskuvaa määrälaskennasta. Taulukossa 1 nähdään kirjallisuuskatsauksen artikkeleiden jakauma kategorioittain.

Taulukko 1. Kirjallisuuskatsauksen artikkelit kategorioittain

Kirjoittajat	ARK/RAK	LVIS	Kokoava	Julkaisuvuosi
Abdelsalam ym.		x		2026
Valinejadshoubi ym.	x			2025
Mia ym.			x	2025
Alhava ym.		x		2025
Jafary ym.	x			2025
Alhava ja Oraskari ym.	x			2025
Yan ym.		x		2025
Alhava ym.		x		2024
Pishdad ym.	x			2024
Alathamneh ym.			x	2024
Soon ym.	x			2024
Chen ym.		x		2022
Arowoia ym.		x		2022
wahab ym.	x			2022
Karan ym.	x			2021
Babatunde ym.	x			2020
Elmousalami ym.			x	2020
Kim ym.	x			2019
Khosakitchalert ym.	x			2019
Olsen			x	2017
Choi ym.	x			2015
Monteiro ym.			x	2013
Yht.	11	6	5	22

ARK/RAK ja LVIS artikkelit hyödynsivät Case studyjä mainituilta aloilta. Suurin osa artikkeleista (yht 11 kpl.) oli ARK/RAK aiheisia, kun taas vähemmistö (6 kpl) käsiteli LVIS aihetta. Artikkeleita, jotka käsitelivät eri aloja kokoavasti, valikoitui 5 kpl. Suurin osa artikkeleista käsiteli BIM pohjaista määrälaskentaa, kun taas vähemmistö artikkeleista käsiteli kuvista tai CAD mallista tehtävää laskentaa. CAD mallia tai 2D kuvia käsitelivät Karan ym.(2021) ja Wahab ym. (2022).

2.1 Määrälaskennan nykytilanne

Määrälaskennan tarkoitus on tuottaa tietoa tarvittavien materiaalien määristä ja täten tuottaa tietoa kustannuksista (Alathamneh ym., 2024; Choi ym., 2015). Lisäksi määrälaskentaa voidaan käyttää työmäärän arvioinnissa, henkilöstön resursoinnissa, aikatauluttamisessa ja tuotteiden hankinnassa (Valinejadshoubi ym., 2025). Määräluettelon käyttötarkoitus ja tekniikat sen luontiin vaihtelevat projektin vaiheen mukaan. Käytännössä kustannustietoutta tarvitaan koko projektin ajan aina varhaisesta suunnittelusta toteutussuunnitteluun asti (Wahab ym., 2022)

Suurin osa tähän kirjallisuuskatsaukseen valikoituneista artikkeleista käsittelee määrälaskentaa BIM malliin perustuen. Nykyään kuitenkin valtaosa määrälaskennasta tehdään ”käsin” 2D-kuvista tai 2D CAD ohjelmistoista (Babatunde ym., 2020; Alathamneh ym., 2024; Soon, 2024). Tämä käsin tehtävä määrälaskenta on virhealtista ja aikaa vievää verrattuna BIM mallista tehtävään määrälaskentaan. BIM pohjaisen määrälaskennan tutkimuksen syynä onkin usein mainittu nykyisen prosessin tehottomuus.

2.1.1 2D pohjainen määrälaskenta

Tarkastelluista tutkimuksista vain yksittäiset käsittelivät 2D kuvista tehtävää määrälaskentaa (Karan ym., 2021; Wahab ym., 2022). Karan tarkasteli mahdollisuuksia määräluettelon luonnille 2D kuvien pohjalta (Karan ym., 2021). Näkökulmana tutkimuksessa oli tekoälyteknologioiden hyödyntäminen määräluettelon luomisessa. He esittävät mahdollisuudeksi käyttää esim. NLP (natural language processing) teknologiaa, kuvanmuokkausta, koneoppimista ja asiantuntijajärjestelmää (Expert system) määräluettelon luomiseen. Karan ym. toteaa, että NLP avulla voitaisiin löytää relevantit dokumentit ja osat avainsanojen perusteella. Tämän jälkeen koneoppimista hyödyntävällä kuvan prosessoinnilla sieltä voitaisi tunnistaa relevantit elementit sekä mitata niiden koot. Viimeiseksi hyödynnettäisiin asiantuntijajärjestelmää, joka hakee kustannustiedot eri osille huomioiden niihin liittyvät työtavat.

2.1.2 BIM pohjainen määrälaskenta

BIM pohjaisen määrälaskennan on todettu tuottavan luotettavampia ja tarkempia massalistoja kun 2D kuvien pohjalta tehtävän määrälaskennan (Wahab ym., 2022). Olsen ym., 2017 tekemässä tutkimuksessa BIM pohjaisen määräluettelon luominen todettiin nopeammaksi ja visuaalisesti informatiivisemmaksi kuin 2D pohjainen määrälaskenta. Toisaalta BIM pohjainen määrälaskenta ja sen tarkkuus on vahvasti kytköksissä itse mallin sisältämään dataan (Pishdad ym., 2024).

Määräluetteloita oli kirjallisuudessa BIM pohjalta luotu useammalla eri tavalla. Osassa tutkimuksissa hyödynnettiin suoraan BIM ohjelmistoa, kuten Revit:iä tai Archicad:iä, Toisissa tutkimuksissa natiivimalli oli käännetty esim. IFC- muotoon, jonka jälkeen mallia tarkasteltiin. Yksittäisessä tutkimuksessa oli myös natiivimallista jalostettu MYSQL tietokanta, jota hyödynnettiin (Valinejadshoubi ym., 2025). Tekoälyagentteja määräluettelon tekemisessä BIM pohjalta käytti Abdelsalam ym., 2026. Osassa tutkimuksissa pyrittiin jalostamaan mallista suoraan saatavaa massalistaa eri algoritmein tai säännöin (Kim ym., 2019; Valinejadshoubi ym., 2025). Lisäksi mallista puuttuvia tietokenttiä pyrittiin monitoroimaan ja täydentämään. Alhava ym., 2025 taas korostivat mallin tietosisällön vakioinnin tarvetta.

Kokoavissa tutkimuksissa kaupallisesti saatavilla olevia työkaluja BIM pohjaiseen määrälaskentaan listaa (Pishdad ym., 2024). Näistä esimerkkejä ovat: Navisworks, Assemble, Primus IFC ja Cubicost suite.

2.2 Kirjallisuudessa esiin tulleet ongelmat määrälaskennassa

Määrälaskentaan liittyen nousi kirjallisuudesta esiin useita tunnistettuja ongelmia, joista moni tuotiin esille useammassa eri lähteessä. Esimerkiksi (Ashake ym., 2025) ja (Alhava, Arola ym., 2025) mainitsivat manuaalisen 2D-kuviin perustuvan määrälaskennan olevan hidasta, virheellistä sekä kustannustehotonta. Näitä havaintoja tukevat myös (Wahab ym., 2022; Olsen ym., 2017) tekemät tutkimukset. Esiin nousseita ongelmia voisi luokitella niiden aiheiden perusteella seuraaviin kolmeen luokkaan: nykyisen määrälaskentaprosessin ongelmat, käytettävissä olevien teknologioiden sekä ohjelmistojen rajoitteet sekä ihmisten toimintatapaan liittyvät ongelmat.

2.2.1 Nykyisen prosessin ongelmat

Nykyisessä määrälaskennan prosessissa (Pishdad & Onungwa, 2024) sekä (Alhava, Arola ym., 2025) tuovat esille rakennusallalla vallitsevan tuottavuuden sekä digitalisaation heikon tilan, joka heijastuu koko rakentamisen toimitusketjuun. Tähän on varmasti monia syitä, joista (Ashake ym., 2025), (Alhava, Arola ym., 2025) ja (Alhava, Oraskari ym., 2025) nostavat esiin manuaalisen 2D-kuviin perustuvan laskennan. Näissä tutkimuksissa manuaalinen ”käsini” suoritettava prosessi koetaan hitaaksi ja virheelliseksi, mikä johtaa kustannusten nousuun esimerkiksi uudelleen tekemisen muodossa. Lisäksi (Elmousalami, 2020) nostaa esiin puutteellisten suunnittelun lähtötietojen sekä epäselvien ”ei vielä tiedossa” -olevien asioiden merkityksen määrälaskennan tuottavuuden tehostamisen kannalta.

Tällainen manuaalinen työ aiheuttaa (Alhava, Arola ym., 2025) mukaan suunnittelutiedon virtauksessa katkoksia eri osapuolten välillä aiheuttaen tiedon pirstaloitumista sekä siiloutumista, jolloin on mahdollista, etteivät kaikki tarpeelliset tiedot saavuta määrälaskijaa tai tiedot ovat virheellisiä tai vanhentuneita. (Alhava, Arola ym., 2025) korostaa tiedon pirstaloitumisen johtuvan kokonaisvaltaisen digitaalisen suunnittelutiedon virtauksen puutteesta, mikä syntyy esimerkiksi erilaisten tiedostojen käyttämisestä tiedonsiirron välineenä.

2.2.2 Teknologioiden rajoitteet

Määrälaskennan nykyiseen prosessiin liittyvien ongelmien lisäksi eri tutkimuksissa nostettiin esille käytössä oleviin teknologioihin, kuten suunnitteluohjelmistoihin liittyviä rajoitteita. (Yan ym., 2025) tuo esille suunnitteluohjelmistojen riittämättömän tason, joka johtaa muun muassa siihen, ettei kaikkia määrälaskennan kannalta oleellisia taloteknisiä toteutuksia pysty mallintamaan markkinoilla olevilla ohjelmistoilla. (Monteiro ym., 2013; Soon ym. 2024) tuovat myös esille suunnitteluohjelmistojen kyvykkyyksien sekä näitä ohjelmistoja käyttävien ihmisten tarpeiden ristiriitaisuudet – kysyntä ja tarjonta eivät kohtaa.

Lisäksi (Yan ym., 2025) nostaa esille mallinnustarkkuuden tason, joka automaattista määrälaskentaa mahdollisimman hyvin palvellakseen, tulisi olla erittäin tarkka ja yksityiskohtaiselle tasolle viety. Näissä tutkimuksissa todetaan kuitenkin tällaisen tason olevan monessakin tilanteessa kustannustehoton sekä käytettävien resurssien valossa jopa mahdoton toteuttaa.

2.2.3 Ihmisten toimintatavat

Monessa tutkimuksessa nostettiin esille myös määrälaskijoiden toimintatapoihin liittyviä ongelmia. Yhtenä kokoavana näkökulmana nähtiin nykyisten käytössä olevien teknologioiden hyödyntämisen aste, kun taas toisena näkökulmana nostettiin määrälaskijan osaamiseen sekä tietotaitoon liittyvät tekijät.

(Babatunde ym., 2020) ja (Abdelsalam ym., 2026) tutkivat BIM-teknologian vähäistä käyttöastetta korostaen BIM:n hyödyntämisen tuomia mahdollisuuksia määrälaskennan automatisoinnissa sekä tehostamisessa. Lisäksi (Alhava, Arola ym., 2025), (Jafary ym., 2025) ja (Abdelsalam ym., 2026) nostavat esiin tekoälypohjaisten ratkaisuiden mahdollisuudet tuoden ilmi jo olemassa olevien ratkaisuiden vähäisen käyttöasteen alalla.

Määrälaskijan osaamiseen ja tietotaitoon liittyen (Arowoia ym., 2022) tutki määrä- ja kustannuslaskennassa tarvittavaa osaamiskenttää tuoden esille laskijoiden osittain puutteellisen osaamisen, joka ilmenee esimerkiksi laskentavirheinä. Tämän lisäksi (Yan ym., 2025) toi esille sähköjärjestelmien komponenttien määrälaskennassa kokonaiskuvan ja -ymmärryksen puutteen, joka ilmenee myös esimerkiksi laskentavirheinä tai rakennuksessa toimimattomina järjestelminä.

2.3 Kirjallisuudessa esitetyt ratkaisut

Määrälaskennassa nykyään tunnistettujen ongelmien lisäksi tutkimuksissa esitettiin myös näihin ongelmiin erilaisia ratkaisuita. Esimerkiksi (Alhava, Oraskari ym., 2025) mainitsi suunnittelutiedon koneluettavuuden olevan perustana alan digitalisaation etenemiselle. Tutkimuksissa esitetyt ratkaisut voidaan luokitella samoin kuin edellä kuvatut ongelmat.

2.3.1 Esitetyt ratkaisut nykyisen prosessin ongelmiin

Nykyinen määrälaskentaprosessi (Elahi ym., 2025) sekä (Alhava, Arola ym., 2025) mukaan hyötyisi alan kokonaisvaltaisen digitalisaation paranemisesta mahdollistaen kustannustehokkaammat prosessit esimerkiksi erilaisten automaatioiden vaikutuksesta. Tähän tähdäten esitteli (Elahi ym., 2025) ja (Pishdad ja Onungwa, 2024) 5D BIM-mallinnuksen hyödyntämisen osana määrälaskentavaiheen digitalisoimista. Esimerkiksi tällä tavalla voitaisiin vastata (Alhava, Arola ym., 2025) esittämään ongelmaan suunnittelutiedon virtauksen katkoksista sekä tiedon siiloutumisesta, kun BIM-malliin tuotaisiin sekä kustannus- että aikataulutiedot.

Jotta tällainen digitaalinen suunnittelutiedon virtaaminen määrälaskijalle olisi mahdollista, tulisi (Elahi ym., 2025), (Alhava, Ruottinen ym., 2024), (Alhava, Arola ym., 2025), (Pishdad ja Onungwa, 2024) ja (Alhava, Oraskari, 2025) mukaan suunnitelmissa olevien tietojen olla standardoidussa muodossa eli noudattaa vakioitua ja strukturoitua tietorakennetta. (Alhava, Ruottinen ym., 2024) määrittelee suunnittelutiedon digitaalisen virtaamisen mahdollistamista ”Engineering Bill of Materials” (E-BOM) sekä ”Manufacturing Bill of Materials” (M-BOM) käsittein, joissa korostuu suunnittelutiedon rikastamisen menetelmät. Tällöin suunnittelijan tuottaman tiedon päälle (E-BOM) lisätään eli rikastetaan esimerkiksi määrä- ja kustannuslaskennan tarvitsemia tietoja (M-BOM). (Alhava, Arola ym., 2025) ehdottaa suunnittelutiedon virtauksen parantamiseksi mm. ”Linked Building Data” (LBD) teknologia-alustaa, (Alhava, Oraskari ym., 2025) IFCToLBD teknologiaa sekä (Alhava, Ruottinen ym., 2024) lisäksi GS1- ja GTIN-koodistojen käyttöä.

2.3.2 Esitetyt ratkaisut vastaamaan teknologisiin rajoitteisiin

Kirjallisuudessa nostettiin esille markkinoilla olevien suunnitteluohjelmistojen rajoitteet liittyen määrälaskennan vaatimaan tarkkuustasoon suhteessa nykyiseen BIM-mallinnuksen tarkkuuteen. (Alhava, Arola ym., 2025), (Jafary ym., 2025), (Abdelsalam ym., 2026), (Elmousalami 2026) ja (Chen ym., 2022) ehdottivat erilaisiin tekoälypohjaisiin tekniikoihin perustuvia ratkaisuita, joilla mahdollistettaisiin nykyisten suunnitteluohjelmistojen tuottaman tarkkuustason syventäminen määrälaskennan vaatimalle tasolle. Ehdotetut ratkaisut pohjautuivat mm. suurien kielimallien (LLM) (Abdelsalam ym., 2026), luonnollisen kielen prosessoinnin (NLP) (Jafary ym., 2025) sekä agenttiperheiden (Alhava, Arola ym., 2025) käyttämiseen määrälaskennan tukena. Myös (Yan ym., 2025) ja (Elahi ym., 2025) ehdottivat erilaisia suunnitteluohjelmistoon (Autodesk Revit) artikkelissa suoraan kehitettyjä ja kytkettyjä pieniä lisäosia, joilla mahdollistettaisiin esimerkiksi sähkön heikkovirta kaapeleiden automaattinen reititys ja pituuksien laskenta (Yan ym., 2025). Lisäksi (Chen ym., 2022) esitteli määrälaskentaa varten kehitetyn ”linkityksen” tai ”mäppäyksen” (mapping), jolla voitaisiin paremmin yhdistää suunnitteluohjelmiston tuottamat IFC-mallin objektit määrätietojen laskemiseksi erilaisissa kustannuslaskentaan tarkoitetuissa sovelluksissa.

2.3.3 Esitetyt ratkaisut ihmisten toimintatapojen muuttamiseksi

Määrälaskijoiden toimintatapojen tehostamiseksi ehdotti useampi tutkimus ratkaisuksi jonkinlaista koulutusta. (Arowoia ym., 2022) kartoitti määrä- ja kustannuslaskijoiden osaamiskenttää ja nosti sieltä esille seuraavat osa-alueet, joissa tutkimuksen valossa olisi lisäkoulutus tarpeen: taloteknisten tuotteiden asennusprosessi, laadunvarmistus sekä määrä-/kustannuslaskelman kokonaisvaltainen toteuttaminen taloteknisille järjestelmille. Myös BIM-pohjaisen määrälaskennan lisäämisessä (Babatunde ym., 2020) korosti koulutuksen merkitystä toimintatavan implementoinnin onnistumisessa sekä ylipäättänsä kyseisen toimintatavan tiedottamisesta määrälaskijoille. Lisäksi (Yan ym., 2025) ehdotti yhdeksi ratkaisun osaksi myös suunnittelualakohtaisen tietotaidon lisäämistä laskijoilla, esimerkiksi sähköjärjestelmät.

2.4 Teknologiaselvitys: tekoälyagentit suunnittelusta hankintaan

Tekoälyn soveltamismahdollisuudet ulottuvat määrälaskennasta suunnitteluaineiston tulkinnaan, tuotetiedon täydentämiseen, vaihtoehtojen vertailuun ja hankinnan valmisteluun. Agenttipohjaisessa ratkaisussa kielimalli käyttää ulkoisia tietolähteitä ja ohjelmallisia työkaluja sekä ohjaa tehtävän etenemistä vaiheittain. Rakennusalan tutkimuksessa agenttien potentiaali on tunnistettu esimerkiksi suunnittelutiedon yhdistämisessä tuotetietoon ja tietosisällön rikastamisessa (Alhava, Arola ym., 2025).

Tekoälyn hyödyntämisessä korostuvat käyttötarkoituskohdaisten minimitietosisältöjen määrittely, tiedon agenttinen rikastaminen ja vakioinnin tukeminen sekä koneellinen tarkistaminen. Minimitietosisällöt täsmentävät tarvittavat tiedot ja tarkistuksen kohteet. Agentti täydentää ja muokkaa aineistoa sovittujen lähteiden perusteella, ja tarkistus palaute ohjaa työn etenemistä. Kuvassa 1 havainnollistetaan näiden toimintojen yhteyttä suunnittelusta hankintaan.



Kuva 1. Minimitietosisällöt, agenttinen rikastaminen ja koneellinen tarkistaminen suunnittelusta hankintaan. Tarkistettu aineisto toimii seuraavan työvaiheen lähtökohtana. Nimetyt asiantuntijat hyväksyvät tekniset valinnat ja tilaukset. Mukailtu lähteestä Torro (2026).

2.4.1 Hankintaa palveleva tietosisältö

Suunnittelumallista johdettu E-BOM muodostaa perustan hankinnan tarvitsemalle osatiedolle. Kansallinen talotekniikan tuotesakoodisto tukee mallin tietosisällön vakiointia ja osien yhdenmukaista tunnistamista. Määrien rinnalla hankinnan kannalta keskeisiä tietoja ovat tekniset vaatimukset, järjestelmäyhteys, sijainti sekä yhteys suunnittelun lähdeaineistoon. Tiedon rikastuessa M-BOMiksi suunnittelun tarpeet täsmentyvät hankittaviksi tuotteiksi ja niiden valintaa tukeviksi tiedoiksi (Ruottinen ym., 2026).

Minimitietosisältö tarkoittaa tietojoukkoa, jonka seuraava työvaihe tarvitsee tehtävän suorittamiseen, sekä niiden todentamiseen tarvittavat lähteet ja dokumentit sekä koneelliset tarkistussäännöt (Torro, 2026). Se määritetään käyttötarkoituksen ja tuoteryhmän mukaan. Määrälasenta tarvitsee esimerkiksi osien tunnistet, määrät ja mittayksiköt. Tuotevertailussa mukaan tulevat suoritusarvot, mitat, liitännät ja projektiokohtaiset vaatimukset. Tilauksen valmistelu edellyttää lisäksi tuotteen ja toimittajan tunnistetia, hintaa, saatavuutta sekä toimitusehtoja. Näin tiedon riittävyttä voidaan arvioida suhteessa täsmällisesti määriteltyn tehtävään.

Seuraavasta työvaiheesta vastaava osapuoli määrittelee tarvittavat tiedot yhdessä niiden tuottajien kanssa. Samalla sovitaan lähteet, vastuut, toimitusajankohta ja koneellisesti tarkistettavat ehdot. Akbas ym. (2025) tarkastelevat käyttötarkoitukseen perustuvien tietovaatimusten ja koneellisesti käsiteltävien määritysten yhdistämistä. Tällainen määrittely tarjoaa perustan sekä agentin tehtävän ohjaamiselle että sen tuottaman aineiston tarkistamiselle.

Agenttinen käsittely voi tukea myös lähtöaineiston vakiointia. Agentti voi kohdistaa lähdeaineiston nimityksiä sovittuun tuoteosakoodistoon, ehdottaa luokitusten täydentämistä sekä yhdenmukaistaa kenttiä ja yksiköitä. Rikastamisessa se lisää tehtävän tarvitsemia tietoja lähdeaineistosta. Esimerkiksi laiteluettelossa ilmoitettu suoritusarvo voidaan liittää vastaavaan osaluettelon riviin. Tarkistuspalautte ohjaa täydennyksiä ja korjauksia, ja suunnittelija käsittelee suunnittelusisältöön kohdistuvat muutosehdotukset. Tuotevertailu aloitetaan tarkistetusta suunnitteluaineistosta, jonka vaatimukset ja tunnisteet säilyvät myöhemmässä käsittelyssä.

Suunnitteluaineiston eri osat täydentävät tietoperustaa. Työselostukset sisältävät esimerkiksi materiaali- ja asennusvaatimuksia, ja laiteluettelot täsmentävät laitteiden ominaisuuksia. Agentti voi poimia olennaiset vaatimukset, kohdistaa ne oikeisiin osiin ja järjestelmiin sekä vertailla suunnitelmaversioita. Laskenta- ja pakettirekisterit voivat täydentää osaluetteloa asennustarvikkeilla ja työmäärätiedoilla hyväksytyjen laskentasääntöjen mukaisesti. Esimerkiksi tiettyyn liitostapaan liittyvät tarvikkeet voidaan lisätä määritellyn laskentapaketin avulla, jolloin täydentämisen peruste näkyy osaluettelossa.

Tietosisältöä tuotetaan vaiheittain eri osapuolten tehtävissä. Suunnittelija määrittää teknisen tarpeen, valmistaja ylläpitää tuotteen ominaisuuksia, ja toimittaja täydentää vertailun kaupallisilla tiedoilla. Sovittu vastuunjako auttaa kohdistamaan ylläpidon ja täydennyspyynnöt oikealle osapuolelle. Suunnitelmamuutosten yhteydessä agentti voi tunnistaa muuttuneet osat ja niiden vaikutukset määriin, tuotevalintoihin ja vertailun lähtötietoihin.

2.4.2 Tuotetiedon yhdistäminen ja agenttinen tuotevertailu

Valmistajien tuotetiedon hallintajärjestelmät, tuoterekisterit ja toimittajien palvelut tarjoavat eri tarkoituksiin ylläpidettyä tietoa. Esimerkiksi LVI-info ja Sähkönumerot.fi kokoavat taloteknistä tuotetietoa. ETIM tukee tuotteiden teknisten ominaisuuksien yhdenmukaista esittämistä, ja GTIN yksilöi kaupallisen tuotenimikkeen. Näiden avulla suunnittelussa asetettuja vaatimuksia voidaan verrata tuotteiden ominaisuuksiin ja yhdistää samaa tuotetta koskevat tiedot eri lähteistä (Kebede ym., 2022; ETIM International, n.d.; GS1, n.d.).

Lähteisiin perustuvassa tiedonhaussa agentti hakee tehtävän kannalta olennaista aineistoa ja käyttää sitä vastauksen tai vertailun muodostamiseen. Tätä toimintaperiaatetta kutsutaan myös hakutäydennetyksi generoinniksi (RAG). Agentti voi edetä työselostuksen vaatimuksesta valmistajan suoritusarvoihin ja toimittajan saatavuustietoihin sekä täydentää hakua tarkistuksessa havaittujen tarpeiden mukaan. Kirner ym. (2025) kuvaavat rakennustiedon hakua luonnollisella kielellä ratkaisussa, joka hyödyntää valmiita kyselyjä, rajapintoja ja linkitettyä rakennustietoa.

Agentin työkalut voivat jakaa käsittelyn rajattuihin tehtäviin. Tuotetiedon hakutyökalu kokoaa ominaisuudet, mitoitustyökalu laskee suoritusarvot ja vertailutyökalu käsittelee hankekohtaiset kriteerit. MCP-protokollaa hyödyntävät rajapinnat tuovat tietolähteitä ja työkaluja agentin käyttöön yhtenäisellä tavalla (Model Context Protocol, n.d.). Rajapintojen toteutuksessa määritellään käytettävät tiedot, sallitut toiminnot ja tulosten muoto. Hinta-, saatavuus- ja toimitustiedot haetaan niitä ylläpitävistä toimittajajärjestelmistä. Lähteiden kattavuus, käyttöoikeudet ja päivitystiheys vaikuttavat vertailun laajuuteen ja ajantasaisuuteen.

Vertailukriteerit jäsentyvät pakollisiin vaatimuksiin ja vaihtoehtojen paremmuutta kuvaaviin tekijöihin. Tekniset raja-arvot, yhteensopivuus ja vaaditut hyväksynnät määrittävät vertailukelpoisten tuotteiden joukon. Sen sisällä vaihtoehtoja voidaan arvioida hinnan,

energiatohokkuuden, hiilijalanjäljen, saatavuuden, huollettavuuden ja asennettavuuden perusteella. Hankekohtaiset tavoitteet määrittävät kriteerien painotukset. Ympäristötietojen vertailu edellyttää yhtenäistä laskentarajasta ja vertailuyksikköä sekä soveltuvia ympäristöselosteita (EPD).

Elinkaaritarkastelu täydentää tuotevertailua käyttöiällä ja uusimistarpeella. Rodriguez ym. (2020) osoittavat talotekniikan toistuvien asennusten ja uusimisten merkityksen materiaalmäärille ja materiaalien hiilijalanjäljelle rakennuksen elinkaaren aikana. Hankinnan vertailussa agentti voi koota käyttöikä, vaihtovälejä ja ympäristövaikutuksia koskevat lähdetiedot laskentaa varten. Yhteinen tarkastelujakso ja kirjatut oletukset auttavat arvioimaan vaihtoehtoja samoilla perusteilla.

Esimerkiksi ilmanvaihdon päätelaitteen vertailu voidaan aloittaa suunnittelussa määritellystä ilmavirrasta, liitäntämitasta ja sallitusta äänitasosta. Agentti kokoaa vaihtoehtoiset tuotteet, niiden suoritusarvot ja lähdeviitteet samaan vertailuun. Järjestelmän toimintaan vaikuttavissa laitevaihdossa tarkastelua laajennetaan esimerkiksi mitoituskeinoon, ohjaukseen, energiankulutukseen ja tilantarpeeseen. Tilauskohtaisesti konfiguroitavissa laitteissa vertailuun voidaan liittää valmistajan valinta- ja mitoitusyökaluja.

Vertailun tuloksena esitetään tuotevaihtoehdot, vaatimuskohtaiset tarkistustulokset, lähteet ja jatkoselvitystä edellyttävät kohdat. Hintojen ja saatavuuden yhteydessä säilytetään hakuajan kohta. Sama aineisto voi tukea tarjouspyyntöjen valmistelua, teknistä hyväksyntää ja hankintaneuvotteluja. Teknisen hyväksynnän jälkeen valittuja tuotteita koskevia tietoja täydennetään tilauksen edellyttämällä kaupallisilla tiedoilla.

Määrä- ja ominaisuustiedot soveltuvat taulukkomuotoiseen käsittelyyn, jossa vertailu ja laskenta ovat suoraviivaisia. Tietograafit puolestaan tukevat tuotteiden, tilojen, järjestelmien ja lähdeaineistojen välisten yhteyksien tarkastelua. Esimerkiksi samaan järjestelmään kuuluvien laitteiden haku voi hyödyntää näitä yhteyksiä. Esitystapa valitaan tehtävän mukaan ja yhteys alkuperäiseen suunnittelutietoon säilytetään (Lamsal ym., 2026).

2.4.3 Tulosten tarkistaminen ja hyväksyminen

Koneellinen tarkistaminen kohdistuu työvaiheen minimitietosisältöön ja sovittuihin laskentäsääntöihin. Agentin tekemä tulkinta ja erillisillä ohjelmallisilla työkaluilla suoritettava tarkistus muodostavat toisiaan täydentävät työvaiheet. Tarkistukset kohdistuvat esimerkiksi pakollisiin ominaisuuksiin, yksiköihin, tunnisteisiin, raja-arvoihin ja lähdeviitteisiin. IDS mahdollistaa soveltuvien IFC-tietosisältövaatimusten koneellisen tarkistamisen, ja hankinnan muissa tietorakenteissa voidaan käyttää niitä varten määriteltyjä tarkistussääntöjä (buildingSMART International, n.d.).

Tarkistus palaute ohjaa agenttia täydentämään aineistoa tai korjaamaan tekemänsä muunnosta. Gou ym. (2024) osoittavat ulkoisten työkalujen hyötyä kielimallien tulosten arvioinnissa ja korjaamisessa. Stechly ym. (2025) raportoivat ulkoisen tarkistuksen parantavan tuloksia muodollisesti tarkistettavissa päättely- ja suunnittelutehtävissä. Hankinnan sovelluksessa toimintaa arvioidaan sen omilla aineistoilla ja testitapauksilla. Tarkistustulokseen kirjataan, mitä vaatimusta arvioitiin, millä aineistolla ja millä säännöllä. Tulos kuvaa näiden ehtojen täyttymistä, ja asiantuntijan arviointiin osoitetut kohdat esitetään lähteineen.

Koodausagentit laajentavat mahdollisuuksia myös työkalujen kehittämiseen. Ne voivat tuottaa uudelleenkäytettäviä toimintoja tiedon poimintaan, muunnoksiin ja laskentaan (Cai ym., 2024). Wölflein ym. (2025) kuvaavat olemassa olevan ohjelmistokoodin muuttamista agenttien käyttämiksi työkaluiksi. Hankinnassa vastaavaa toimintatapaa voidaan tutkia tuoteryhmäkohtaisten vertailu- ja tarkistustyökalujen rakentamisessa. Työkalulle määritellään syötteet, tulokset ja tarkistussäännöt. Sen toiminta testataan tunnetuilla tapauksilla ja hyväksytään osaksi työnkulkua. Työkalun määrittely, versio ja testit säilytetään myöhempää käyttöä ja päivityksiä varten.

Tiedon jäljitettävyys säilyy, kun alkuperäiset suunnitteluvaatimukset, vertailukriteerit, käytetyt tuote- ja hintatiedot, niiden versiot sekä agentin tekemät täydennykset tallennetaan vertailun yhteyteen. Samalla kirjataan sovellettu minimitietosisältö, tarkistusten tulokset ja hyväksymispäätökset. Näin suunnitelmamuutoksen tai tuotetiedon päivityksen vaikutus voidaan kohdistaa oikeisiin riveihin ja vertailu suorittaa uudelleen ajantasaisella aineistolla.

Teknisen vastaavuuden hyväksyy hankkeessa siihen nimetty asiantuntija. Hankinnasta vastaava henkilö arvioi kaupalliset ehdot ja hyväksyy tilauksen. Agentti tukee näitä päätöksiä koamalla vaihtoehdot, tarkistustulokset ja perustelut. Koneellisesti tarkistettu aineisto ja asiantuntijan hyväksyntä muodostavat yhdessä perustan seuraavaan työvaiheeseen etenemiselle (Torro, 2026).

Käyttöönotossa sovitaan myös tietojen käsittelypaikasta ja käyttövaltuuksista. Hankekohtainen aineisto ja yrityskohtaiset hintatiedot käsitellään sovitussa paikallisessa tai pilvipalveluympäristössä. Agentille määritellään tehtävän mukaiset oikeudet tiedonhakuun, aineiston muuttamiseen ja ulkoisten toimintojen käynnistämiseen. Hyväksymiskäytännöt ja lokitiedot tukevat toiminnan seurantaan. ISO/IEC 42001:2023 tarjoaa organisaatiotason kehityksen tekoälyn vastuulle, riskienhallinnalle ja toiminnan jatkuvalle kehittämiselle (ISO/IEC, 2023).

Työnkulun kehittämisessä voidaan seurata tuotevastaavuuksien tarkkuutta, minimitietosisältöjen kattavuutta, tarkastukseen käytettyä aikaa ja tulosten toistettavuutta. Agentin, tietolähteiden tai työkalujen päivitysten vaikutuksia voidaan arvioida samoilla testitapauksilla. Minimietietosisältöjen määrittely, agenttinen rikastaminen ja vakioinnin tukeminen sekä koneellinen tarkistaminen muodostavat siten yhdessä kehitettävän kokonaisuuden, joka tukee tiedon käyttökelpoisuutta suunnittelusta hankintaan.

3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa on käytetty tutkimusmenetelmänä teemahaastatteluja, tutkijan osallistuvaa haastattelua ja työpajatyöskentelyä. Kyseisten menetelmien käyttö tässä tutkimuksessa kuvataan seuraavassa.

3.1 Asiantuntijahaastattelut

Asiantuntijahaastattelut toteutettiin teemahaastatteluina, tavoitteena muodostaa kokonaiskuva TATE-määrälaskennan nykytilasta, keskeisistä haasteista sekä digitalisoinnin kehitystarpeista eri osapuolten näkökulmista. Teemahaastattelun valintaa menetelmäksi puolsi se, että määrälaskentaprosessi on käytännönläheinen ja organisaatiokohtaisesti vaihteleva ilmiö, jolloin haastateltaville oli tarpeen antaa mahdollisuus kuvata prosessia, vastuita, tiedonkulkua ja kehityskohteita omien kokemustensa perusteella.

Haastattelurunko laadittiin etukäteen tutkimuksen tavoitteiden pohjalta. Kysymyspatteri ja kautui määrälaskentaprosessiin, prosessissa syntyvään hukkaan, TATE-laskentaan sekä osapuolikohtaisiin kysymyksiin. Pääurakoitsijoille esitettiin tarkentavia kysymyksiä esimerkiksi TATE-määrien vaikutuksesta kustannuslaskentaan, hankintaan ja aikatauluun. Suunnittelijoille kohdennetut kysymykset käsittelivät muun muassa määrälaskentaa varten toimitettavia dokumentteja, laitetietoja ja suunnitteluaineiston tarkentamista. TATE-urakoitsijoiden haastatteluissa painottuivat määrälaskennan lähtötiedot, järjestelmät, laitehyväksyntä sekä kohdat, joissa puuttuvaa tietoa joudutaan täydentämään asiantuntija-arvioilla.

Tutkimuksessa haastateltiin yhteensä 18 asiantuntijaa seitsemästä eri organisaatiosta. Haastateltavat edustivat pääurakoitsijoita, TATE-urakoitsijoita ja suunnittelua. Haastattelut toteutettiin ryhmähaastatteluina. Kussakin haastattelussa oli mukana 3-4 tutkijaa, mikä mahdollisti keskustelun systemaattisen ohjaamisen, tarkentavien kysymysten esittämisen tutkijoiden vaihtelevia taustoja hyödyntämällä. Haastattelut ja haastatteluiden kestot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Haastateltujen organisaatiot, roolit ja haastattelujen kesto.

Organisaatio	Rooli	Kesto
Pääurakoitsija	TATE-määrälaskenta, asuntorakentaminen	1h30min
	Hankinta, toimitila	
	Hankinta, toimitila	
Pääurakoitsija	TATE aluejohtaja	1h31min
	TATE tulosityksikön johtaja	
TATE-Urakoitsija	Hankintainsinööri	42min
	Yksikönjohtaja	

	Kehityspäällikkö	
Suunnittelu	Projektipäällikkö, sähkö	1h53min
	LVI-Suunnittelija	
TATE-Ura-koitsija	Johtaja, hankinta ja tukitoimet	1h57min
	Liiketoimintajohtaja	
	Projektipäällikkö, hankinta	
	Kehitysjohtaja	
Suunnittelu	Tiimipäällikkö	1h40min
	Tiimipäällikkö, LVI	
Suunnittelu	Tiimipäällikkö, sähkö	1h8min
	Suunnittelupäällikkö, LVI	

Haastattelut nauhoitettiin ja litteroitiin analyysia varten. Analyysin tavoitteena oli tunnistaa määrälaskennan digitalisointiin liittyviä toistuvia havaintoja, ongelmakohtia ja kehitystarpeita eri osapuolten näkökulmista. Ensin tutkijat perehtyivät litteroituun haastatteluaineistoon itsenäisesti. Jokainen tutkija tarkasteli aineistoa haastattelurungon pääteemojen kautta ja tunnisti siitä keskeisiä havaintoja. Tarkastelussa kiinnitettiin huomiota erityisesti määrälaskennan lähtöaineistoihin, käytettyihin järjestelmiin, tiedonkulkuun, versiohallintaan, päällekkäiseen työhön, laitetietoihin, vastuunjakoon ja prosessissa syntyvään hukkaan.

Itsenäisen analyysivaiheen jälkeen tutkijat vertailivat havaintojaan yhteisesti. Yhteisessä käsittelyssä tarkasteltiin, mitkä teemat toistuivat useissa haastatteluissa ja missä kohdissa eri tutkijoiden tulkinnat erosivat toisistaan. Näin pyrittiin varmistamaan, että analyysin tulokset perustuivat haastatteluaineistoon eivätkä yksittäisen tutkijan tulkintaan.

3.2 Asiantuntijatyöpaja

Tutkimushankkeessa toteutettiin lisäksi kaksi asiantuntijavetoista työpajaa, jonka tavoitteena oli tutkimusosuudessa nykyrakennusprosessin kartoittaminen, sekä haastatteluissa esiin nousseiden haasteiden ratkaiseminen. Työpajat järjestettiin 3.3.2026 ja 4.5.2026. Työpajoihin osallistui Talotekniikka 2030 -tutkimushankkeeseen osallistujayritysten asiantuntijoita eri talotekniikan osa-alueilta: urakointi, suunnittelu, laitevalmistajat ja ohjelmistokehitys.

Ensimmäisen työpajan tavoitteena oli kartoittaa taloteknisen määrälaskennan ja hankinnan nykyprosessi sekä tunnistaa prosessissa käytettävät tietolähteet, tiedostoformaatit, ohjelmistot ja tiedonsiirron epäjatkuvuuskohdat. Työpajaan osallistui Talotekniikka 2030 -hankkeen yrittösosapuolten asiantuntijoita muun muassa talotekniikan suunnittelun, urakoinnin, hankinnan ja ohjelmistokehityksen tehtävistä. Työpajan aluksi osallistujille esiteltiin tutkimushankkeen tavoitteet, lähtöasetelma ja Business Process Management -menetelmään perustuva

työskentelytapa. Tämän jälkeen osallistujat jaettiin LVI- ja sähköryhmiin, joissa nykyprosessia kuvattiin toimijoiden, työvaiheiden, tietovirtojen ja käytettävien dokumenttien näkökulmista.

Toisen asiantuntijatyöpajan tavoitteena oli etsiä ratkaisuja määrälaskennan nykyprosessissa tunnistettuihin haasteisiin sekä tuottaa lähtötietoja tekoälykehityksen vaatimusten määrittelyä varten. Työpajan pohjustuksena osallistujille esiteltiin ensimmäisessä työpajassa laadittu nykyprosessin kuvaus, asiantuntijahaastattelujen toteutus ja haastatteluissa tunnistetut pääteemat. Keskeisiksi haasteiksi olivat nousseet puutteellinen lähtöaineisto, suunnitelmamuutokset ja ristiriidat, hajanaiset tiedonsiirtokäytännöt, tietomallien vaihteleva laatu ja kattavuus, epäselvät urakkarajat sekä aikapaineen ja hintakilpailun vaikutukset määrälaskentaan. Työpaja toteutettiin kahdessa ryhmässä, joissa osallistujat tarkastelivat tunnistettuja haasteita ja muodostivat niihin ratkaisuehdotuksia.

3.3 IFC-tiedon lukeminen ja jalostaminen tekoälyagenteilla

Tutkimushankkeessa selvitettiin ifc-pohjaisen LCA määrälaskennan mahdollisuuksia tekoälyavusteisesti. LCA määrälaskenta toimii lähtötietona rakennuksen hiilijalanjäljen määrittämistä varten. Hiilijalanjäljen määrittämistä varten tarvitaan tieto materiaalmääristä ja -ominaisuuksista materiaaliluokittain. Esimerkiksi kuinka monta tonnia raudoitusta betonirakenteissa on tai kuinka monta tonnia puuta julkisivussa on. Hiilijalanjäljen laskentaa varten tehtävä määrälaskenta poikkeaa hankintaa varten tehtävästä määrälaskennasta. Hankintaa varten tarvitaan huomattavasti tarkempaa tietoa, esimerkiksi ilmanvaihtokonetta ei voida hankkia, vaikka tiedettäisiin kuinka paljon terästä ja kuparia sen valmistukseen käytetään, tarvitaan tarkkoja teknisiä spesifikaatioita.

Tutkimuksessa käytettiin arkkitehti ja rakenne ifc-malleja kuudesta Virolaisesta projektista. Talotekniset mallit eivät sisällyneet analyysiin. Kuudesta rakennuksesta kaksi oli kouluja ja neljä muuta olivat kaupallisia rakennuksia. Käytetyt mallit eivät hyödyntäneet Suomessa laadittua kansallista tietomallin tietosisällön vakiointia ja tiedon rakenne ifc-mallien välillä vaihteli. Työn tuloksena saatua laskentatyökalua testattiin BIM4LCA hankkeessa laadittuun talotekniseen ifc-tietomalliin, jonka tietosisältö oli vakioitu. Tämä testaus tehtiin myös LCA laskennan tarvitseman tietosisällön näkökulmasta, mutta laskennan tulosta ei voitu varmistaa referenssitietojen puuttuessa.

Aluksi ifc-tiedostot muutettiin SQL tietokannoiksi, joissa agentit työskentelivät. Määrälaskennan suorittamiseksi luotiin tekoälyagenteja. Agentit jakautuivat kahteen luokkaan: ifc-mallin lukemiseen/tulkintaan, mittaamiseen ja rikastamiseen keskittyvät vapaat agentit ja vapaiden agenttien tuottamien tietojen arvioimiseen keskittyvät deterministiset tarkastusagentit. Tulkinta ja mittaamisagentit tuottivat ifc-tiedoston perusteella materiaaliluettelon, ja rikastusagentti etsi materiaaleille internet tietokannoista puuttuvat tiedot, esimerkiksi tiheys ja GWP arvo. Tutkimuksessa käytettiin saksalaista tuotetietokantaa (**ÖKOBAUDAT**). Tarkastusagentit tarkastivat jokaisen agentin tuottaman tiedon ennen sen siirtämistä seuraavaan vaiheeseen. Agenttien tuottaman määräluettelon oikeellisuutta arvioitiin vertaamalla lopputuloksena saatua määräluetteloa ihmisen tekemään LCA määrälaskentaan samoissa kohteissa.

Luotettavuus varmistettiin kolmella tavalla. Yhtenäinen sanasto pakottaa agentit nimeämään materiaalit samasta kontrolloidusta listasta, ja johdonmukaisuusportti nostaa esiin ristiriidat sen sijaan, että se sulkisi ne pois. Hyväksytyt tulkinnat siirtyvät sanastoon uudelleenkäytettäväksi. Kun paikallinen tieto ei ole riittävää, kutsutaan hakukoneeseen kytkettyä asiantuntijamallia, joka etsii valmistajien tuotetietoja, pohjoismaisia standardeja ja EPD-rekistereitä ja

palauttaa lähdeviitteellisen näytön tuomari-koodille ratkaistavaksi. Kolmanneksi järjestelmä ei keksi puuttuvaa tietoa, vaan tunnistamattomat nimikkeet jäävät näkyviin tarkistusjonoon kokonaissummien ulkopuolelle.

4 Tulokset

4.1 Asiantuntijahaastattelut tulokset

Seuraavaksi kuvataan määrälaskennan nykyprosessia ja eritellään haastateltavien esiin nostamia ongelmia. Kutakin teemaa on käsitelty omassa alikappaleessaan, jossa tarkemmin avataan havaintojen taustaa. Tuloksien pohjalta piirrettiin myös kuvaaja määräluettelon synnystä. Kukin ongelma on merkitty kuvaajaan kohtaan, missä se vaikuttaa. Kuvaaja on esitetty liitteessä 2.

Osa suunnittelijoista kuvasivat myös tehneensä määrälaskentaa, mutta se liittyi usein suunnittelun ohjaukseen ja tilaajan riskiarvioihin. Tutkimuksen fokus haluttiin pitää hankinnan yhteydessä tehtävässä määrälaskennassa. On myös mahdollista, että määrät ostetaan valmiina muualta.

4.1.1 Nykyprosessi

Urakoitsijan edustajat kertoivat, että heidän laskentansa käynnistyy, kun he saavat laskennassa käytettävän aineiston esim. projektipankista. Tämän perusteella lasketaan tilattavien materiaalien määrät ja määritetään tilattavat tuotteet. Osa urakoitsijan edustajista kertoi myös täydentävänsä määriä työn osuudella. Useampi urakoitsijan edustaja mainitsi, että lisäkirjeet laskennan aikana ovat mahdollisia. Tämä tarkoittaa käytännössä muutoksia alkuperäiseen aineistoon ja tätä kautta uudelleen laskentaa.

Pääsääntöisesti haastateltavat urakoitsijaa edustavat määrälaskijat käyttivät työssään lähtötietona saatuja PDF kuvia, työselostusta ja laiteluetteloita. Myös IFC-mallit, natiivit suunnittelu-tiedostot ja suunnittelijalta saadut massalistat olivat mahdollisia lähteitä, mutta pääsääntöisesti näitä kerrottiin käytettävän määrälaskentaa tukevana materiaalina. Yhdessä urakoitsijaa edustavassa yrityksessä kerrottiin pääsääntöisesti käytössä olevan IFC mallin. Kaikki haastateltavat totesivat mallin laadun vaikuttavan siihen, käytetäänkö sitä laskentaprosessissa vai ei.

Määrälaskentaan oli urakoitsijan edustajilla useita ohjelmia. Kaikki haastateltavat eivät halunneet tarkemmin avata käytössä olleita ohjelmistoja, mutta kaikki urakoitsijan edustajat mainitsivat Broker-ohjelmiston olevan käytössä. Määrälaskennan itsessään kerrottiin tapahtuvan käsin. Käytännössä tämä tarkoittaa putkimetrien, kulmaosien ja laitemäärien laskemista PDF kuvista. Mallista laskiessa voidaan objektit tunnistaa niille annettujen tietojen perusteella. Eri ohjelmistot voivat itsestään lisätä mallista tai kuvista saatuihin osaluetteloihin asennukseen tarvittavat osat ja työn määrän.

4.1.2 Mallin laatu ja mallinnustavat

Urakoitsijan edustajat toivat systemaattisesti ilmi mallin laatuun liittyvät ongelmat. Mallia ei uskalleta käyttää määrälaskennassa, jos sen laatuun liittyy epäilyksiä. Lisäksi kysyttäessä mallin virallisuudesta useampi urakoitsija totesi, ettei malli ole virallinen asiakirja. Esimerkkejä laatuun liittyvistä ongelmista olivat esim: puutteelliset verkoston mallinnukset ja objektien puutteellinen tietosisältö (objekti mallinnettu kuutiona, mutta edustaa esim. IV konetta, oikea kuvaus tekstikenttänä kuvassa). Jos objektin tietosisältö on puutteellinen ei sitä voida suoraan koneellisesti tunnistaa oikeaksi tuotteeksi. Samoin jos joitakin verkoston osia on jätetty mallintamatta ei niitä mallista saada kerättyä.

Kaksi haastateltavista (urakoitsijan edustaja sekä suunnittelutoimiston edustaja) totesi, että suunnitteluprosessissa mukana oleminen helpottaa mallin käyttöä määrälaskennassa. Tällöin voidaan ajoissa tuoda ilmi, mitä mallin tietokentissä tulee olla, jotta niitä voidaan hyödyntää määrälaskennassa. Lisäksi malliin liittyvien epävarmuuksien koettiin vähenevän.

Mallista puuttuu osa todellisessa asennuksessa käytetyistä tuotteista. Haastateltavat mainitsivat esimerkiksi: hanakulmarasiat, kannakkeet, putkien liitososat ja IV-koneiden pumppuryhmät. Osa näistä on eritelty suunnittelijan toimittamassa laiteluettelossa. Osaa mainituista tuotteista ei voi suunnittelijan mallinnusohjelmalla edes malliin lisätä. Haastatteluissa keskusteltiin näiden lisäämisestä malliin ja pohdittiin näiden lisäämisen työmäärää ja hyötyä. Vastausta tähän ei saatu.

Lisäksi mallin laatuun liittyen tuli urakoitsijoiden puolelta esille laatuero sähkön ja LVI:n välillä. Monesti laskentavaiheessa toimitettu LVI-malli oli pidemmälle mallinnettu kuin sähkön malli, sillä LVI-suunnittelu oli monesti laskentavaiheessa hieman sähkösuunnittelua edellä.

4.1.3 Laskentaprosessin aikaiset muutokset ja aikataulu

Lisäkirjeiden todettiin aiheuttavan hukkaa laskennassa. Syinä tehtäville muutoksille mainittiin muun muassa muuttuvat arkkitehtien pohjat. Etenkin muutoksien merkinnän puute mainittiin haastatteluissa vaikeuttavana tekijänä. Tällöin urakoitsijan täytyy itse etsiä muutokset ja tehdä nämä laskettuihin määriin. Tiukka aikataulu myös vaikeuttaa muutosten etsimistä ja tuo lisäpainetta laskentaan.

4.1.4 Tarjousaineiston laatu

Tarjousaineiston läpikäynti koettiin työlääksi. Etenkin työselostuksen koettiin aiheuttavan haasteita, sillä se on usein laaja ja voi sisältää myös projektiin liittymätöntä informaatiota. Silti se voi sisältää vaatimuksia, mitkä merkittävästi nostavat projektin hintaa. Olennaisten vaatimusten löytäminen aineistosta koettiin haastavaksi. Yksi urakoitsijan edustajista nosti näiden vaatimusten kustannusarvioinnin vaativan asiantuntemusta ja vievän merkittävästi aikaa. Osa suunnittelutoimiston edustajista tunnisti myös työselostuksen laatuun liittyvän ongelman. Suunnittelussa työselostuksen täyttäminen jää helposti viimeiseksi ja siksi sen läpikäyntiin ei jää tarpeeksi aikaa.

Kaksi urakoitsijan edustajaa totesivat, että he olivat pahimmillaan saaneet linkin tarjousaineiston sisältävään kansioon, josta heille kuuluva materiaali tulee löytää satojen asiakirjojen joukosta. Lisäksi dokumenteissa voi esiintyä ristiriitoja. Näiden ristiriitojen selvittäminen koettiin työlääksi ja hukkaa lisääväksi. Useampi haastateltava nosti esiin urakkarajat esimerkkinä ristiriidoista. Eri dokumentit esim. laiteluettelo ja lämmityskaavio saattavat mainita hankkivaksi ja asentavaksi osapuoleksi eri tahot. Pääurakoitsijan edustaja toivoi, että suunnittelijat eivät määrittäisi urakkarajoja omiin dokumentteihinsa vaan antaisivat pääurakoitsijan tehdä määrittelyn.

Lisäksi tarjousaineiston laadusta nousi haastatteluissa esille sähkön ja LVI:n välinen ero erilaisten periaatekaavioiden käytön suhteen. Sähkön tarjousaineisto sisältää huomattavasti paljon enemmän periaatteellisia kaavioita ja piirustuksia verrattuna LVI:n aineistoon, jossa korostui erilaiset laiteluettelot ja tasokuvat.

4.1.5 Suunnittelun lähtötietojen epävarmuus

Pääurakoitsijan edustaja kertoi tilaajan ja käyttäjän puolen epävarmuuksien vaikuttavan suoraan suunnitelmien ja sitä kautta määrien varmuuteen. Kaksi suunnittelijan edustajaa nostivat esiin määrälaskennan jälkeen esiin tulevat lisä- ja muutostyöt ja pohtivat voisiko nämä huomata jo urakalaskentavaiheessa. Näiden mahdolliseksi lähteeksi nähtiin erimielisyydet esim. tilavaatimuksissa. Myös sähkösuunnittelua sairaalamaailmassa tehnyt suunnittelija totesi muutoksia tulevan vielä rakennusvaiheessa. ”Käyttäjä herää tarpeeseen vasta nähtyään tilan”. Vaikka nämä eivät suoraan vaikuta määrälaskentaprosessiin nämä vaikuttavat suoraan toteutuneen materiaalien ja alun perin lasketun menekin erotukseen.

4.1.6 Tuotevaihdot

Useampi haastateltava toi ilmi ongelmia liittyen käytäntöön, jossa suunnitelman tuotteita vaihdetaan. Ehdotuksen yhteydessä tuotteen vastaavuus alkuperäiseen tulee todeta. Vahvistusta varten toimitettu aineisto ei aina suunnittelijan kokemuksen mukaan osoita selvästi mitä tuotetta ehdotetaan korvaavaksi tuotteeksi. Korvaavan tuotteen selvittäminen vie aikaa. Lisäksi tietyissä tapauksissa laitevaihto voi aiheuttaa tarpeen järjestelmämuutoksille. Urakoitsijan edustaja taas toi ilmi, että osassa projekteissa ei selvästi tuoda ilmi, ettei laitteita haluta vaihdettavan. Tämä johtaa turhien laitevaihtojen tarkasteluun.

Sytä itse laitevaihdolle todettiin useampia: Urakoitsijalla voi olla kokemuksia laitteiden asennettavuuteen tai laatuun liittyen. Myös erilliset sopimukset urakoitsijan ja laitevalmistajan välillä voivat tehdä tietyistä tuotteista urakoitsijalle halvempia. Yksi suunnittelijataustainen henkilö näki laitevaihtojen estämisen hyvin vaikeaksi ja koki sen pakollisena osana prosessia.

4.1.7 Numeeristen mittarien puute

Kaksi haastateltavaa toivat esiin, että itse määrälaskennan tarkkuudesta ei ole tarkkaa tietoa. Urakoitsijan määrälaskennan edustaja totesi, että palaute on ollut positiivista, mutta kvantitatiivista mittaria tarkkuudesta ei ole. Suunnittelijan edustaja toi myös ilmi, etteivät he saa palautetta antamistaan arvioista. Suunnittelijat toivat suoraan puutteen esiin ongelmana, mutta urakoitsijan edustaja ei.

4.2 Työpajatyöskentelyn tulokset

Maaliskuun 3. päivänä järjestetyn työpajan tuloksena laadittiin uimaratomallinen prosessikuvaus (liite 4), jossa määrälaskennan ja hankinnan vaiheet jäsennettiin asiakkaan tai käyttäjän, taloteknisen suunnittelijan, talotekniikkaurakoitsijan, pääurakoitsijan ja laitevalmistajan tehtäviksi. Prosessikuvaus osoitti, että määrätietoa tuotetaan ja käsitellään useissa vaiheissa sekä useissa eri tiedostomuodoissa. Suunnitteluaineistoa välitetään muun muassa PDF-, Excel- ja tietomallimuodossa, minkä lisäksi prosessissa hyödynnetään sähköpostia ja erilaisia laskenta- ja hankintajärjestelmiä. Määrälaskentaan sisältyy edelleen runsaasti manuaalista aineiston tulkintaa, tietojen tarkistamista ja siirtämistä järjestelmästä toiseen. Prosessin edetessä määrätietoja myös täydennetään ja tarkennetaan tarjouslaskennan, teknisten neuvottelujen, tuotehyväksyntöjen ja hankintojen yhteydessä. Työpajan perusteella keskeiseksi jatkokehityskohteeksi tunnistettiin yhtenäisen ja koneluettavan tiedon säilyminen suunnittelusta määrälaskentaan, hankintaan ja lopulta tuotteiden tilaamiseen asti.

Toisen työpajan tuloksena ratkaisuehdotukset jäsennettiin suunnittelualojen rajapintoihin ja urakkarajoihin, tietomallien vaatimustasoon, urakalaskenta-aineiston puutteellisuuteen,

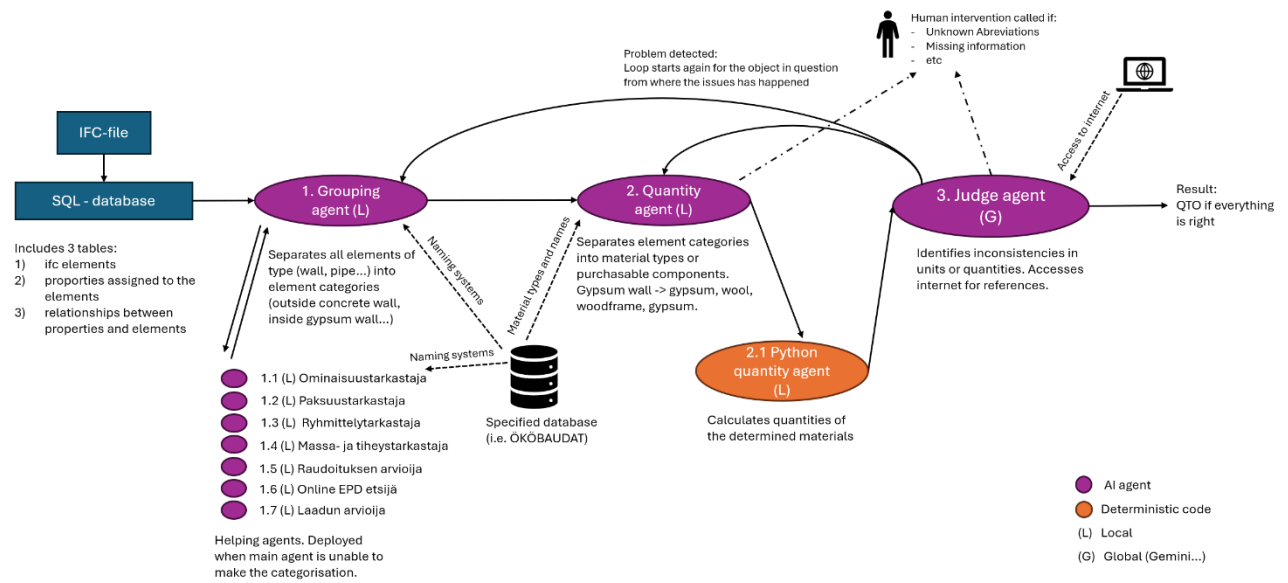
muutosten hallintaan sekä tarjouspyyntöaineiston laajuuteen ja sekavuuteen liittyviksi kokonaisuuksiksi (liite 5). Ratkaisuna esitettiin muun muassa urakkarajojen täsmentämistä, suunnittelijoille asetettavaa vakioitua tietosisältövaatimusta, tietomallien rikastamista asennettavuustiedolla sekä lähtöaineiston vähimmäissisällön määrittelyä. Lisäksi muutosten hallintaa ehdotettiin tuettavaksi ohjelmistoilla, jotka tunnistavat ja korostavat revisioiden välisiä eroja. Tekoälyn mahdollisiksi käyttökohteiksi tunnistettiin erityisesti tarjouspyyntöaineiston tulkinta ja revisioiden vertailu. Työpajassa korostui myös tarve kehittää prosessia, sopimusmalleja ja tiedonhallintaa samanaikaisesti, jotta määrälaskennan digitalisointi voisi tuottaa arvoa koko hankkeen elinkaaren ajan.

4.3 Massaluettelon automaattinen luominen tekoälyllä

4.3.1 Kehitetty agenttinen ratkaisu

Agenttinen määrälaskenta rakennettiin siten, että agentit tulkitsevat ja tuottavat tietoa, jonka oikeellisuus varmistetaan. Luodun agenttisen ratkaisun periaate on esitetty kuvassa x. Ratkaisu koostuu kolmesta pääagentista. Ensimmäisellä pääagentilla on seitsemän apuagenttia ja toisella pääagentilla on yksi apuagentti. Ensimmäinen agentti ja sen kaikki apuagentit ovat agenttisia. Toisen agentin apuagentti on deterministinen. Agenttien lähtötietona toimii ifc-tiedostosta luoto SQL-tietokanta, joka sisältää kolme taulukkoa, ifc-elementit, näiden elementtien ominaisuudet, sekä elementtien ja näiden ominaisuuksien riippuvuudet. Ensimmäinen agenttikokonaisuus ryhmittelee elementti instanssit elementtiluokkiin. Esimerkiksi seinä kategori-
aan voi kuulu 1500 elementtiä, jotka jaotellaan noin sataan luokkaan. Luokat voivat olla esimerkiksi betonirakenteinen ulkoseinä tai kevyt kipsirakenteinen väliseinä. Toinen agentti määrittelee LCA laskentaa varten materiaalit eri elementeille tai hankintaa palvelevaa määrälaskentaa varten tuotteet eri elementeille. Toisen agentin apuagentti laskee määrät määritellyille materiaaleille. Luokittelun ja materiaalien määrittelyn tueksi agenteilla on pääsy ennalta määritettyyn tietokantaan, josta mahdollisia materiaaleja ja nimeämiskäytäntöjä voidaan tarkastaa ja yhtenäistää.

Kolmas agentti on tuomari tai tarkastusagentti, joka varmistaa valmiin määräluettelon oikeellisuuden. Kolmas agentti perustuu Google Gemini LLM tekoälyyn ja käyttää tarkastuksissa tarvittaessa internethakuja. Jos tuomariagentti huomaa virheen, havaittu virhe palautetaan takaisin käsittelyyn virheen laadun mukaan. Ihmisen interventiota tarvitaan, kun agentit eivät voi tehdä määrittelyä.



4.3.2 Määrälaskennan tulokset

Menetelmän tarkkuutta arvioitiin kuuden toteutuneen Virolaisen referenssikohteen arkkitehti ja rakennemallin osalta, joissa tulosta verrattiin kokeneiden laskijoiden tekemiin määräluetteloihin. Projektikohtainen vertailu tarkkuudessa on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Määrälaskennan (QTO) ja EPD-pohjaisen hiilitiedon kohdistamisen tarkkuus.

Tapaus-tutkimus ja rakennustyyppi	Raakavertailu ilman rajausten yhdenmukaistamista	BIM-malliin perustuvan määrälaskennan (QTO) tarkkuus (massa/tilavuus)	BIM-malliin perustuvan EPD-kohdistamisen ja hiililaskennan tarkkuus (sitoutunut hiili, A1–A3)	Poikkeamien tärkeimmät juurisyyt
1: Oppilaitos-rakennus (betonielementit ja muuratut rakenteet)	Kokonaisuutena noin 35–43 %	Fyysisten massojen vastaavuus 95,4 % (<i>tekoäly: 2 264 tonnia; ihminen: 2 374 tonnia</i>)	Hiilijalanjäljen vastaavuus 95,8 % (<i>tekoäly: 2 264,2 t CO₂e; ihminen: 2 362,3 t CO₂e</i>)	Manuaalinen laskentataulukko sisälsi työmaalla käytettyä soraa, jota ei ollut 3D-mallissa. Lisäksi laskentakaavassa oli virhe, jonka vuoksi betoniseinäelementit yhdistettiin betoniteräksen päästökertoimiin.
2: Massiivipuorakennus (CLT:n ja liimapuun hybridirakenne)	Kokonaisuutena noin 46–67 %	BIM-mallin kokonaismassan vastaavuus 85,9 % (<i>betonirunko: 98,0 %; puurunko: 88,4 %</i>)	Betonirungon hiilijalanjäljen vastaavuus 98,0 % (<i>huomioi massiivipuurakenteisiin sitoutuneen biogeenisen hiilen kokonaissuodesaan</i>)	Manuaalinen kokonaismäärä sisälsi noin 1 800 tonnia maatäyttöä ja graniittikiveystä, joita ei ollut 3D-mallissa. Massiivipuorakenteisiin sitoutunutta biogeenista hiiltä ei vähennetty automaattisessa laskennassa.
3: Liikerakennus (betonielementtirunko)	Kokonaisuutena 39,4 %	Betonimassan vastaavuus 92,3 % (<i>tekoäly: betonirunko 8 914 tonnia</i>)	Betonirungon hiilijalanjäljen vastaavuus 96,4 % (<i>tekoäly: 1 005,0 t CO₂e; ihminen: 1 042,8 t CO₂e</i>)	Käytettävissä ollut 3D-malli sisälsi vain rakennemallin. Manuaaliseen kokonaismäärään sisältyi 1 427 tonnia arkkitehtonisia ikkunoita, lasiseiniä ja sisätilojen pintarakenteita, joita ei ollut viety rakennemalliin.
4: Monitoimitalo (betonielementit ja teräsrunko)	Tilavuus 17,7 %; pinta-ala 40,2 %	Betonitilavuuden vastaavuus 110,6 % (<i>perustukset: 100,0 %; laatat: 108,3 %; palikat: 116,8 %</i>)	Ei arvioitu suhteessa ihmisen laatimaan vertailutietoon (<i>manuaalinen vertailutaulukko ei sisältänyt hiilitietoja</i>)	Manuaalinen vertailutaulukko sisälsi huonetilavuuksia sekä arkkitehti- ja rakenneluokkiin kirjattuja päällekkäisiä komponenttiritiä. Fyysisten rakenteiden määrät vastasivat hyvin toisiaan aineiston puhdistamisen jälkeen.

Taloteknisestä pilottimallista ei ollut käytettävissä vastaavaa ihmisen tuottamaa vertailuaineistoa, joten sen osalta tuloksia tarkasteltiin laadullisesti. Testi osoitti, että agenttipohjainen tulokinta yhdistettynä deterministiseen todentamiseen kykenee lukemaan käytännön

suunnitteluaineiston vaihtelevuutta ja tuottamaan määrä- ja tuotetietoa myös talotekniikka malleista. Tutkimuksen yhteydessä todettiin, että automaattisen ratkaisun vahvuus perustuu ensisijaisesti epävarmojen kohteiden tunnistamiseen ja omatoimiseen ratkaisemiseen. Talotekniikan määrälaskentaa varten agenttien toimintakuvauksia muutettiin täsmällisemmän tuotetiedon saamiseksi. Kuvassa 1 on esimerkki agenttien luomasta määräluettelosta hankintaa varten. Suomen kansallisen vakioinnin ansiosta agenttien työ on tate malleissa helpompaa kuin ark malleissa, missä tieto on hajautunut epä johdonmukaisesti. Tate malleissa objektien erottamiseen tarvittavia hierarkian tasoja on vähemmän ja ark malleissa käytetyistä apuagenteista ainoastaan yhtä tarvittiin tate mallien tapauksessa.

7 IfcAirTerminal	CLIK-100	T6	CLIK-100	pcs	4	4 IfcAirTerminal CLIK-100 T6 ? CLIK-100
8 IfcAirTerminal	KTS-125-1-C	T1	KTS-125-1-C	pcs	3	3 IfcAirTerminal KTS-125-1-C T1 ? KTS-125-1-C
9 IfcAirTerminal	KSO-125-C	P8	KSO-125-C	pcs	3	3 IfcAirTerminal KSO-125-C P8 ? KSO-125-C
10 IfcAirTerminal	CLIK-100	T4	CLIK-100	pcs	3	3 IfcAirTerminal CLIK-100 T4 ? CLIK-100
11 IfcAirTerminal	KSO-125-C	P4	KSO-125-C	pcs	3	3 IfcAirTerminal KSO-125-C P4 ? KSO-125-C
598 IfcPipeSegment	Fe Teräsputki Fe33/St33	{LP10 insulated :1	Teräsputki Fe33/St33	m	4,549	8 IfcPipeSegment Fe Teräsputki Fe33/St33 Ø10 LP101 insulated
599 IfcPipeSegment	PP viemäri	{JV insulated :	PP viemäri	m	4,057	12 IfcPipeSegment PP viemäri Ø50 JV insulated
600 IfcPipeSegment	CuCr Kupariputki. Kromattu	{LV insulated :	Kupariputki. Kromattu	m	3,776	22 IfcPipeSegment CuCr Kupariputki. Kromattu Ø10 LV insulated
601 IfcPipeSegment	K Komposiittiputki (Unipipe)	{LV Aa/Ac23 x :	Komposiittiputki (Unipipe)	m	3,748	4 IfcPipeSegment K Komposiittiputki (Unipipe) Ø32 LV Aa/Ac23 x
602 IfcPipeSegment	Fe Teräsputki Fe33/St33	{LP10 Aa/Ac23 x :1	Teräsputki Fe33/St33	m	3,719	3 IfcPipeSegment Fe Teräsputki Fe33/St33 Ø15 LP101 Aa/Ac23 x

Kuva 1. Otteet TATE määräluetteloista hankintaa varten.

4.3.3 Agenttien kohtaamat ongelmat

Tutkimuksen lähtökohtana oli havainto, että IFC on periaatteessa koneluettava, mutta sen merkityssisältö ei käytännössä ole helposti käytettävissä. Tutkittujen ifc-tiedostojen sisällöstä tunnistettiin kaksi perussyötä. Ensinnäkin suunnittelija kirjoittaa nimitiedot vapaasti: materiaali, järjestelmä ja osatyyppi ovat samassa merkkijonossa lyhenteineen ja tuotenimimineen. Toiseksi IFC on joustava, joten sama tieto voi sijaita eri attribuuteissa ohjelmiston ja jopa ohjelmistoversion mukaan. Esimerkiksi väliseinät oli mallinnettu yhtenä objektina jolla oli kirjoitettu ominaisuudeksi ”kipsi15+villa60+kipsi15” ja vesikaton peltisiä elementtejä oli mallinnettu 40mm paksuisilla teräslevyillä.

Agenttinen ratkaisu kohtasi ongelmia myös vakioidun suomalaisen ifc-tiedoston analyysissä. Tarkastellussa mallissa tunnistetiedot olivat kuudessa suomenkielisessä ominaisuusjoukossa (pset), ObjectType- ja PredefinedType-kentät olivat tyhjiä, koko ja järjestelmä löytyivät FI_Tuote- ja FI_Geometria-joukoista ja eristys omasta joukostaan. Lisäksi osa ”materiaaleista” oli tosiasiaassa valmistajan tuotekoodeja (esim. päätelaitteet ja patterit), jotka on tunnistettava eri logiikalla kuin esimerkiksi putket ja kanavat.

5 Pohdinta

Haastatteluissa ja kirjallisuudessa molemmissa nousi esiin vähäinen teknologian ja mallien käyttö. Lisäksi kirjallisuudessa nostettiin syinä esiin koulutus ja sen puute. Haastatteluaineiston perusteella heikko luottamus malleihin vaikuttaa mallien käyttöön. Lisäksi se, ettei mallia nähdä virallisena suunnitteluasiakirjana vähentää halukkuutta sen käyttöön laskennassa. Asiantuntijatyöpajoissa tämän ongelman ratkaisuksi esitettiin tiukempia tietomallintamisen vaatimuksia sekä selkeitä vaatimuksia tietosisällölle. Nämä parantaisivat luottamusta malleihin ja tekisi näistä hyödyllisempiä määrälaskentaprosessissa. Suomessa käytössä oleva tietosisältövaatimus antaa hyvän pohjan tietomallin tietosisällölle. PoC löydökset myös tukevat vakioidun tietosisällön käyttöä.

Toinen toistuva teema kirjallisuudessa ja haastatteluissa oli tarve lisätä malliin puuttuvia osia. Osa lisäystarpeista nähtiin johtuvan teknologian puutteista ja osan tottumuksesta. Osa mallintamatta jäävistä osista on löydettävissä laiteluetteloista (IV-koneen pumppuryhmät, Lämmönjakohuoneet) ja osa mallintamatta jäävistä osista on ns. ”yleistietoa” (esim. kannakkeet ja putkiliittimet, kaapelit). Täten myös määrälaskentaa tekevän tekoälyagentin tulisi saada pääsy laiteluetteloihin, työselostuksiin ja muuhun laskennassa käytettävään materiaaliin.

Kirjallisuudessa todettiin mallinnustarkkuuden noston olevan yksi vaihtoehto tämän rikastamistarpeen poistamiseksi, mutta tämä nähtiin käytännössä kustannustehottomana tapana. Kaapelointi vaikuttaa olevan poikkeus tähän. Kaapeloinnin puute mallista nostettiin esiin erillisenä ongelmana haastatteluissa. Myös työryhmissä kaapeloinnin puute nostettiin esiin.

Kolmas sekä kirjallisuudessa, että haastatteluissa esiin tulleista ongelmista on suunnittelun lähtötietojen epävarmuus. Vaikka nämä eivät suoraan näy itse määrälaskennassa nämä vaikuttavat projektin toteutuneeseen menekkiin. Määrälaskennan tuottamien määrien ja todellisen toteuman erosta ei tämän lisäksi saada haastattelujen perusteella kvantitatiivista tietoa. Täten muutosten vaikutusta on vaikea arvioida. Yksi kiinnostava jatkotutkimusaihe olisikin tuottaa kvantitatiivista tietoa arvioidun ja todellisen materiaalimenekin suhteesta.

Kirjallisuudesta ei tunnistettu tarjousaineiston laatuun liittyviä ongelmia (pl. mallin laatu). Osasyynä tähän voi olla kirjallisuuskatsauksen laajuus ja se, että LVIS alalle kohdistuvia tutkimuksia löydettiin vähän. Haastatteluissa etenkin työselostus koettiin ongelmalliseksi dokumentiksi sen laajuuden vuoksi. Toinen selkeä ongelmakohta oli urakkarajat ja niihin liittyvät ristiriidat. Potentiaalisena ratkaisuna näihin ongelmiin toimisi tekoälyagentit.

Tekoälyn kyky tiivistää dokumenttien sisältämää tietoa ja analysoida dokumentteja voi auttaa tunnistamaan työselostuksesta olennaisimmat osat. Tekoäly voisi myös analysoida tarjoukseen liittyviä dokumentteja ristiriitojen varalta. Ristiriitoja ratkova agentti voisi toimia joko suunnittelijan tai urakoitsijan apuna. Suunnittelijan apuna agentti voisi auttaa kasvattamaan tarjousaineiston laatua, urakoitsijan työkaluna agentti voisi nostaa ristiriidat esiin ja selvittää mitkä kohdat aineistosta tulee selvittää. Urakkarajojen selvittämiseen ehdotettiin myös selkeää vastuunjakoa niin, että suunnittelija ei merkkaisi omiin dokumentteihinsa urakkarajoja, vaan nämä määrittäisi pääurakoitsija.

Yksi haastatteluissa selkeästi esiin noussut ongelma oli laskentaprosessin aikaiset muutokset. Vastaavaa ei noussut esiin kirjallisuudessa. Työryhmissä tähän ongelmaan esitettiin ratkaisuksi erinäköisiä ohjelmistoja, jotka osaavat tulkita annetun aineiston perusteella muutoksia.

Muutoksia voitaisi aineistosta myös etsiä esimerkiksi tekoälyagenttien avulla. Tämä nopeuttaisi reagointia muutoksiin mikä auttaisi myös aikataulupaineen kanssa. Työryhmissä tuotiin esiin mahdollisuus ”kilpailuttaa yksillä kuvilla” eli niin, ettei lisäkirjeitä lähetettäisi prosessin aikana ollenkaan.

Laitteiden vaihto ja niiden hyväksyttäminen nousi haastatteluissa esiin yhtenä ongelmakohdaksi. Laitteiden vaihdon estäminen koettiin haastavaksi ja jopa mahdottomaksi. Laittevaihtoihin vaikuttaa paljon urakoitsijan kokemus laitteesta ja urakoitsijan omat sopimukset eri laitevalmistajien kanssa. Samaan aikaan suunnittelija käyttää aikaa laitevalintaan. Haastateltavien mukaan laitevalinnassa haastavimpia laitteita olivat esim. IV-koneet ja oviverhopuhaltimet. Laitteiden valintaa käsitellään mm. tutkimuksessa Alhava ym., 2025. AI agentit

Sekä haastatteluissa että kirjallisuudessa nousi esille suunnittelualojen väliset erot määrälaskennan kannalta. Kirjallisuudessa tuotiin esille sähkösuunnittelun seuraavan LVI-suunnittelun jäljessä, mikä näkyi esimerkiksi työmaavaiheessa, jolloin sähkö asennettiin viimeisenä jäljelle jääneeseen tilaan. Samankaltaisuutta ilmeni myös haastatteluissa, joissa tuotiin esille sähkömallin ja sähkön laskenta-aineiston olevan enemmän periaatteellisella tasolla laskennan alkaessa, minkä koettiin vaikuttavan laskennan toteuman tarkkuuteen, sillä tällöin laskenta-aineistossa on enemmän tilaa mahdollisille myöhemmin tuleville muutoksille.

Pelkän IFC mallin käyttö agentin tietolähteenä ei tämän tutkimuksen mukaan ole riittävää täydellisen massalistan luontiin. Lisäksi käytetyn mallin laatu vaikuttaa saadun massalistan laatuun. Urakoitsija joutuu todellisuudessa käyttämään useampaa eri tietolähdettä määrittääkseen täydellisen rakennuksen massaluettelon ja jalostaa tästä vielä hankittavien osien luettelon asennettavuuden, saatavuuden, hiilijalanjäljen jne. perusteella. Täten on oletettavaa, että myös tekoälyagentin tulisi koostaa täydellinen massalista hyödyntäen eri tietolähteitä. Näiden tietolähteiden välillä voi olla ristiriitaisuuksia, jotka agentin tulisi selvittää. PoC käsitteli vain IFC tiedostoa. Tämä osoittaa agentin potentiaalin massalistan luonnissa jopa vakioimattoman IFC tiedoston tapauksessa.

Tekoälyagentit eivät tämän tutkimuksen valossa tulisi poistamaan suunnittelun lähtötietojen epävarmuudesta, suunnitelmamuutoksista, ja dokumenttien ristiriidoista aiheutuvaa hukkaa, mutta prosesseja nopeuttamalla niillä on potentiaalia vähentää sitä. Siksi myös suunnittelu- ja määrälaskentaprosessin kehittämiseen ja niiden tuottamien aineistojen laatuun kokonaisuutena on syytä keskittyä.

Haastateltaviksi valikoitu laajasti eri toimijoita. Tällä pyrittiin saamaan monia eri näkökulmia nykyisen määrälaskentaprosessin toimivuuteen. Yksittäisen toimijan edustajia ei kuitenkaan ollut määrällisesti montaa. Täten määrällisiä päätelmiä kuvatuista ongelmista ei voida luotetavasti tehdä. Lisäksi eri dokumenttien tietosisällön tarkkaa laadullista analyysiä ei kyetty tekemään, sillä tutkijoilla ei ollut työselostuksia tai laiteluetteloita käytettävissä. PoC ei myöskään päässyt käyttämään työselostuksia ja laiteluetteloita niiden puutteen vuoksi.

6 Yhteenveto

Tutkimushankkeen TH15 tavoitteena oli muodostaa kokonaiskuva taloteknisen määrälaskennan ja hankinnan nykytilasta, tunnistaa prosessin keskeiset ongelmat sekä arvioida, miten digitalisaatio ja erityisesti tekoäly voisivat näihin vastata. Aihetta lähestyttiin neljällä toisiaan täydentävällä menetelmällä: kirjallisuuskatsauksella, teknologiaselvityksellä, 18 asiantuntijan teemahaastatteluilla seitsemästä organisaatiosta sekä kahdella asiantuntijatyöpajalla. Näiden lisäksi toteutettiin agenttipohjainen todennus (PoC), jossa tunnistettuja ongelmia ratkaistiin käytännön aineistolla.

Tutkimuksen selkein havainto on kuilu tietomallien teknisen kyvykkyyden ja niiden todellisen käytön välillä. Vaikka kirjallisuus osoittaa tietomallipohjaisen määrälaskennan olevan nopeampaa ja tarkempaa kuin dokumenteista tehtävän laskennan, valtaosa laskennasta tehdään edelleen käsin. Haastatteluissa korostui, että mallia ei pidetä virallisena suunnitteluasiakirjana, sen tietosisältö vaihtelee hankkeittain, ja osa asennettavista tuotteista puuttuu mallista kokonaan. Kun mallin laatua ei voi ennakoida, laskija palaa usein lähteeseen, jonka virhetyypit hän tuntee.

Prosessin ongelmat jäsenyivät kolmeen ryhmään. Ensimmäinen liittyy lähtöaineiston laatuun: työselostuksen laajuus, dokumenttien väliset ristiriidat, epäselvät urakkarajat ja laskenta-aikaiset lisäkirjeet lisäävät työtä ja epävarmuutta. Toinen liittyy tietomallien tietosisältöön ja mallinnustapojen vaihteluun. Kolmas on prosessin rakenteellinen tietojen menettäminen. Kun arviolta yksi viidestä lasketusta urakasta johtaa sopimukseen, suurin osa laskentatyöstä ei tuota arvoa, ja tarjousten hajonta tarkoittaa, ettei määrätiedon tarkkuudesta ole yhteistä käsitystä. Yksikään haastateltu ei kyennyt esittämään määrällistä mittaria oman laskentansa tarkkuudelle.

PoC osoitti, että agenttipohjainen järjestelmä kykenee tiettyssä määrin käsittelemään vaihtelua, joka on estänyt automatisoinnin. Keskeinen havainto oli, ettei koneluettavuuden este ole geometria vaan tietojen merkitys, eli sama tieto sijaitsee eri attribuuteissa ohjelmiston ja version mukaan. Myös nimitiedot on kirjoitettu vapaasti suomen kielellä. Kiinteisiin sääntöihin perustuvat jäsentämistavat eivät ratkaise tätä. Agentti puolestaan tunnistaa, missä merkitsevä tieto sijaitsee. Luotettavuus syntyi lähtökohtaisesti epävarmuuden tekemisestä näkyväksi, ei aukottomasta automaatiosta.

Tulokset viittaavat siihen, että tekoäly ei poista tarvetta tietosisällön vakioinnille vaan tekee siitä kannattavampaa. Vakioitu tietosisältövaatimus antaa agenteille luotettavan lähtökohdan, ja agentit puolestaan kykenevät vähentämään vakioinnin ja mallinnustapojen välisiä eroja ilman, että tarkkuutta jouduttaisiin nostamaan kustannustehottomalle tasolle. Työpajoissa korostui, että prosessia, sopimusmalleja ja tiedonhallintaa on kehitettävä samanaikaisesti. Pelkkä työkalu ei ratkaise ongelmaa, jonka perussyyt ovat vastuunjaossa ja tiedonkulun katkoksissa.

Jatkokehityksen kannalta tunnistettiin kolme löydöstä. Ensinnäkin tarvitaan kvantitatiivista tietoa lasketun ja toteutuneen materiaalien eroista. Toiseksi tuotetunnistuksen pohjamateriaali tulee laajentaa suomalaisten valmistajien tuoteluetteloihin, jolloin ketju ulottuu suunnittelusta tuotteen tilaamiseen asti. Kolmanneksi agenttipohjaista lähestymistapaa kannattaa käyttää paikoissa, joissa tietojen menettäminen on suurinta, kuten tarjousaineiston tulkinnaissa ja tuotevaihtojen vastaavuuden arvioinnissa. Seuraavassa vaiheessa on hyödyllistä parantaa

PoC:ia ja analyysiä hyödyntäen vakioitua kotimaista tietosisältöä ja tietokantoja (LVI-info ja STK). Näiden keinojen avulla koneluettavan tiedon säilyminen suunnittelusta aina määrälaskentaan, hankintaan ja lopulta tilaukseen voitaisiin mahdollistaa.

7 Lähteet

Valinejadshoubi, Mojtaba, Osama Moselhi, Ivanka Iordanova, et al. “A Cloud-Driven Framework for Automated BIM Quantity Takeoff and Quality Control: Case Study Insights.” *Buildings (Basel)* 15, no. 21 (2025): 3942. <https://doi.org/10.3390/buildings15213942>.

Kim, Seongah, Sangyoon Chin, and Soonwook Kwon. “A Discrepancy Analysis of BIM-Based Quantity Take-Off for Building Interior Components.” *Journal of Management in Engineering (New York)* 35, no. 3 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000684](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000684).

Mia, Mohammad Biplab, Mamun Hossen, Ashake Elahi, Md. Shahriar Sujan, and Mst. Mahafuza Akhtar Najmin. “A Study on 5D BIM Implementation for Construction Cost and Quantity Management in the AEC Industry.” *OALib (Online)* 12, no. 11 (2025): 1–18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1114343>.

Monteiro, André, and João Poças Martins. “A Survey on Modeling Guidelines for Quantity Takeoff-Oriented BIM-Based Design.” *Automation in Construction (Kidlington)* 35 (November 2013): 238–53. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.005>.

Alhava, Otto, Bettina Ruottinen, Antti Peltokorpi, Magnus Siren, Antti Aaltonen, and Tomi Pitkäranta. 2024. “Advancing Digitalisation in Construction Through Automated Metadata Management and Machine Data Processing.” In *Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78*, Marrakech, Morocco, October 2–3, 2024. [ITC SciX Digital Library](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.005).

Alhava, Otto, Tommi Arola, Osku Torro, Markus Järvenpää, Tero Järvinen, and Bettina Ruottinen. 2025. “AI-Agent Application for Semantic Data Enrichment in Ventilation Systems Using National Nomenclature for IFC and GS1-Based Product Information.” *Proceedings of the 13th Linked Data in Architecture and Construction Workshop (LDAC 2025)*. CEUR Workshop Proceedings 4113: 193–206. <https://ceur-ws.org/Vol-4113/paper14.pdf>.

Jafari, Peyman, Davood Shojaei, Abbas Rajabifard, and Tuan Ngo. “AI-Augmented Construction Cost Estimation: An Ensemble Natural Language Processing (NLP) Model to Align Quantity Take-Offs with Cost Indexes.” *International Journal of Construction Management* 26, no. 8 (2026): 1508–26. <https://doi.org/10.1080/15623599.2025.2558070>.

Abdelsalam, Mohamed, Amr Ashmawi, and Phuong H. D. Nguyen. “AI-Driven Automation of Construction Cost Estimation: Integrating BIM with Large Language Models.” *Buildings (Basel)* 16, no. 3 (2026): 485. <https://doi.org/10.3390/buildings16030485>.

Babatunde, Solomon Olusola, Srinath Perera, Damilola Ekundayo, and Tolulope Esther Adeleye. “An Investigation into BIM-Based Detailed Cost Estimating and Drivers to the Adoption of BIM in Quantity Surveying Practices.” *Journal of Financial Management of Property and Construction* 25, no. 1 (2019): 61–81. <https://doi.org/10.1108/JFMPC-05-2019-0042>.

Pishdad, Pardis, and Ihuoma O. Onungwa. "Analysis of 5D BIM for Cost Estimation, Cost Control and Payments." *Journal of Information Technology in Construction* 29 (January 2024): 525–48. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024>.

Elmousalami, Haytham H. "Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-the-Art Review." *Journal of Construction Engineering and Management (New York)* 146, no. 1 (2020). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678).

Alhava, Otto, Jyrki Oraskari, Tommi Arola, Tero Järvinen, Markus Järvenpää, and Bettina Ruottinen. 2025. "BIM Data Content Guiding Takt Production Material Flow: IFC Meets MTS Supply Chain." *CEUR Workshop Proceedings* 4113: 179–192. [CEUR Workshop Proceedings \(Paper 13\)](https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024).

Alathamneh, Shadi, Wesley Collins, and Salman Azhar. "BIM-Based Quantity Takeoff: Current State and Future Opportunities." *Automation in Construction* 165 (September 2024): 105549. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105549>.

Soon, Lam Tatt, Lik Syuen Wong, Myzatul Aishah Kamarazaly, Chai Chang Saar, and Habibah Sheikh Ilmi. "COMPARISON OF BIM-BASED QUANTITIES TAKE-OFF IN QUANTITY SURVEYING PROFESSION." *PLANNING MALAYSIA* 22 (July 2024). <https://doi.org/10.21837/pm.v22i32.1499>.

Chen, Binjin, Shaohua Jiang, Ligang Qi, et al. "Design and Implementation of Quantity Calculation Method Based on BIM Data." *Sustainability (Basel)* 14, no. 13 (2022): 7797. <https://doi.org/10.3390/su14137797>.

Yan, Yan, Chaonan Wang, Fan Zhang, et al. "Development and Implementation of a System for Electrical Engineering BIM Detailed Design in Construction Projects." *Buildings (Basel)* 15, no. 16 (2025): 2960. <https://doi.org/10.3390/buildings15162960>.

Arowoiya, Victor Adetunji, Olusola Festus Akinradewo, and Onaopepo Adeniyi. "Evaluation of Strategic Knowledge Areas Required in Mechanical and Electrical Services Cost Management." *Journal of Engineering, Project, and Production Management (Pingtung)* 12, no. 3 (2022): 250–58. <https://doi.org/10.32738/JEPPM-2022-0023>.

Wahab, Abdul, and Jun Wang. "Factors-Driven Comparison between BIM-Based and Traditional 2D Quantity Takeoff in Construction Cost Estimation." *Engineering, Construction, and Architectural Management (Bradford)* 29, no. 2 (2022): 702–15. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0823>.

Khosakitchalert, Chavanont, Nobuyoshi Yabuki, and Tomohiro Fukuda. "Improving the Accuracy of BIM-Based Quantity Takeoff for Compound Elements." *Automation in Construction (Amsterdam)* 106 (October 2019): 102891. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102891>.

Choi, Jungsik, Hansaem Kim, and Inhan Kim. "Open BIM-Based Quantity Take-off System for Schematic Estimation of Building Frame in Early Design Stage." *Journal of Computational Design and Engineering* 2, no. 1 (2015): 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.11.002>.

Olsen, Darren, and J. Mark Taylor. "Quantity Take-Off Using Building Information Modeling (BIM), and Its Limiting Factors." *Procedia Engineering* 196 (2017): 1098–105. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.067>.

Karan, Ebrahim P., Vehideh Karimi Mansoob, Ali Khodabandelu, Sadegh Asgari, and others. 2021. "Using Artificial Intelligence to Automate the Quantity Takeoff Process." In *Proceedings of the CIB International Conference on Smart Built Environment (ICSBE 2021)*, Dubai, United Arab Emirates, December 2021. https://www.researchgate.net/publication/360265034_Using_Artificial_Intelligence_to_Automate_the_Quantity_Takeoff_Process.

Mischke, J., K. Stokvis, K. Vermeltfoort, and B. Biemans. "Delivering on Construction Productivity Is No Longer Optional." *McKinsey & Company*, August 9, 2024. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/delivering-on-construction-productivity-is-no-longer-optional>.

Akbas, E., M. Bolpagni, A. Borrmann, S. Boeykens, M. Mellenthin Filardo, L. Liu, and J. Beetz. "A Holistic Approach to Information Requirements: Integration of Level of Information Need and Information Delivery Specification." *Journal of Information Technology in Construction* 30 (2025): 731–744. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.030>.

buildingSMART International. "Information Delivery Specification (IDS)." n.d. <https://technical.buildingsmart.org/projects/information-delivery-specification-ids/>.

Cai, T., X. Wang, T. Ma, X. Chen, and D. Zhou. "Large Language Models as Tool Makers." *The Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR)* (2024). <https://openreview.net/forum?id=qV83K9d5WB>.

ETIM International. "ETIM Classification Model." n.d. <https://www.etim-international.com/classification/model-information/>.

Gou, Z., Z. Shao, Y. Gong, Y. Shen, Y. Yang, N. Duan, and W. Chen. "CRITIC: Large Language Models Can Self-Correct with Tool-Interactive Critiquing." *The Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR)* (2024). https://proceedings.iclr.cc/paper_files/paper/2024/hash/fef126561bbf9d4467dbb8d27334b8fe-Abstract-Conference.html.

GS1. "GS1 General Specifications." n.d. <https://www.gs1.org/standards/barcodes-epcrfid-id-keys/gs1-general-specifications>.

ISO/IEC. "ISO/IEC 42001:2023. Information Technology — Artificial Intelligence — Management System." International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, 2023. <https://www.iso.org/standard/42001>.

Kebede, R., A. Moscati, H. Tan, and P. Johansson. "Integration of Manufacturers' Product Data in BIM Platforms Using Semantic Web Technologies." *Automation in Construction* 144 (2022): 104630. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104630>.

Kirner, L., J. Oraskari, and S. Brell-Cokcan. "Developing a RAG-Based System for Natural Language Access to Linked Building Data on Construction Sites." *Proceedings of the 13th*

Linked Data in Architecture and Construction Workshop (LDAC 2025). CEUR Workshop Proceedings 4113 (2025): 66–77. <https://ceur-ws.org/Vol-4113/paper5.pdf>.

Lamsal, R., S. Zlatanova, H. Xu, Y. Sun, and J. X. Shen. “IfcLLM: Natural Language Querying of IFC Models Through Complementary Relational and Graph Representations.” *arXiv:2605.13236v2* (2026). Ennakkoversio. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2605.13236>.

Model Context Protocol. “What Is the Model Context Protocol (MCP)?” n.d. <https://modelcontextprotocol.io/docs/getting-started/intro>.

Rodriguez, B. X., M. Huang, H. W. Lee, K. Simonen, and J. Ditto. “Mechanical, Electrical, Plumbing and Tenant Improvements over the Building Lifetime: Estimating Material Quantities and Embodied Carbon for Climate Change Mitigation.” *Energy and Buildings* 226 (2020): 110324. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110324>.

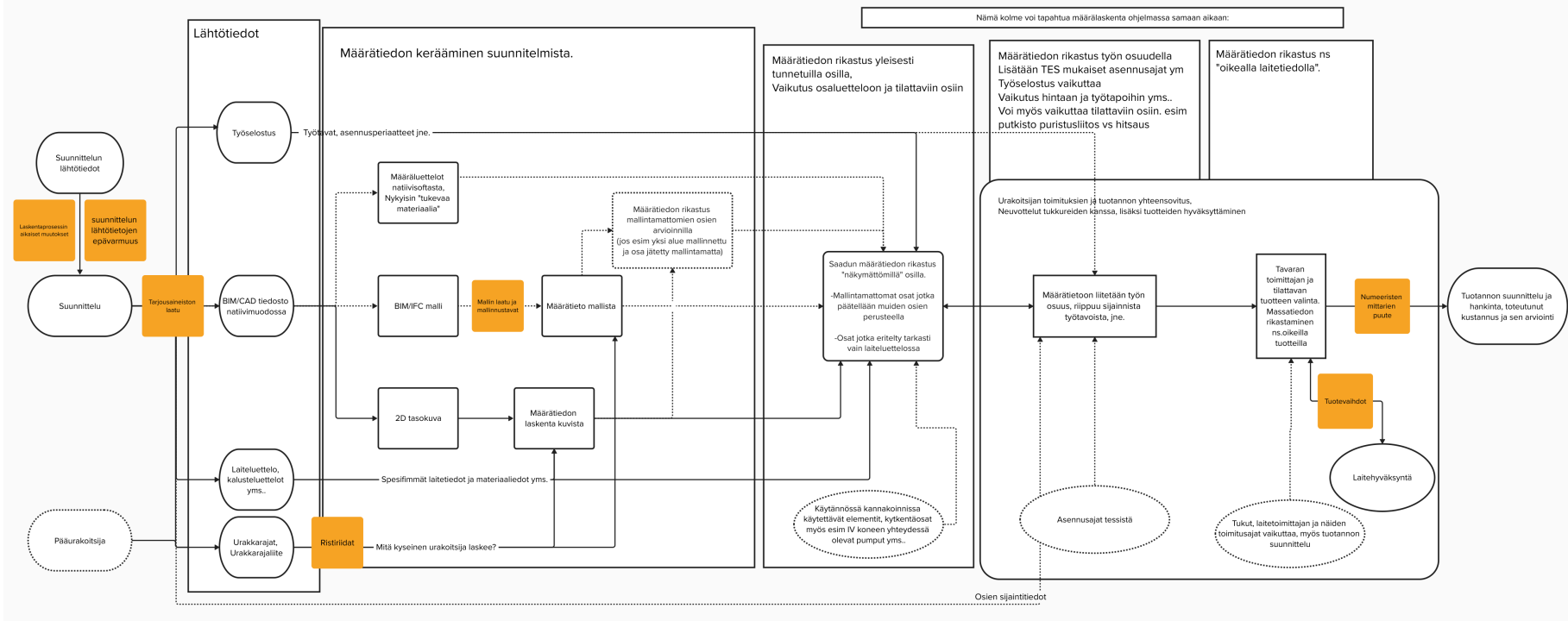
Ruottinen, B., O. Alhava, M. Tetik, T. Järvinen, and N. Brusselaers. “Standardised MTS Nomenclature for Automated BIM-to-BOM and ERP Integration.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 13th Nordic Conference on Construction Economics and Organisation (CREON 2026)* (2026): 1–12. <https://hdl.handle.net/20.500.14017/35ef836f-5ef8-4d5b-a1cb-b4b1e86b4161>.

Stechly, K., K. Valmeekam, and S. Kambhampati. “On the Self-Verification Limitations of Large Language Models on Reasoning and Planning Tasks.” *International Conference on Learning Representations (ICLR)* (2025). https://proceedings.iclr.cc/paper_files/paper/2025/hash/f3c5e56274140e0420baa3916c529210-Abstract-Conference.html.

Torro, O. “A Neuro-Symbolic Reference Architecture for Verified Engineering-to-Procurement Handovers in Construction.” Working paper, Tampere University, 2026.

Wölflein, G., D. Ferber, D. Truhn, O. Arandjelović, and J. N. Kather. “LLM Agents Making Agent Tools.” *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)* (2025): 26092–26130. <https://doi.org/10.18653/v1/2025.acl-long.1266>.

Liite 1. Kuvaaja Määräluettelon synnystä ja prosessin ongelmakohtista



Liite 2. *Teemahaastatteluja ohjanneet kysymykset ja aihealueet*

Taustatiedot

- 1. Nimi ja yritys
- 2. Mikä on nykyinen tehtäväsi ja vastualueesi yrityksessäsi

Määrälaskentaprosessi (kaavio)

- 1. Toteutuuko sinusta prosessi oheisen kaavion (näytetään haastattelussa) mukaisesti? Mitä nimikkeitä käyttäisitte kyseisessä prosessista / miten ryhmittelisit sen?
- 2. Mitä lähtöaineistoa käytätte määrälaskennassa? Mitä aineistoa käytätte ensisijaisesti ja mitä toissijaisesti? Missä muodossa lähtöaineisto tyypillisesti on? (esim. tietomalli, PDF, Excel)
- 3. Kuka kokoa määrälaskennan lähtöaineiston, ja miten varmistetaan, että käytössä on oikea versio aineistosta? Miten päivitykset, revisiot ja muutokset siirtyvät määrälaskentaan projektin aikana?
- 4. Mitä järjestelmiä käytätte määrälaskennassa?
- 5. Kuinka tarkkaan lopputulokseen päästään määrälaskennassa? Kuinka tarkka?

Määrälaskentaprosessin hukka (kaavio)

- 6. Missä kohdissa nykyistä määrälaskentaprosessia syntyy eniten hukkaa?
- 7. Joudutteko tekemään samaa työtä useaan kertaan? Missä vaiheessa?
- 8. Missä vaiheissa tieto siirtyy huonosti osapuolelta toiselle? Mitkä ovat yleisimmät syyt tiedonkatkoksiin määrälaskennassa?
- 9. Mikä on mielestäsi määrälaskennan suurin haaste?

TATE-urakoitsija

- 10. Mitkä järjestelmät tai komponentit ovat kaikkein vaikeimpia laskea määrälaskennassa?
- 11. Missä kohdissa joudutte täydentämään puuttuvaa tietoa omalla asiantuntija-arviolla? Mitä nämä tiedot ovat?
- 12. Vaikeuttavatko pääurakoitsijan tai tilaajan aineistokäytännöt määrälaskentaa?
- 13. Kuka on vastuussa tietojen oikeellisuudesta? Kenellä on vastuu virheiden esille nostamisesta?
- 14. Miten laitehyväksyntä prosessi menee?
- 15. Onko esimerkkejä laitteista, jotka laitehyväksyntäprosessissa tyypillisesti aiheuttavat haasteita? Missä tulee eniten tuotevaihtoja?

- 16.Mitkä laite- ja/tai järjestelmätiedot vaikuttavat eniten määrälaskentaprosessissa urakoitsijan näkökulmasta?
- 17.Mikä tekijä painaa eniten ehdotettavan tuotteen valinnassa?
- Pääurakoitsija
- 18.Miten TATE-määrät vaikuttavat hankkeen kokonaiskustannuslaskentaan, hankintaan ja aikatauluun?
- 19.Miten yhteistyö ja tiedonkulku toimii tilaajan sekä tate-urakoitsijan kanssa? Onko eri projekteissa haasteita, jotka nousevat usein esiin?
- 20.Mitä päätöksiä tarvitaan ennen kuin määrälaskenta voi alkaa? Mitä päätöksiä prosessin aikana tarvitaan? Mikä urakkamuodoista on raskain päätöksen teko prosessissa?

Suunnittelu

- 21.Mitä dokumentteja toimitatte TATE-urakoitsijalle määrälaskentaa varten? Miten määrälaskentaa varten urakoitsijalle toimitettavat tiedot kerätään? Mihin tiedot tallennetaan? Kuka ne kerää ja tallentaa? Entä toimittaa?
- 22.Kuka on vastuussa tietojen oikeellisuudesta? Kenellä on vastuu virheiden esille nostamisesta?
- 23.Joudutteko tarkentamaan annettuja dokumentteja urakoitsijalle? Mitä nämä tiedot ovat?
- 24.Annatteko valmiita määrälistoja suoraan suunnitteluohjelmista urakoitsijalle?
- 25.Millaisia laitetietoja ko. dokumentit sisältävät?
- 26.Miten laitehyväksyntä prosessi menee?
- 27.Onko esimerkkejä laitteista, jotka laitehyväksyntäprosessissa tyypillisesti aiheuttavat haasteita?
- 28.Mitkä laite- ja/tai järjestelmätiedot vaikuttavat eniten määrälaskentaprosessissa suunnittelijan näkökulmasta?
- 29.Mitä laitetietoja painotat esimerkkilaitetta valitessasi

Liite 3. Ensimmäisen työpajan tulokset määrälaskentaprosessista

