

Building 2030 - Hukan mittaaminen suunnittelussa ja tuotannossa loppuraportti

Kirjoittajat:

Aalto-yliopiston tutkijat: Olli Seppänen, Joonas Lehtovaara, Petteri Uusitalo, Eelon Lappalainen

Diplomityöntekijät: Anton Ruohomäki, Hans Pasila, Saara Salerto, Ossi Koniel, Teemu Järvinen

Kuva: AE Partners



Sisällysluettelo

1. Johdanto	3
2. Hukka suunnittelussa	4
2.1. Hukan tyypit suunnittelussa	4
2.2. Suunnitteluprosessin stabiiliuden mittaaminen	5
2.3. Hukan arviointi havainnointia ja ERP-tietoa hyödyntämällä (lyhennetty lähteestä Pikas, Koskela & Seppänen 2020)	8
2.4. Revisioiden hyödyntäminen suunnittelun hukan mittaamisessa	10
2.6. Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet	12
3. Hukka tuotannossa	13
3.1. Sisäpaikannuksen hyödyntäminen hukan mittaamisessa	13
3.2. Hukan mittaaminen kypäräkameroilla	14
3.3. Hukan mittaaminen mestakameroilla	18
3.4. Hukan arviointi kulunvalvontadatasta	22
3.5. Hukka sähkö- ja putkitöissä asentajan näkökulmasta	25
3.7. Tuotannon hukan vähentäminen suunnittelua kehittämällä	27
4. Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet	30
5. Lähdeluettelo	32

1. Johdanto

Building 2030 –konsortion rahoittaman tutkimushankkeen ”Hukan mittaaminen suunnittelussa ja tuotannossa” tavoitteena oli kehittää menetelmiä hukan mittaamiseen tuotannossa ja suunnittelussa. Lähtökohtana hankkeelle oli aiemmassa iCONS –hankkeessa kehitetty sisäpaikannusmenetelmä ja rakennushankkeista sisäpaikannuksella havaittu jatkuva liike työmaalla (Zhao et al. 2019) ja Building 2030 tahtihankkeissa havaitut haasteet (Lehtovaara et al. 2019).

Hukalla on suuri merkitys rakennus- ja suunnitteluprojektiliiketoiminnalle. Nykyisissä liiketoimintamalleissa kaikki kustannusarviot ja aikataulut sisältävät puskureita ”keskimääräistä” hukkatasoa varten. Projekti, joka valmistuu budjetissa ja aikataulussa on siis hukkamäärältään keskitasoa. Jos hukkaa on enemmän, ainakin joidenkin toimijoiden osalta budjetit ja aikataulut ylittyvät. Toisaalta jos hukkaa on vähemmän, hanke on taloudellisesti ja aikataulullisesti parempi kuin budjetoitu. Koska kustannusarviot ja aikataulut perustuvat valmistuneiden hankkeiden keskiarvoihin, hukkaan ei pääse käsiksi katsomalla poikkeamia suunnitelmista, vaan on kehitettävä hukkaa suoraan mittaavia menetelmiä.

Hankkeessa haluttiin arvioida mahdollisimman monia eri tapoja, joilla hukattuun aikaan voisi päästä kiinni suunnitteluprosessissa ja tuotannossa. Kiinnostuksen kohteena olivat sekä hukan mittaamiseen liittyvät menetelmät että mittauksen tulokset. Hukan vähentäminen oli Building 2030 – konsortion jäsenyritysten mielestä hedelmällinen lähtökohta tuottavuuden parantamiseen, koska kaikilla eri työläjeillä esiintyy hukattua aikaa samantyyppisistä syistä. Jos suunnittelun ja tuotannon ohjauksesta vastaavat tahot voivat ratkaista näitä juurisyitä, tuottavuus voi parantua kautta linjan useille työ- tai suunnittelulajeille. Jotta tähän päästäisiin, pitää ensinnäkin ymmärtää, mistä hukka aiheutuu, ja löytää tapoja mitata sitä reaaliaikaisesti.

Suunnittelussa hukan mittaamista ei juuri ole tutkittu yksittäisiä, suppeita tutkimuksia lukuun ottamatta. Suunnittelun hukan osalta tavoitteena oli ymmärtää tekijöitä, jotka vaikuttavat suunnittelun hukkaan ja aloittaa selvitys hukan mittaamisesta. Perustetun työryhmän rooli tässä oli merkittävä, koska aiempaa tutkimusta oli vähän. Työryhmässä käyty keskustelut johtivat useaan erilaiseen kokeiluun, jossa erityisesti suunnitelmarevisioiden analysointi ja tehtäväpohjaisten suunnittelunohjausjärjestelmien käyttö vaikuttavat hedelmällisiltä lähestymistavoilta.

Tuotannon hukan mittaamisen osalta lähtökohta oli selkeämpi, joten siinä tavoitteena oli päästä pidemmälle. Aiemmassa kirjallisuudessa on dokumentoitu työntutkimusta, jota haluttiin automatisoida kypäräkameroiden avulla. Hankkeessa haluttiin myös selvittää, voiko kulunvalvontadataa hyödyntää hukan mittaamiseen. Sisäpaikannusmittauksia päätettiin jatkaa ja laajentaa arvioiden tuloksia tehtävätasolla. Lisäksi selvitettiin, saadaanko hukasta käyttökelpoista tietoa kysymällä suoraan asentajilta heidän työnsä haasteista.

Erilaisia osatutkimuksia tehtiinkin runsaasti. Hankkeen tulosten pohjalta on valmistunut kolme diplomityötä tuotannon hukan mittaamiseen liittyen ja kolme diplomityötä suunnittelun hukkaan liittyen. Lisäksi Aallon tohtorikoulutettavat arvioivat hukkaa Länsimetron suunnitteluprosessissa ja sisäpaikannusmittauksin. Maisteriopiskelijoiden erikoistoina toteutettiin asentajien haastatteluita ja kulunvalvontadatan hyödyntämistä hukan mittaamisessa. Tässä loppuraportissa esitellään kukin osatutkimus erikseen ja sitten vedetään kaikki opittu yhteen ensin suunnittelun ja sitten tuotannon hukkaan liittyen.

2. Hukka suunnittelussa

2.1. Hukan tyypit suunnittelussa

Aiemmissa tutkimuksissa suunnittelun hukan on todettu olevan monimutkaisempi käsite kuin rakentamisen hukka (mm. Koskela & Huovila 1997, Formoso ym. 1998, Jørgensen & Emmitt 2008). Hukan tunnistaminen helpottuu, kun suunnitteluprosessia tarkastellaan tiedon virtauksen näkökulmasta. Tiedon virtauksessa suunnittelun vaiheet ovat tiedon siirtyminen, odottelu, suunnittelu ja tarkastus. Näistä ainoa arvoa tuottava vaihe on suunnittelu, muut vaiheet ovat puhdasta hukkaa. (Koskela & Huovila 1997) Hukkaa esiintyy myös suunnittelutyössä itsessään mm. uudelleensuunnitteluna sekä puutteellisilla lähtötiedoilla suoritettavana suunnitteluna (Koskela 2004).

Konielin (2019) diplomityössä tunnistettiin useita eri toteutussuunnittelun hukan tyyppejä, joista aiempaan tutkimukseen nähden uusia olivat liian tarkkojen suunnitelmien tuottaminen, tehottomat kokoukset, suunnitelmien puutteellinen tarkastaminen, liian aikainen suunnittelu, tarpeettomien suunnitelmien tuottaminen, lähtötiedon etsiminen sekä tuotannon puutteellinen hyödyntäminen suunnittelussa. Nämä hukat puolestaan johtivat suunnitelmapuutteisiin, -virheisiin, -muutoksiin ja -viiveisiin, jotka vaikuttivat suoraan hankintaan ja rakentamiseen. Taulukossa 1 on kuvattu Konielin (2019) case-hankkeestaan löytämät hukkatyypit.

Taulukko 1: Hukkatyypit suunnittelussa Konielin (2019) mukaan.

Hukkaryhmä	Hukkamuoto	Hukan aiheuttajat
Ylikäsittely	Ylisuunnittelu	Suunnitelmien puutteelliset tarkkuustasomääritykset
	Epäoleellisten asioiden käsittely kokouksissa	Kokouksia ohjaavat vahvasti pöytäkirjan vakioaiheet
	Kokousten pitäminen vailla keskeisiä osapuolia	Kokouskäytäntöjen päällekkäisyydet
Liikkuminen	Kokouksiin tarpeeton osallistuminen	Osallistujien tarvetta ei ole arvioitu todellisen tarpeen mukaan.
Puutteellisten tuotteiden tuottaminen	Suunnitelmien puutteellinen tarkastaminen	Suunnitelmien tarkastuksesta puuttuu työkalu ja tarkastusta ei huomioida aikataulutuksessa
	Suunnittelu puutteellisilla lähtötiedoilla tai päätöksillä	Prosessista puuttuu järjestelmällinen toimintatapa, jolla lähtötieto- ja päätöstarpeita tunnistettaisiin ajoissa sekä niiden toteutumista aikataulussa ohjattaisiin ja valvottaisiin. Kaikkia lähtötietotarpeita on mahdoton ennakoita
	Suunnittelu puutteellisilla menetelmillä tai työkaluilla	Aikataulupaineet
	Suunnittelu puutteellisilla suunnitelmatarvemäärityksillä	Puutteelliset suunnitelmatarvemääritykset johtuvat hankintojen epävarmuudesta sekä osapuolten ristiriitaisista näkemyksistä suunnitelmien tarkkuus- ja laajuustarpeista.
	Suunnitelmien puutteellinen yhteensovitus	Suunnittelun koordinointi liian isoilla tehtäväkokonaisuuksilla, yhteensovitusta ei ole huomioida aikataulutuksessa.
Ylituotanto	Liian aikainen suunnittelu	Puutteelliset suunnitelmatarvemääritykset, suunnitteluajataulun puutteellinen koordinointi, hankinta-ajataulun muutosten huomiointi suunnitteluajataulussa
	Tarpeettomien suunnitelmien tuottaminen	Osapuolten väliset tietokatkokset ja väärinymmärrykset, jotka johtuivat puutteellisista suunnitelmatarvemäärityksistä.
Odottelu	Lähtötiedon ja päätösten odottelu sekä suunnitelmaviiästytykset	Suunnittelun koordinointi liian isoilla tehtäväkokonaisuuksilla, tehtävien välisten riippuvuuksien puutteellinen tunnistaminen, prosessin sisältämä epävarmuus, puutteellinen suunnitteluajataulu.
Varastot	Tiedon etsiminen	Ylimääräisen tiedon varastointi projektipankkiin, suunnittelukokouspöytäkirjat, sähköpostitulva.
Kuljettaminen	Tiedon tarpeeton kuljettaminen	Sähköpostin käyttö pääasiallisena tiedonvaihtovälineenä kokousvälien aikana.
Työntekijöiden luovuuden käyttämättä jättäminen	Tuotannon puutteellinen hyödyntäminen	Tuotantoasiatuntijoiden sitominen hankkeeseen liian myöhään ja niiden puutteellinen integrointi suunnittelun ohjausprosessiin.

Suunnittelun hukan tyypeille tunnistettiin useita eri juurisyitä, jotka olivat kiteytettävissä kahteen pääteemaan: suunnittelun sisältämä epävarmuus ja puutteellinen suunnittelun ohjaus. Epävarmuudesta aiheutuvaa hukkaa havaittiin olevan haastavampi vähentää, sillä sen todettiin aiheutuvan pääosin suunnittelun monimuotoisesta luonteesta sekä ulkoisista epävarmuustekijöistä, kuten viranomaisista ja toimittajista. Puutteellisesta suunnittelunohjauksesta aiheutuvaa hukkaa todettiin olevan mahdollista vähentää suunnittelunohjausta kehittämällä. (Koniel 2019)

2.2. Suunnitteluprosessin stabiiliuden mittaaminen

Koniel (2019) esitteli hukkien luokittelun ja miten hukkaa voisi vähentää suunnitteluprosessissa mutta ei yrittänyt määrällisesti mitata hukkaa. Yksi tapa päästä hukan määrään kiinni voisi olla esimerkiksi tehtävien toteutumisen seuraaminen. Tohtorikoulutettava Eelon Lappalainen analysoi Länsimetron kakkosvaiheen suunnitteluprosessia tästä näkökulmasta.

Suunnitteluprosessin stabiiliuden mittausta tehtiin Länsimetron vaiheen 2 (Matinkylä-Kivenlahti-osuus) toteutusvaiheen rakennesuunnittelussa vuosien 2017-2018 välisenä aikana. Suunnitteluprosessissa oli mukana kymmeniä rakennesuunnittelijoita useista eri toimistoista. Suunnittelutehtäviin liittyvää dataa kerättiin viiden kvartaalin ajalta (Q2-Q4/2017 ja Q1-Q2/2018), pois lukien kesälomakausi vuonna 2017. Mukana mittauksessa olivat kaikki Länsimetron jatkeen viisi asemaa, Finnoo, Kaitaa, Soukka, Espoonlahti ja Kivenlahti sekä ratalinja. Jokaisella suunnittelukohteella oli oma suunnittelutiiminsä, jotka oli koottu kahdesta rakennesuunnitteluyritysten muodostamasta työyhteisliittymästä. Suunnittelutyötä laskutettiin tarkasteluvälillä n. 92,000 h (n. 6100h / kk) ja suunnittelutyön estimaatti oli tarkasteluvälillä n. 134.000h (n. 4800h/sprintti).

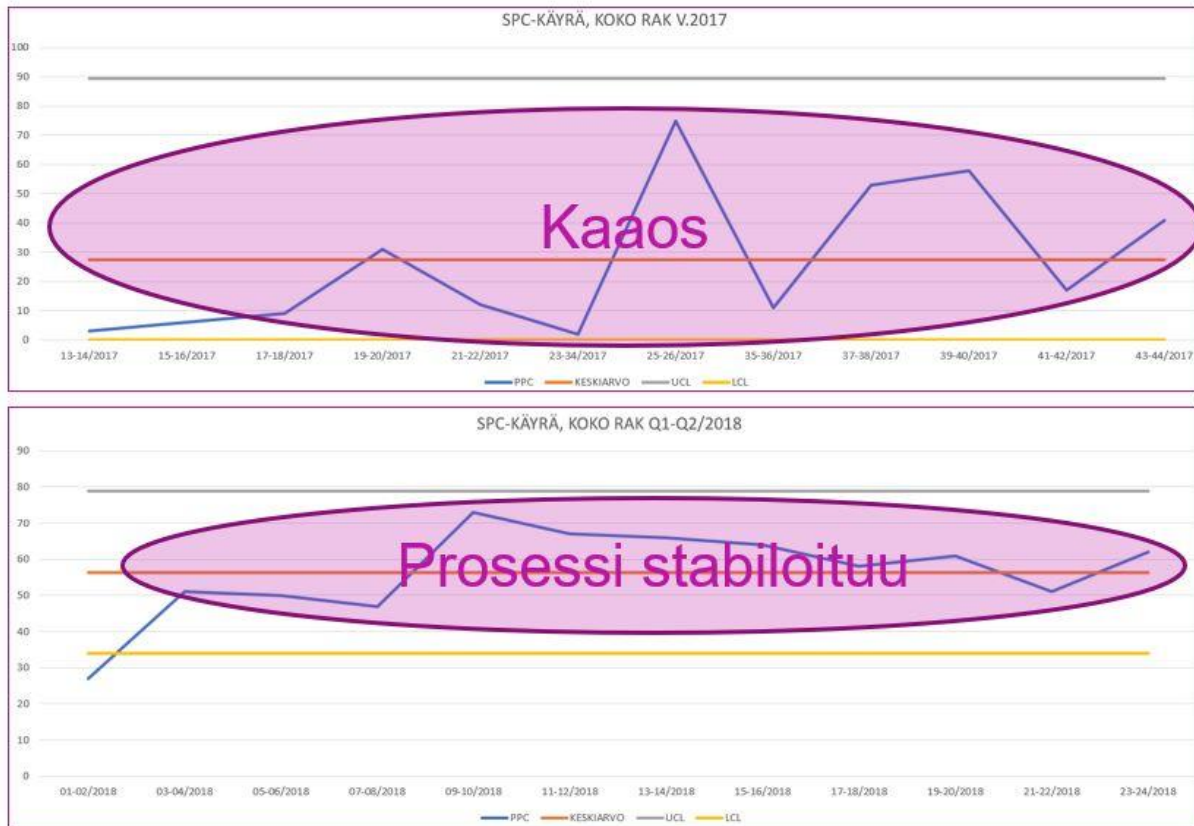
Mittauksessa käytettiin apuna ns. SCRUM-menetelmää, jossa suunnittelutyö pilkotaan pieniin tehtäviin ja suunnittelutiimi valitsee suunnittelutehtävät, jotka otetaan työn alle seuraavalla jaksolla. Näitä jaksoja kutsuttiin ”sprinteiksi” ja jaksojen pituudeksi valittiin kaksi viikkoa. Jakson pituus valittiin rakennesuunnittelutiimien vetäjien ja suunnittelunohjauksesta vastaavan välillä käydyn palaverin perusteella. Jaksot päättyivät ja alkoivat aina kahden viikon välein pidettävissä ”sprinttipalaverissa”, jotka pidettiin aina maanantai-iltapäivisin. Tässä sprinttipalaverissa käsiteltiin myös samalla juurisyitä tehtävien viivästymiseen tai estymiseen sekä käsiteltiin lisäksi lähitulevaisuuden resurssitarpeita. Menetelmä otettiin käyttöön luonnosvaiheen päättyessä ja toteutussuunnitteluvaiheen alkaessa, n. 1,5 vuotta ennen rakennusurakoiden käynnistymistä ja tavoitteeksi asetettiin Tehtävien Toteutumisprosentin (TTP, engl. PPC) nostaminen ennen rakentamisen aloittamista tasolle 90 %, jota voidaan pitää erinomaisena tasona. TTP mittaa kokonaan valmiiksi saatujen tehtävien osuutta kaikista tehtävistä. Se ei ole suora hukan mittari mutta huono TTP-luku voi olla hukan oire. Asemakohtaista TTP-lukua käytettiin myös ns. tilannekuvaraportoinnissa Länsimetron projektijohdolle. Sprinttipalaveria pidettiin kahden viikon välein ja laajempia koko rakennesuunnitteluryhmän retrospektiivejä pidettiin kaksi kertaa, vuoden 2017 ja vuoden 2018 osalta erikseen. Teknisenä alustana käytettiin JIRA-tehtävienhallintajärjestelmää. JIRA:aan tehtyjä suunnittelutehtäviä oli mittausvälillä n. 3000kpl.

Vuoden 2017 alussa uudenlaisen valvonta- ja palaverikäytännön omaksuminen vei aikaa, mutta syksyyn 2017 mennessä kaikki asemat olivat omaksuneet uuden käytännön. Suunnittelijoita kannustettiin viemään menetelmä alemmas organisaatiossa, suunnittelijatasolle asti. Tähän yritykset suhtautuivat

vaihtelevasti ja projektipäälliköiden halukkuus antaa suunnittelijoiden tehdä omia päätöksiä tai kirjauksia vaihteli yrityskohtaisesti. Retrospektiiveissä saatiin laajempi joukko suunnittelijoita mukaan keskustelemaan parannusehdotuksista järjestelmän käyttämisessä ja tilaisuuksissa jaettiin palautetta sekä pieniä palkintoja hyvästä suoritustasosta. Seurantajakson aikana havaittiin selkeästi se, miten projektipäälliköiden rohkeuden kasvaessa menetelmän käyttäjiksi alkoi siirtymään enenevässä määrin suunnittelijoita. Tämä paransi tilannekuvaa huomattavasti, koska aikaisemmin projektipäälliköillä ei ollut kaikkea tietoa mm. ongelmista tai esteistä, jotka hidastivat tai vaikeuttivat suunnittelutyötä. Esteiden nopeampi havaitseminen ja lähes reaaliaikainen liputus edisti niiden poistamista ja myös tilaaja sai aiempaa kuukausiraportointiin pohjautunutta käytäntöä nopeammin tiedon tilaajalta tarvittavista päätöksistä.

Yksinkertaisin mittari, jota käytettiin viikkotyöskentelyssä, oli ns. Burndown-kaavio, jonka avulla voidaan valvoa, eteneekö sprinttiin valittu suunnittelutyö suunnitelman mukaan. Burndown-kaaviota on erittäin helppo tulkita, mistä syystä sitä on helppo käyttää päivittäisjohtamisessa ja sprinttipalaverissa. Toinen mittari, jota käytettiin, oli JIRA:n sisäinen ennustetyökalu, jonka tiedot saadaan edeltävien sprinttien työsuorituksesta. Ennustetyökalu ottaa huomioon tilastollisen vaihtelun tehtävien valmistumisajoissa ja tekee jokaisen sprintin jälkeen todennäköisimmän, lyhimmän ja pisimmän mahdollisen ennusteen tehtävien valmistumisesta. Tätä ennustetyökalua ei käytetty viikkotyöskentelyssä vaan se oli pääosin suunnittelunohjauksen käytössä. Kolmas mittari, jota seurattiin, oli suunnittelutehtävien läpimenoajat, jotka saatiin JIRA:sta automaattisesti. Erityisesti läpimenoaikojen vaihtelu, joka oli varsinkin alussa todella suurta, paljasti samalla rakennesuunnitteluprosessin lähes kaoottisen tilanteen. Prosessin vaihtelu johtaa aina tavalla tai toisella myös hukkaan.

Kuten kuvasta 1 näkee, prosessin kaaosta saatiin kuitenkin vuoden 2018 aikana hallintaan ja rakennesuunnittelu alkoi muistuttaa numeroiden valossa prosessilta, jolla on ala- ja yläraja, jolloin rakennesuunnitteluun saatiin myös enemmän ennustettavuutta. Kuvassa on esitetty TTP-luvun käyttäytyminen ajan funktiona, ylemmässä osassa TTP-luku vaihtelee kaoottisesti mutta vakautuu vuoden 2018 aikana. Läpimenoaikojen vaihtelun seuranta oli myös suunnitteluohjauksen käytössä, eikä mittaria käytetty viikoittaisjohtamisen työkaluna. Neljäs mittari, jota käytettiin, oli TTP-luvun mittaushaavio. TTP-luvut saatiin jokaisen sprintin päätteeksi suoraan sprinttiraportista, joka oli jokaisen JIRA:aa käyttäneen suunnittelijan käytettävissä. TTP-luvut raportoitin myös osana tilannekuvaa Länsimetron johdolle jokaisen sprinttipalaverin päätteeksi. Tämän lisäksi TTP-luvut tallennettiin exceliin, jossa TTP-lukujen vaihtelua sekä trendiä asema- ja toimeksiantokohtaisesti voitiin seurata kaaviokuvana. Kaaviokuva käytiin läpi retrospektiiveissä ja sen perusteella laskettiin myös suunnittelutiimien palkitsemisperusteet.



Kuva 1. Länsimetron toteutusuunnitteluvaiheen rakennesuunnitteluprosessi (Lappalainen 2018.)

Rakennesuunnitteluprosessi oli vuoden 2017 aikana erittäin matalla 27 TTP-%:n tasolla vuoden vaihteessa, jolloin pidettiin myös ensimmäinen retrospektiivi laajemman suunnittelijaryhmän kanssa ja jossa suunnitteluprosessin taso esiteltiin suunnittelijoille. Suunnitteluprosessi stabiloitui v.2018 kesään mennessä keskimääräiselle tasolle 56 TTP-% ja asemakohtainen vaihtelu oli välillä 52...72 TTP-%:ia. Suunnitelmien läpimenoajan vaihtelu väheni myös koko seurantajakson ajan. Kun vertaa saatuja mittauksia ulkomailla saatuihin vastaaviin tuloksiin (esim. Ballard 1999), havaitaan, että rakennesuunnittelun TTP-% oli hankkeessa varsin alhaisella tasolla.

Tutkimuksen tulokset osoittavat kuitenkin, että suunnitteluprosessia voidaan parantaa uusilla menetelmillä, joissa pyritään aiempaa pienempään suunnittelutehtävien eräkokoon ja lyhempiin suunnittelutehtävien seurantajaksoihin sekä ongelmien nopeampaan esilletuontiin. Lyhempiin seurantajaksoihin siirtymiseen kannustaa se tosiseikka, että mittauksen perusteella rakennesuunnittelutehtävät valmistuivat keskimäärin n. 1-2 viikon sisällä ja olivat kooltaan keskimäärin n. 44h. Tämä osaltaan antaa vahvoja viitteitä siitä, että projektipäälliköiden sijasta rakennesuunnittelutyön varsinaisesti tekevät suunnittelijat osaavat osittaa työnsä oikein ja mitoittavat myös tehtävien työmääräarviot siten, ettei tehtävien työmääräarvioista tule liian suuria. Projektiryhmässä oli epäilyksiä juuri suunnittelijoiden kyvystä antaa työmääräarviot oikein, mutta tämän mittauksen ja havaintojen mukaan työmääräarvioissa ei ollut merkittäviä yliarviointeja tai tarpeettomia riskipuskureita. SCRUM-menetelmän edellyttämä tehtävien pilkkominen ja lyhyet sprintit osaltaan vähentävät tarpeettomien riskipuskureiden syntymistä.

Olennaisin havainto Länsimetron mittausdatasta oli suunnittelutehtävien läpimenoajan suuri vaihtelu. Vuoden 2017 ja 2018 välillä olennaisin ero oli juuri vuoden 2018 pienempi tehtävien läpimenoajan vaihtelu. Vuoden 2017 aikana rakennesuunnitelman keskimääräinen läpimenoaika oli 11,5 työpäivää ja pisin läpimenoaika oli 22 viikkoa. Vuoden 2018 aikana keskimääräinen läpimenoaika lyheni 6 työpäivään ja pisin läpimenoaika oli 18 viikkoa. Läpimenoajan lyhentymisen yhteydessä Länsimetron suunnittelussa havaittiin seurantajaksolla myös TTP-%:n nousu ja näitä kahta ilmiötä on tässä kirjoituksessa kutsuttu suunnitteluprosessin stabiloitumisena. Jatkotutkimuksen kannalta on mielenkiintoista, että rakennus- ja asennustyöhön liittyvässä tutkimuksessa on havaittu työn tuottavuuden ja TTP-%:n välinen yhteys, eli korkeampi TTP-% näyttäisi viittaavan työn parempaan tuottavuuteen (Ballard & Howell 1994; Ballard 2000; Bertelsen & Koskela 2002; Koskela, Ballard & Tanhuanpää 1997; Liu & Ballard 2008).

Suunnittelutyön tuottavuuden parantaminen liittyy suunnittelutoimistojen omaan liiketoimintaan, mutta tilaajan näkökulmasta suunnittelun tuottavuuden parantuminen ja läpimenoajan vaihtelun pieneneminen voi mahdollistaa sen, että projekteista on mahdollista vähentää sellaisia riskipuskureita, joita alalla tyypillisesti käytetään suunnittelu- ja rakentamisvaiheiden välissä. Suunnittelun läpimenoajan vaihtelun vähentyminen ja TTP-%:n kasvu mahdollistaa myös aiempaa paremmat lupaukset suunnitelmien toimittamisesta tuotannon tarpeisiin. Länsimetron jatkeen rakennesuunnittelussa tehty mittaustyö osoittaa, että rakennesuunnittelussa, kuten muussakin suunnittelussa, on jatkossa tutkittava sitä, miten suunnittelutehtävien läpimenoaikoja lyhentämällä ja suunnitelmapakettien eräkokoja pienentämällä voidaan tehostaa ja parantaa suunnitteluprosessin stabiiliutta sekä suunnittelutyön tuottavuutta.

Mittaus oli suppea, koska se koski vain rakennesuunnittelua. Jatkotutkimuksessa ehdotamme hypoteesia, että ottamalla kaikki suunnittelualat mukaan virtaustehokkaaseen suunnitteluprosessiin, on mahdollista nostaa suunnittelualan tuottavuutta, suunnitteluprosessin stabiiliutta ja parempaa läpivirtausta sekä poistaa rakennushankkeista tarpeettomia riskipuskureita suunnittelu- ja tuotantovaiheiden välistä. Tämän lisäksi on todettava tilaajaorganisaatioiden ja projektijohtopalveluita tuottavien yritysten merkittävä rooli aiempaa stabiilimman ja tuottavamman suunnitteluprosessin laajemmassa käyttöönottossa, jota tämä raportti toivottavasti osaltaan edistää.

Tutkimuksessa käytetyt mittarit mittaavat hukkaa epäsuorasti. Lean lähtee siitä, että vaihtelu johtaa hukkaan. Stabiili suunnitteluprosessi, jossa TTP on ennustetulla tasolla ja läpimenoaikojen vaihtelu on vähäistä, on hukaltaan pienempi kuin kaaottisesti käyttäytyvä prosessi, jossa läpimenoajat vaihtelevat suuresti viikosta ja tehtävästä toiseen. Voidaankin sanoa, että suunnitteluprosessin stabiiliuden mittarit mittaavat hukan oiretta. Itse hukan mittaamiseen tarvitaan suorempaa lähestymistapaa.

2.3. Hukan arviointi havainnointia ja ERP-tietoa hyödyntämällä (lyhennetty lähteestä Pikas, Koskela & Seppänen 2020)

Ergo Pikas (2019) pyrki väitöskirjansa osatutkimuksessa selvittämään suunnitteluprosessin toimivuutta kolmella menetelmällä: 1) kyselyillä 2) havainnoinnilla ja 3) ERP-järjestelmään perustuvalla tilastoanalyysillä. Kyselytutkimuksella selvitettiin eri suunnittelualojen kokemuksia suunnittelun ohjauksesta ja organisoinnista. Havainnoinnissa keskityttiin suunnitteluvaiheen havainnointiin kahdeksan viikon aikana kahtena päivänä viikossa dokumentoiden kaikki työtehtävät ja keskustelut päivien aikana. Lisäksi analysoitiin 3000 sähköpostia kahdesta hankkeesta. ERP:stä selvitettiin, kuinka onnistuneita hankkeet olivat, kuinka hyvin suunnitelma ja toteutuma vastasivat toisiaan, paljonko eri vaiheissa

käytettiin aikaa ja paljonko resursseja käytettiin ennen ja jälkeen sovittua sopimuksellista päättymispäivää. Osatutkimuksessa analysoitiin 28 hanketta, joille oli kirjattu yhteensä 13 421 tehtävää ja 51 357 tuntia.

Kyselytutkimuksen tulokset osoittivat, että suunnittelijoilla oli selkeä näkemys siitä, mitä asioita pitäisi parantaa. Vastaajat olivat sitä mieltä, että suunnitteluprojektit voitaisiin viedä läpi huomattavasti tehokkaammin. Päähaasteet tutkitussa organisaatiossa liittyivät huonoon koordinointiin, tiedon virtauksen epävarmuuteen ja tilaajan vastauksien viivästymiseen. Kokeneet suunnittelijat kokivat päähaasteina olevan tiedon ja viestinnän puute ja myöhäisessä vaiheessa tapahtuvat muutokset. Projektipäälliköiden päähaaste oli ajanpuute. Taloteknisten suunnittelijoiden päähaasteet liittyivät huonoon koordinaatioon suunnittelualojen välillä.

Havainnoinnissa keskityttiin työtehtäviin, etenemiseen ja ongelmiin, joista keskusteltiin eri palaverissa. 8 viikon havainnointijakson aikana tehtiin yhteensä 154 havaintoa suunnitteluprosessiin liittyvistä tapahtumista. Näiden havaintojen osuus oli noin 52 % kokonaistyöajasta havainnointijaksolla. Loppuaika oli suunnitteluprosessiin liittymätöntä tekemistä. Tapahtumat olivat joko suunnittelutehtäviä (57 %), tiedonvaihtoa (20 %) tai ongelman ratkaisua (23 %). 154 tapahtumasta, 20:een sisältyi useita suunnittelualoja: yhteen suunnittelutehtävään (n = 88, 1 %), yhdeksään tiedonvaihtotapahtumaan (n=31, 29 %) ja kymmeneen ongelmanratkaisutapahtumaan (n=35, 29 %). Kiinnostavaa oli yhteistoiminnallisen suunnittelun alhainen osuus, vaikka kaikki suunnittelualat olivat samassa yrityksessä. Arkkitehti ja talotekniikkasuunnittelija kävivät läpi alakattokorkoja ennen alakattojen suunnittelua, jotta varmistettaisiin, että talotekniikalle jäisi riittävästi tilaa. Kaikessa muussa suunnittelussa ratkaisun kehitti yksi suunnitteluala, ja koordinointi tapahtui jälkikäteen.

Suunnittelutehtävistä (n=88) vain 58 % oli todellista suunnittelua (laskelmia, mallinnusta, mallin koordinointia, spesifikaatioita, piirustuksia). Loppu ajasta oli muutoksia (28 %), odotusta (6 %), ohjaustoimintoja (5 %) ja muita toimintoja (3 %). Havainnoinnin perusteella arvoa lisäävä aika oli siis pieni. 52 % työajasta käytettiin suunnitteluprosessiin liittyviin tehtäviin mutta siitä vain 57 % oli suunnittelutehtäviä ja tästä 58 % todellista suunnittelua. Kertomalla yhteen prosentit voidaan arvioida, että arvoa lisäävä aika oli noin 17 %.

Suunnitteluprosessin ongelmia havaittiin 35 kappaletta; näistä 9 % liittyi arkkitehtisuunnitteluun, 20 % rakennesuunnitteluun, 43 % talotekniikkasuunnitteluun ja 29 % useampaan kuin yhteen suunnittelualaan. Suunnittelualan sisäiset ongelmat johtuivat tiedon puutteesta tai muuttuneista vaatimuksista. Suunnittelualojen väliset ongelmat liittyivät asiakastarpeiden ristiriitaisuuteen, huonoihin lähtötietoihin ja huonoon koordinointiin. Useat ongelmista (26 %) liittyivät ohjelmistoon. Esimerkiksi jotain ei voitu mallintaa ohjelmistossa tai suunnittelijalla ei ollut riittävää ohjelmisto-osaamista suunnittelutehtäväänsä.

Sähköposteja arvioitiin kahdessa suunnitteluprojektissa. Ensimmäisessä lähetettiin 935 sähköpostia, joista 40 %:a oli osoitettu projektipäällikölle suoraan ja 49 %:ssa projektipäällikkö oli yksi vastaanottajista. Toisen hankkeen osalta lähetettiin 1964 sähköpostia ja vastaavat osuudet olivat 37 % ja 44 %. Molemmissa hankkeissa projektipäällikkö käytti siis huomattavan osan ajastaan tiedonvälitykseen.

ERP-tietojen mukaan suunnittelutuntien toteutumassa suhteessa budjetoituun on suuria heittoja hankkeiden välillä. Vaikka tutkittu yritys alittikin koko analysoidussa hankemassassa (28 hanketta) budjetoidut tunnit yhdellä prosentilla (toteutuma: 50 051 h, budjetoitu 50 795 h), hankkeiden välillä oli suuria eroja ja vaihtelevuutta. Pääosa tunneista (51 %) käytettiin suunnittelun loppuvaiheessa, kun

tuotettiin piirustuksia ja paljon vähemmän alkuvaiheessa, kun pyritään löytämään hyviä suunnitteluratkaisuja asiakkaan arvon maksimoimiseksi.

ERP-analyysissa verrattiin taloudellisesti tuloksellisten ja tappiollisten suunnitteluhankkeiden ajankäyttöä. Tappiollisissa hankkeissa huomattavasti suurempi osa tunneista käytettiin alkuperäisen suunnitteluhankkeen jälkeen suunnitelmien korjaukseen (2 % tunneista tappiollisissa hankkeissa vs. 0,7 % tunneista voittoa tehneissä hankkeissa) ja korjauksiin hankkeen aikana (3,7 % tunneista tappiollisissa vs. 0 % voittoa tehneissä hankkeissa). Suunnitteluvirheiden määrä olikin tärkein projektin taloudellisen onnistumisen ennustaja.

Tehtävätasolla ERP:ssa oli jaettu tehtävät 14 kategoriaan. Päähuomio hukan kannalta oli, että hyvin vähän tunteja käytettiin suunnittelun johtamiseen. Suunnittelunohjauksen puute voi selittää muita löydöksiä eli suunnittelijoiden kokemuksia huonosta kommunikaatiosta ja ERP:stä tehdyt havainnot virheistä, jotka johtivat korjauksiin.

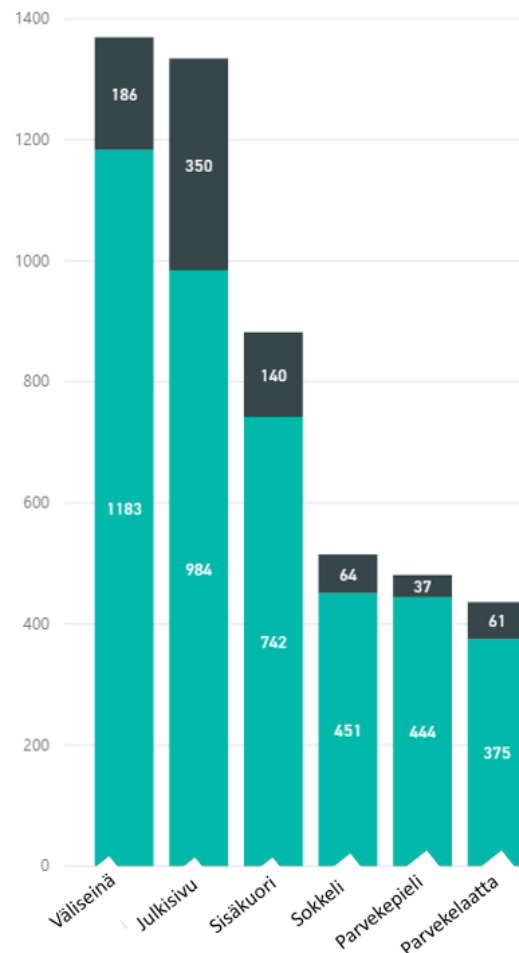
Havainnointi ja ERP-analyysi mahdollistavat suunnittelun arvoa tuottavan ajan arvioinnin. ERP ei ainakaan case-yrityksessä itsessään sisältänyt riittäviä tehtävätietoja hukan määrittämiseksi mutta tuntikirjauksien pohjalta voidaan arvioida esimerkiksi virheiden korjaukseen menevää aikaa ja ajan jakautumista suunnittelun vaiheittain. Suunnitteluprosessin epävarmuus ja tuntien budjetoinnin vaikeudet kävivät hyvin ilmi datasta. Havainnointi on aikaa vievää mutta sillä saa vastaavia tuloksia kuin tuotannon hukan mittaamisessa. Koska virheiden lukumäärä paljastui hyväksi mittariksi tuntimäärältään eniten budjettien ylittäneiden hankkeiden paljastamiseksi, revisioiden arviointi voisi olla hyvä lähtökohta hukan mittaamisessa.

2.4. Revisioiden hyödyntäminen suunnittelun hukan mittaamisessa

Aleksi Aallon (2020) diplomityössä pyrittiin muodostamaan ja testaamaan mittausmenetelmää yhden hukan muodon, uudelleentekemisen mittaamiseksi. Kehitettävän mittarin tavoitteena oli erottaa, missä elementtiluokissa suunnittelutoimistolla on eniten uudelleentekemisestä johtuvaa hukkaa. Tutkimuksessa samalla syvennyttiin erityisesti elementtiluokkaan, jossa hukkaa havaittiin olevan korostuneen paljon ja tutkittiin revisioiden tyyppejä ja arvioitiin niitä juurisyyden löytämiseksi ja korjaavien toimenpiteiden aloittamiseksi. Aineistona tutkimuksessa käytettiin A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n Tampereen toimiston yhden suunnitteluyksikön elementtisuunnittelukohteita vuodesta 2016 vuoteen 2019. Projekteja oli yhteensä 27 ja suunniteltuja asuinkerrostaloja 37. Suunnitelmia näihin kohteisiin oli tehty 13 500 ja elementtejä 17 700. (Aalto 2020)

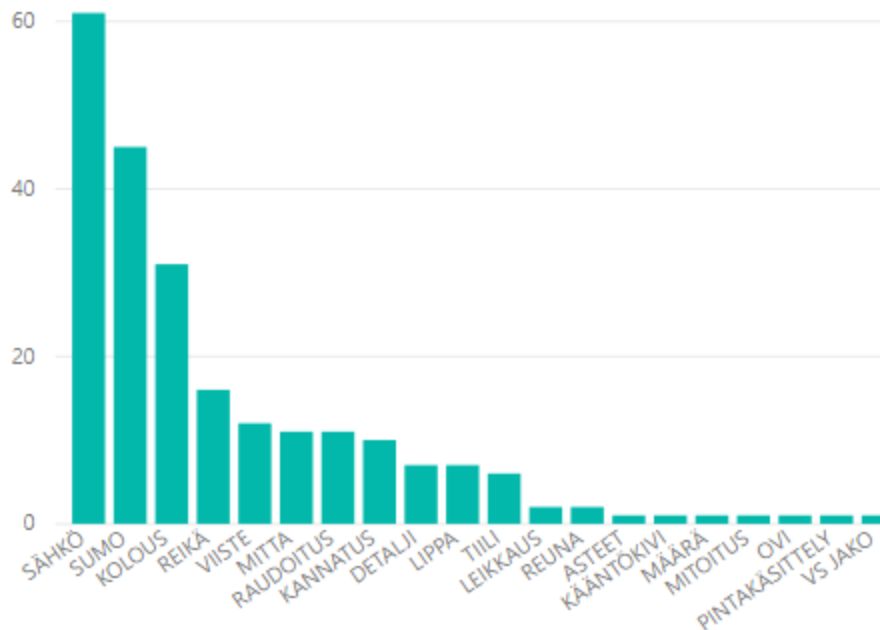
Tutkimuksessa havaittiin, että nykykäytännön mukaisessa prosessissa suunnittelun sivutuotteena syntyy informaatiota, jota ei aikaisemmin ole hyödynnetty täysimääräisesti. Syntyvää informaatiota voidaan kohtuullisin käsittelymenetelmin järjestää tiedoksi, jota voidaan verrata elementtiluokittain ja ajallisesti ja saatua tietoa voidaan hyödyntää hukan mittaamisessa. Informaatio kerättiin elementtiluetteloista, joista poimittiin elementtisuunnitelmittain elementtiluokka kohde ja revisiomäärä. Johtuen elementtiluokkien kirjavasta nimeämiskäytännöstä projektien tarpeiden mukaan, osa elementeistä luokiteltiin erikseen käsityönä elementtiluokan ja elementtiluettelosta löytyvän muun tiedon kuten paksuuden, rakennekerrosten ja pintamateriaalin mukaan aineiston kvantitatiivisen käsittelyn mahdollistamiseksi. (Aalto 2020)

Aineistoa käsiteltäessä havaittiin merkittäviä eroja revisioiden määrässä eri elementtiluokkien välillä ja revisioiden määrän muutoksia eri ajanjaksoina. Julkisivuelementeissä, jotka sisälsivät betonisen sisäkuoren, eristekerroksen ja betonisen ulkokuoren tai rappauslevyn, havaittiin suhteessa eniten revisioita. Kyseisiä elementtejä oli myös määrällisesti suuri osa tehdyistä suunnitelmista. Yleisimmät elementtiluokat ja niiden revisiot on esitetty kuvassa 2. Kuvaan on rajattu aineisto vuosilta 2018 ja 2019 (26.6.2019 asti). Mustalla on merkitty vähintään kerran revisioitujen elementtien osuus. (Aalto 2020)



Kuva 2. Kuusi yleisintä elementtiluokkaa ja revisioiden osuus case-yrityksessä (Aalto 2020)

Prosessin sivutuotteena syntyy informaatiota myös revisioiden syistä, joista julkisivuelementtien osalta tarkemmin analysoimalla havaittiin säännönmukaisia ongelmakohteita, joita ratkaisemalla voidaan merkittävästi pienentää suunnittelun hukkaa. Esimerkkinä on esitetty revisioiden aiheiden jakauma julkisivuelementtisuunnitelmissa vuonna 2019 (kuva 3). Säännönmukaiset ongelmakohteet koskivat erityisesti sähköosien sijoittelua, raudoitustarvikkeita parvekkeiden liitoskohdissa ja tiettyjen raudoitustuotteiden käyttöä. (Aalto 2020)



Kuva 3. Revisiotiedoista havaitut yleisimmät julkisivuelementtien revisioaiheet (Aalto 2020)

Revisioita voi Aallon (2020) diplomityön perusteella hyödyntää suoraan uudelleentekemisen hukan arviointiin. Hukan arviointi revisioiden pohjalta edellyttää, että suunnitteluprosessissa on systemaattisesti kirjattu erityyppiset suunnitelmat sekä revisioiden syyt. Erityisesti elementtisuunnittelussa revisioihin liittyy aina hukkaa eli tehty suunnitelma ei jostain syystä vastannut vaatimuksia. Muiden suunnittelualojen osalta revisiot antanevat myös suuntaa-antavia tuloksia suunnitteluprosessin tehokkuudesta mutta haasteena on se, että revisiot voivat liittyä myös tilaajan tarpeen täsmentymiseen ja voivat olla siten myös arvoa lisääviä. Muissa suunnittelutyypeissä onkin syytä jaotella arvoa lisäävät ja hukkaa olevat revisiot. Jatkotutkimuksessa pitäisikin syventyä muihin suunnittelualoihin ja mitä revisioiden perusteella voi sanoa projektin suunnittelun hukasta kokonaisuutena.

2.6. Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet

Suunnittelun hukkaa arvioitiin hankkeen aikana useilla eri menetelmillä. Suunnitteluprosessin vakautta arvioitiin hyödyntämällä tehtäväpohjaista suunnittelujärjestelmää JIRA:a ja Last Plannerin tunnuslukuja. Kyselyillä ja haastatteluilla selvitettiin monessa osatutkimuksessa hukan tyyppejä ja syitä. Hukkaa yritettiin löytää havainnoimalla ja tutkimalla ERP-järjestelmän tietoja. Lisäksi arvioitiin revisioita.

Havainnoinnilla päästiin ehkä näistä menetelmistä tarkimpaan arvioon suunnitteluprosessin hukasta. Menetelmä on varsin työläs. Havainnoitsija luokittelee havaitsemansa tehtävät ja arvoa lisäävä aika voidaan arvioida sitä kautta. Tämä vastaa käsitteellisesti työn tutkimusta, jota on tehty jo pitkään tuotannossa. Menetelmää voisi käyttää useammassa hankkeessa esimerkiksi diplomitöiden muodossa, jolloin muodostuisi parempi kuva tekijöistä, jotka vaikuttavat hukkaan suunnittelussa. Lisäksi olisi hyvä havainnoimalla testata esimerkiksi lean-suunnittelun toimivuutta hukan vähentämisessä. Jatkossa voisi ajatella, että esimerkiksi suunnitteluohjelmistot osaisivat automaattisesti tunnistaa, milloin käyttäjä tekee suunnittelutyötä ja tallentaa lokitietoja arvoa lisäävästä ajasta. Arvoa lisäävät tehtävät ovat kuitenkin

erilaisia riippuen suunnittelun vaiheesta ja esimerkiksi yhteistoiminnallista suunnittelua ei välttämättä saisi tällä tavalla automaattisesti havaittua.

Tehtäväpohjaisten digitaalisten järjestelmien dataa analysoimalla voi arvioida suunnittelun vakautta, minkä voisi ajatella korreloivan myös hukan kanssa. Tämä analyysi voidaan tehdä varsin automaattisesti, jos tehtävät jaetaan riittävän pieniin osiin ja niiden onnistumista tarkkaillaan viikkotasolla Last Plannerin TTP-mittarilla. Analyysiä on toistaiseksi tehty lähinnä Länsimetro -hankkeessa mutta työtä olisi syytä jatkaa esimerkiksi diplomitöinä muissa projekteissa.

Suurimmat edellytykset hukan automatisoituun mittaukseen liittyvät revisioiden analyysiin. ERP-datasta havaittiin suurimpien tuntiylityksien johtuvan nimenomaan virheiden korjauksesta, mikä usein liittyy revisioihin. Revisioiden syitä luokittelemalla pääsee käsiksi myös tarvittaviin toimenpiteisiin. Jatkotutkimuksessa olisi syytä arvioida myös revisioiden jakautumista ajallisesti, koska erityisesti myöhäiset revisiot näyttäivät korreloivan projektien taloudellisen kannattavuuden kanssa.

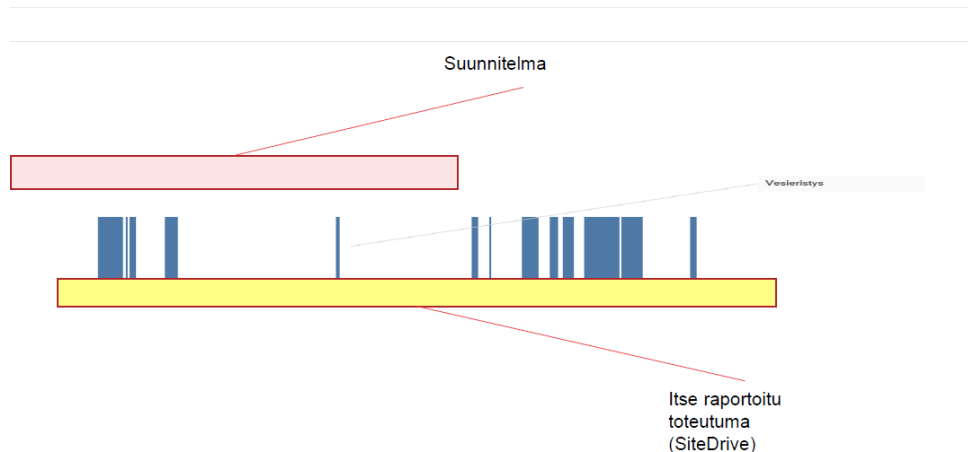
Kokonaisuutena hukan mittaamisessa suunnittelussa päästiin siis hankkeessa hyvään alkuun. Koska hankkeessa pyrittiin kokeilemaan useita eri menetelmiä, emme saaneet paljoa dataa mistään yksittäisestä menetelmästä. Jatkotutkimuksessa tarvitaankin lisää mittaustuloksia ja syy- ja seuraussuhteiden määrittämistä.

3. Hukka tuotannossa

3.1. Sisäpaikannuksen hyödyntäminen hukan mittaamisessa

Ennen hankkeen alkua Aalto-yliopisto oli kehittänyt sisäpaikannukseen iCONS -järjestelmän, jolla tehtiin Business Finlandin rahoittamassa hankkeessa useita mittauksia case-kohteissa Suomessa ja kansainvälisesti (Seppänen et al. 2019). Hankkeessa havaittiin merkittäviä määriä hukkaa, mikä näkyi työntekijöiden liikkeenä työkohteesta toiseen. Yhtenä johtopäätöksenä määritettiin rakennushankkeelle hukan mittariksi häiriöttömän läsnäolon osuus. Työntekijä on häiriöttä työkohteessa, kun hän viettää samassa työkohteessa yli kymmenen minuuttia poistumatta välillä työkohteesta. iCONS -hankkeessa mitatuissa suomalaisissa case-hankkeissa todettiin häiriöttömän ajan olleen 25 % (toimistosaneeraus), 36 % (asuntokohde) ja 30 % (putkiremontti), mikä vastaa aika hyvin muissa hukkaan liittyvissä tutkimuksissa arvoa lisäävän ajan osuutta (Zhao et al. 2019). Samalla menetelmällä Jarmo Romo tutki diplomityössään häiriötöntä tuotantoa asuntohankkeessa. Riippuen työntekijästä häiriötön työaika vaihteli 39 % ja 67 % välillä mutta haastateltaessa mitattuja henkilöitä, he arvioivat, että aikaa meni keskimäärin hukkaan päivässä vain 30 minuuttia (7 %) (Romo 2018). Kuten aiemmissakin tutkimuksissa on todettu, työntekijät eivät ymmärtäneet hukkaa ilmiönä, vaan kokivat hukkaa aiheuttavien työvaiheiden olevan osa heidän työtään.

Tässä hankkeessa sisäpaikannustutkimusta jatkettiin ja syvennettiin tehtävätasolle käyttäen case-hankkeena putkiremonttia. Sisäpaikannuksen lisäksi työntekijät käyttivät SiteDrive -sovellusta, josta saatiin tehtävien aloitus- ja lopetusajat. Häiriötöntä läsnäoloa arvioitiin tehtävien suoritusajana. Kuvassa 4 on esitetty esimerkki vesieristystehtävästä. Vaaleanpunainen palkki on suunniteltu, keltainen palkki on SiteDriveen työntekijän syöttämä ja siniset pystypalkit ovat häiriöttömiä läsnäoloja työkohteessa. Kokonaiskeston sisään mahtuu lukuisia poissaoloja, jotka eivät selity lakisääteisillä tauoilla (tauot on poistettu kuvasta). Kuvan 4 häiriötön läsnäolo alku- ja loppuhetken välillä on 41 %.



Kuva 4: suunnitelma (vaaleanpunainen) vs. SiteDriven toteutuma (keltainen) vs. Häiriötön läsnäolo (sininen)

Häiriöttömät läsnäolot tehtävän alun ja lopun välillä vaihtelivat merkittävästi tehtävittäin ja kerroksittain. Esimerkiksi vesieristysten läsnäoloindeksi (Presence Index, PI) vaihteli välillä 26 % ja 41 % riippuen työkohteesta ja oli keskimäärin 34 %. Alhaisimmat läsnäoloindeksit olivat kuilujen muurauksella (8-28 %, keskiarvo 21 %) ja korkeimmat pintalattioiden valuilla ja valmisteluilla (26-64 %, keskiarvo 50 %) ja kuilujen kipsilevytyksellä (keittiön puolella, 46-91 %, keskiarvo 65 %). Suurin osa tehtävistä oli keskiarvoltaan 30 % tuntumassa. Läsnäoloindeksin lisäksi olennaista on suhteuttaa läsnäolo tehtävän pituuteen (Presence-to-Plan ratio, PP). Läsnäolominuutit jaettuna tehtävän kestolla kertoo, paljonko läsnäoloa vaaditaan, jotta tehtävä saadaan aikataulussa tehtyä. Tällä voidaan mitata sitä, kuinka paljon tehtävän keston sisältyy ”hukkavaraukseen”. PP kertoo, paljonko tehtävien kestoissa on todellisuudessa puskuria, joka voidaan poistaa, jos prosessia saadaan tehostettua. Mitatussa hankkeessa PP:t vaihtelivat 10 % (alakaton maalaus) ja 57 % (kuilun levytys ja keittiöasennus) välillä. Keskimäärin ne olivat 34 %. (Zhao ym. arvioitavana).

Sisäpaikannus on skaalautuva tapa jatkuvaan hukan mittaamiseen. Jos kaikki työntekijät kantaisivat sisäpaikannuslaitteistoa (esim. korkean rakentamisen kohteet), työnjohto voisi reaaliajassa mitata työn tuottavuutta ja myös arvioida jatkuvasti digitaalisten työkalujen ja prosessiparannusten vaikutusta hukattuun aikaan. Yhdistämällä sisäpaikannuksen tehtäväseurantaan voidaan arvioida hukkaa tehtävätasolla, mikä auttaa kohdistamaan työnjohdon ajan tehtäviin, joissa on eniten hukkaa. Mittaukset osoittivat myös, että häiriöitä on 2/3 tehtävien kestoista eli erityisesti sisävalmistusvaiheessa tehtävien kestoja voi huomattavasti kiristää, jos hukkaa saadaan poistettua.

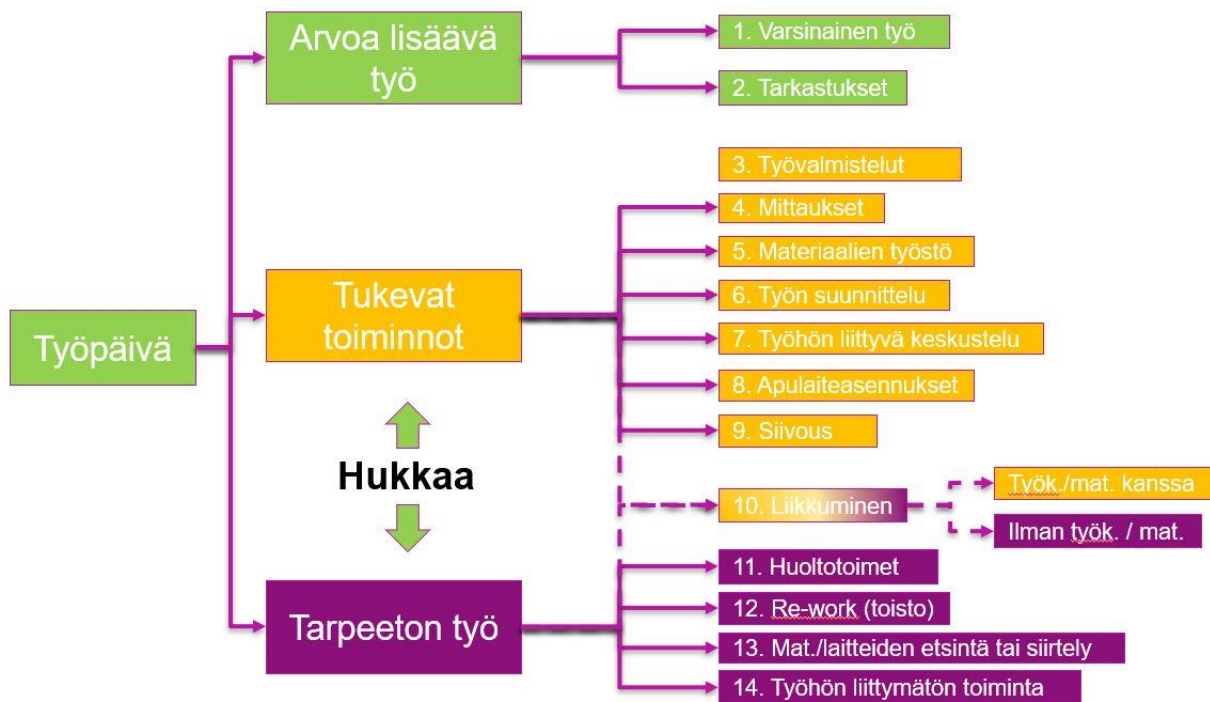
3.2. Hukan mittaaminen kypäräkameroilla

Hans Pasila (2019) tutki diplomityössään hukan mittaamista kypäräkameroiden avulla. Kypäräkamerat oli kiinnitetty lisäakuineen kahden työntekijän kypärään ja niiden avulla kuvattiin työntekijöiden toimintaa ja keskusteluja työpäivien aikana. Tutkimus koostui kolmesta peräkkäisestä vaiheesta, joista ensimmäinen ja kolmas vaihe sisälsi videokuvausta sekä niiden välinen toinen vaihe toiminnan tehostamiseen suunnatun intervention. Kuvauksien ensimmäisessä vaiheessa lokakuussa 2018 oli tavoitteena tunnistaa hukan eri muotoja ja selvittää niiden syitä videomateriaalin ja keskustelujen avulla. Tähän tietoon

perustuen suunniteltiin tapoja vähentää havaittuja hukkia. Kehitystoimenpiteitä arvioitiin toisella kuvausjaksolla tammikuussa 2019. Kuvausjaksolla pyrittiin selvittämään tehtyjen muutosten hyöty hukan vähentämisessä.

Tutkimuksessa tutkittiin asuinrakennustyömaalla suoritettavaa kipsialakatto- ja kipsilevyväliseinätyötä, johon ei sisältynyt mitään normaalista rakentamisesta poikkeavaa. Työmaa, jolla tutkimus suoritettiin, oli siisti ja järjestyksessä. Työmaan vastaava työnjohtaja oli erittäin kokenut, joskin tutkittavaa työvaihetta johtanut työnjohtaja oli jokseenkin kokematon. Työvaiheen suorittajat olivat kokeneita ammattimiehiä, joilla oli jo useamman vuoden kokemus kyseisen työvaiheen suorittamisesta.

Videoilta kerätty data jaettiin aiempia malleja (mm. Womack and Jones 1996, Lee et al 1999, Zhao and Chua 2003, Jenkins & Orth 2003, Kalsaas 2010, Kalsaas 2013) hyödyntäen kolmeen pääryhmään, jotka edelleen jaettiin neljääntoista eri osa-alueeseen, jotka nimettiin mahdollisimman tarkasti sisällön mukaan. Kuvassa 5 on esitetty tutkimuksessa käytetty jaottelu, johon kaikki tutkittu työ jaettiin. Tarkemmalla jaottelulla pyrittiin tarkentamaan kerätyn datan sisältöä, jotta sitä olisi mahdollista hyödyntää tehokkaammin. Tarkempi jaottelu myös osoittaa selkeämmin eri osa-alueiden sisältämän ajan toisiinsa nähden.



Kuva 5. Videolta kerätyn datan jako. (Pasila 2019)

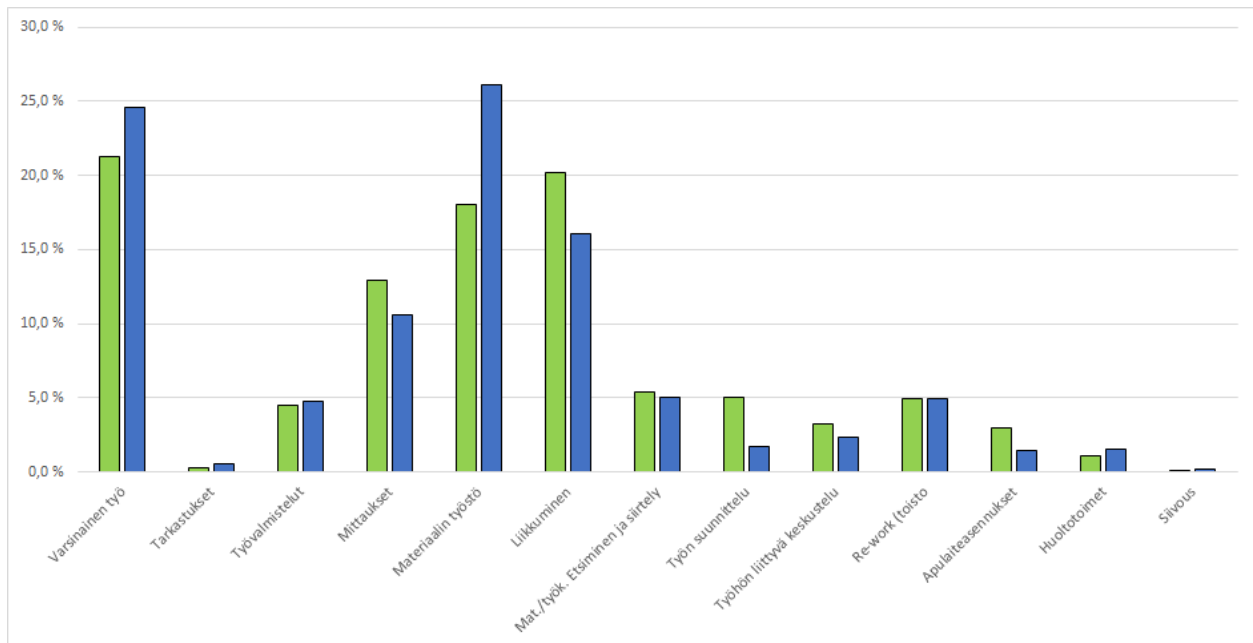
Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvästi suurimmaksi ajankäytön kohteeksi osoittautui työntekijöiden liikkuminen, joka oli noin viidesosa työpäivän aktiivisesta ajasta. Syitä suureen liikkumismäärään oli videomateriaalin perusteella useita; materiaalit oli varastoitu kerroksessa yksittäiseen paikkaan materiaalityypeittäin, työkalut oli varastoitu omaan huoneeseen ja materiaalien työstö tapahtui omassa tilassaan. Materiaalien määrän laskelmavirheet myös olivat aiheuttaneet sen, että työntekijät joutuivat hakemaan puuttuvia materiaaleja ajoittain ulkoa. Lisäksi työkaluja tai tarvikkeita etsittiin, koska työpari oli niitä mahdollisesti siirrellyt.

Tutkimuksen interventiovaiheessa pyrittiin tuottamaan työntekijöille paremmat ja helpommat lähtökohdat työn suorittamiseen tulevilla työalueilla mutta myös samaan aikaan luomaan tilanne, jossa työnjohdon olisi helpompi avustaa työn etenemisessä sekä mahdollistaa paremmat olosuhteet työvaiheen etenemisen seurantaan ja tulevien työvaiheiden suunnitteluun. Interventiossa tuotettiin tunnistettujen ongelmien korjaaviksi toimenpiteiksi ratkaisuja, joilla tunnistetut hukat joko poistuivat tai pienenivät merkittävästi. Ratkaisuja ja toimia tuotettiin tehtäväksi molemmille osapuolille; sekä työnjohdolle että työn tekijöille, jotta työn tuottavuutta saataisiin tehokkaasti nostettua yhteisellä toiminnalla.

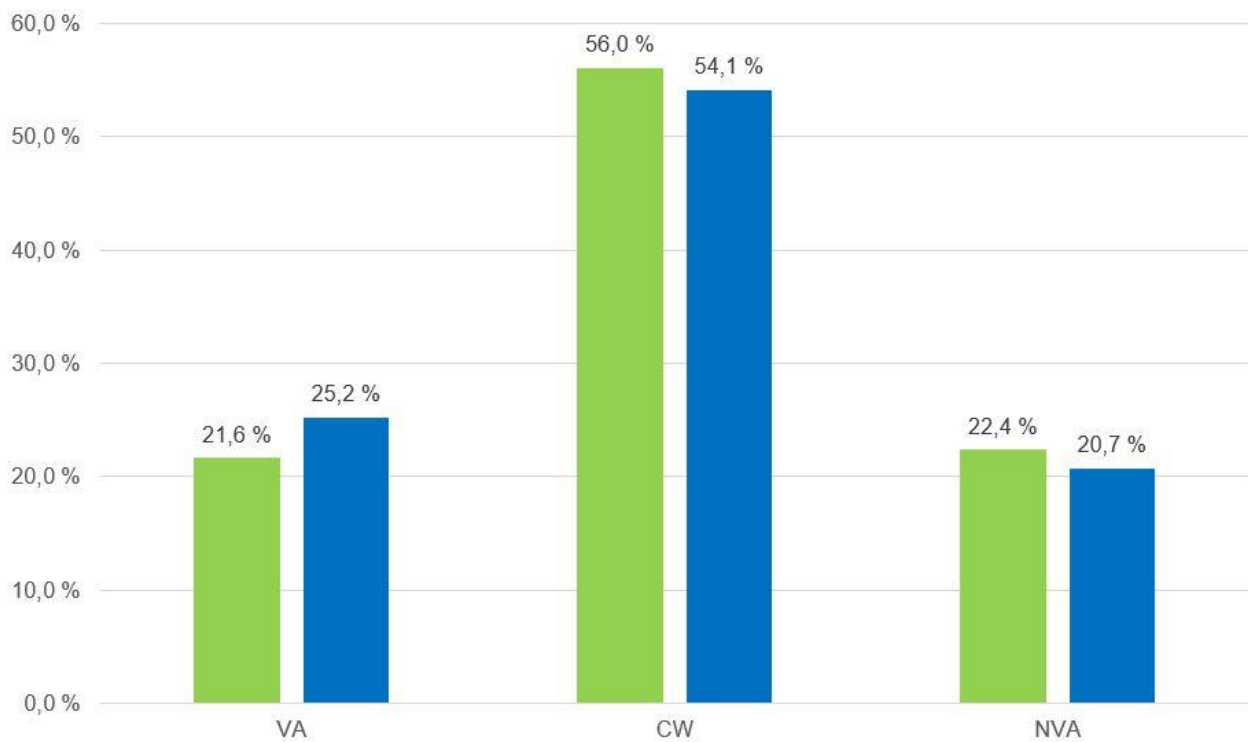
Tehtävät jaettiin työnjohdon sekä työntekijöiden kesken ja koko työvaiheen uusi toimintamalli käytiin vielä erikseen läpi yhdessä. Työnjohdon tuli laskea tarvittavat materiaalit määrineen jokaiseen tilaan erikseen tutkittavan työvaiheen osalta, jotta materiaalia oli mahdollista haalata sopivissa määrin työstettäviin tiloihin. Työnjohdon tuli myös hankkia työntekijöille työkalujen siirtoon ja säilytykseen tarkoitetut kassit, jotta molemmat työntekijät saisivat oman paikan tavaroilleen eikä mitään tarvitsisi enää etsiä. Lisäksi oli avattava informaatiokanava työnjohdon ja työntekijöiden välille, jotta mahdolliset ongelmat, kysymykset tai tarpeet olisi mahdollista hoitaa heti niiden ilmetessä. Työnjohdon tuli myös pitää huoli, että jokaisessa työstettävässä tilassa olisi käytettävissä tarvittavat suunnitelmat, joista työntekijät saisivat työtään varten tarpeelliset tiedot.

Työntekijöiden vastuulle puolestaan jäi pitää huoli tarvittavien kiinnikkeiden ja muiden tarvikkeiden pysymisestä mukana sekä pitää huoli omien työkalujen ja varusteiden tallessa pysymisestä. Työntekijöiden tuli myös pitää huoli työnjohdon tarpeellisesta informoinnista työn edetessä. Toistuvan työn ja alueelle turhan paluun välttämiseksi työntekijöille annettiin työvaiheen aloituspalaverissa jo läpikäytyt laatuvaatimukset selvästi listatussa muodossa, jotta he voisivat tarkastaa oman, valmiin työnsä ennen valmiuden ilmoittamista työnjohdolle, joka puolestaan hoiti lopulliset tarkastukset valmistuneesta työstä. Työntekijöiden kanssa käytiin myös läpi työstettävien rakenteiden periaatteita, joilla pyrittiin poistamaan turhien tai ylimääräisten rakenteiden tekemistä.

Edellä mainituilla muutoksilla onnistuttiin poistamaan turhan liikkeen synnyttämää hukkaa, joka lopulta väheni noin viidesosalla. Alla olevassa kuvassa 6 on esitetty tutkitun ajan jakautuminen eri osa-alueisiin ensimmäisessä ja toisessa kuvausvaiheessa. Kuvassa 7 on esitetty kolmen pääryhmän (arvoa lisäävä = “value-adding, VA”, avustavat toimet = “contributory work, CW” ja arvoa lisäämätön työ = “non-value-adding, NVA”) sisältö tutkimuksen ensimmäisen ja toisen kuvausvaiheen osalta.



Kuva 6. Tutkitun ajan jakautuminen ensimmäisen ja toisen kuvausosuuden osalta. (Pasila 2019)



Kuva 7. Ajan jakautuminen kolmen pääryhmän osalta. (Pasila 2019)

Kuvassa 6 on nähtävissä arvoa lisäävän työn lisääntymisen lisäksi lisääystä myös materiaalien työstön osuuden osalta, mikä on täysin perusteltavissa lisääntyneen työn aiheuttaman materiaaliarpeen vuoksi. Tämän avustavan työn osuutta olisi mahdollista pienentää esivalmistetuilla kipsilevyillä tai rankamateriaaleilla, mutta kyseisen parannuksen tutkinta oli diplomityössä tehdyn tutkimuksen ulkopuolella.

Tutkimus osoitti, että työmaalla on mahdollista toteuttaa melko yksinkertaisia toimia, joilla on mahdollista poistaa tai huomattavasti pienentää syntyvää hukkaa. Toimet vaativat työnjohdolta ennakkosuunnittelua ennen työvaiheen alkua ja erilaisia kohdekohtaisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi työmaan logistiikan suunnittelu, jotta työvaiheen aloitus-, ylläpito- ja lopetusedellytykset täyttyvät mahdollisimman tehokkaalla tavalla. Työntekijöiden tulee myös osallistua mahdollisimman paljon työvaiheen suunnitteluun. Suunnittelun lisäksi heidän tulee olla myös aktiivisia työvaiheen aikana, jotta työnjohtajalla on mahdollisimman hyvä tilannekuva työn etenemisestä sekä sen tasaisen etenemisen vaatimuksista.

Hukan mittaamisen osalta diplomityö osoitti, että kypäräkameraita voidaan hyödyntää työn tutkimuksessa. Kuvattavat unohtivat nopeasti kypäräkameran mukanaolon ja työskentelivät luontevasti. Videoiden läpikäynti ja ajan jaottelu eri kategorioihin on menetelmässä työlästä mutta saatu data auttaa hukan mittaamisen lisäksi myös kehittämään prosessia. Kypäräkameraita ei voi suositella jatkuvaan käyttöön hukan mittaamisessa mutta esimerkiksi uusien prosessien vaikutus työntekijätasolla on mahdollista menetelmällä todeta. Suosittelemme jatkotutkimuksia esimerkiksi diplomitöinä eri työläjeille ja erityisesti hankkeissa, joissa on jo käytössä jotain leanin työkaluja, jotta voidaan arvioida, mikä on niiden vaikutus hukattuun aikaan.

3.3. Hukan mittaaminen mestakameroilla

Kypäräkamerat mittaavat erityisesti työntekijän työhön liittyvää hukkaa. Sen sijaan mestakameroilla voidaan selvittää hukattua aikaa työkohteessa. Hukattu aika työkohteessa on mielenkiintoista erityisesti tahtituotannon näkökulmasta, koska tahtituotannon pitäisi teoriassa vähentää aikaa, jolloin työkohteessa ei tehdä työtä. Tutkimushankkeeseen liitettiinkin kaksi diplomityötä (Salerto 2019; Ruohomäki 2020). Toisessa selvitettiin työkohteen tapahtumia isommalla tahtialueella ja pidemmällä viikon tahtiajalla (Salerto 2019) ja toisessa perehdyttiin pieniin tahtialueisiin päivän tahtiajalla (Ruohomäki 2020).

Saara Salerton (2019) Skanskan toimeksiannosta tehdyssä diplomityössä tutkittiin hukkaa tahtituotannossa Helsingin Kaupunkiympäristötalon työmaalla. Kahdesta käytävästä koostuvan tahtialueen tapahtumia tutkittiin kuvaamalla niitä kuuden viikon ajan. Molempien käytävien toiseen päätyyn asennettiin videokamera kuvaamaan jatkuvana kaikki käytävän tapahtumat. Analysoitavaa videota saatiin yhteensä 649 tuntia. Videoista analysoitiin käytävän käyttöastetta, työnteon keskeyttäviä häiriöitä sekä tuottavan työn määrät tahtialueella. Videosta voitiin analysoida vain tuottavaa työtä, koska osa valmistelevista työvaiheista tehtiin tahtialueen ja siten kameran kuvan ulkopuolella.

Videoanalyysistä havaittiin, että tahtialueen käyttöaste oli alhainen ja siten tyhjän tilan hukan määrä suuri. Matalaa käyttöastetta aiheuttivat tahtiaikatauluun paikoin jätetyt liian suuret aikapuskurit, työryhmien samanaikainen työskentely useammalla tahtialueella sekä tahtialueen suuri koko. Tahtiaikatauluun jätetyt suuret aikapuskurit aiheuttivat sen, että käytävät olivat tyhjiä suuren osan ajasta. Käytävä 1 oli tyhjä 47 % ja käytävä 2 26 % päivistä, kun jätetään huomiotta päivät, jolloin tahtialueella työskenneltiin alle 10 minuuttia. Tämän lisäksi sama työryhmä työskenteli useammalla tahtialueella

samanaikaisesti, jolloin tahtialue jäi päivän aikana tyhjäksi. Tahtialue oli suuri, sillä se koostui yhteensä 68 metristä käytävää. Kun kolme neljästä tutkitusta työvaiheesta tehtiin yhden työntekijän voimin, oli käytävistä suuri osa tyhjänä myös työskentelyn aikana. Tyhjän tilan hukka oli diplomityössä havaituista hukan tyypeistä suurin ja kriittisin, koska tahtituotannon tavoitteena on nimenomaan tyhjän tilan hukan minimoiminen ja prosessivirtauksen parantaminen.

Toinen havaittu merkittävä hukan tyyppi oli ns. making-do, jota syntyi häiriöiden keskeyttäessä työnteon. Making-do voidaan kääntää suomeksi esim. ”ollaan tekevinämme” eli tehtävää aloitetaan, vaikka kaikki edellytykset eivät ole kunnossa. Suurin osa havaituista häiriöistä aiheutui useamman työryhmän samanaikaisesta työskentelystä tahtialueella, jolloin työntekijät, materiaalit ja työvälineet olivat työnteon tiellä. Vaikka tahtialue oli suuri ja työryhmät pieniä, tahtiaikataulusta puuttuneet suunnittelemattomat työt aiheuttivat paikallisia ruuhkautumisia (Kuva 8). Häiriöitä ja siten making-do hukkaa voitaisiin siis huomattavasti vähentää rauhoittamalla tahtialue yhdelle urakoitsijalle kerrallaan tai vaihtoehtoisesti suunnittelemalla työt niin, että ne voidaan tehdä häiriöttömästi samalla alueella.



Kuva 8 Tahtiaikataulusta puuttuneen työn aiheuttama ruuhka 33 metrin käytävällä. (Salerto 2019)

Tuottavaa työtä tehtiin keskimäärin vain noin kaksi tuntia päivässä ja työt myöhästivätkin aikataulusta. Suurta hukan määrää selittivät osaltaan mittauksen ajoittuminen tahtituotannon aloitukseen, ja tahtiaikataulun suunnittelun myöhästymisen, jolloin osa työvaiheista aloitti valmiiksi myöhässä.

Taulukkoon 2 on koottu diplomityön tulokset. Diplomityössä saatiin vahvistusta sille, että erityisesti tila odottaa työntekijää (**H5**) ja making-do (**H10**) –hukkaa voidaan vähentää tahtituotannolla pyrkimällä aikapuskureiden minimointiin ja tuotannon hallintaan niin, että työt on mahdollista tehdä häiriöttömästi

tahtialueella. Koska making-do:n havaittiin aiheuttavan edelleen työntekijöiden tarpeetonta liikkumista (**H1**), tehotonta työskentelyä (**H3**) ja odottamista (**H4**), saatiin tutkimuksessa tukea myös sille, että making do:n vähentäminen tahtituotannon avulla voi johtaa myös näiden hukan tyyppien vähentymiseen. Hypoteesien **H2**, **H6** ja **H7** hukan tyyppejä ei pystytty arvioimaan valitulla tutkimusmenetelmällä. Tutkimuksessa havaittiin jonkin verran töiden aloittamisia tahtiaikataulusta etuajassa eli ylituotantoa, joka voi altistaa tuotantoa häiriöille ja siten making-do:lle. Koska tahtiaikataulun tarkemmalla noudattamisella voitaisiin vähentää ylituotantoa, myös hypoteesille **H8** saatiin tukea. Tutkimuksessa ei saatu tulosta tahtituotannon vaikutuksesta virheiden määrään (**H9**).

Taulukko 2. Salerton (2019) diplomityön tulokset.

Hypoteesi	Tulos
H1: Tahtituotanto vähentää ihmisten tarpeetonta liikkumista.	tuettu
H2: Tahtituotanto vähentää tarpeetonta työskentelyä.	
H3: Tahtituotanto vähentää tehotonta työskentelyä.	tuettu
H4: Tahtituotanto saattaa vähentää odottamista.	tuettu
H5: Tahtituotanto vähentää tila odottaa työntekijää -hukkaa.	vahvasti tuettu
H6: Tahtituotanto vähentää materiaalit odottavat työntekijää -hukkaa.	
H7: Tahtituotanto vähentää materiaalien tarpeetonta kuljettamista.	
H8: Tahtituotanto vähentää ylituotantoa.	tuettu
H9: Tahtituotanto vähentää virheitä.	ei tulosta
H10: Tahtituotanto vähentää making-do:ta.	vahvasti tuettu

Anton Ruohomäki (2020) tutki diplomityössään hukkaa muuten vastaavalla menetelmällä, mutta kuvauksen lisäksi hän teki systemaattista havainnointia ja hyödynsi projektin dokumentaatiota. Tutkimuksen case-kohteena oli NCC Suomi Oy:n Korjausurakointi-yksikön työmaa Vallila Folks Hotel, joka toimi yrityksen pilottikohteena tahtituotantoon. Case-kohteen tahtiaikana oli yksi päivä ja tahtialueena toimi noin 20 m² kokoinen hotellihuone.

Diplomityössä selvitettiin tahtituotannon potentiaalia hukan vähentämisessä työmaalla, keräämällä dataa kahdelle mestalle sijoitetuilla kameroilla kahden viikon ajan. Kameroina käytettiin liiketunnistimella toimivia Arlo Go -kameroita, joka on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9 Videokuvaamiseen käytetty Arlo Go -kamera ja sen kiinnitys mestalle (Ruohomäki 2020)

Videomateriaalista analysoitiin työntekijöiden mestalle saapumiset ja poistumiset, sekä mestalla vietetty aika ja tehty työ, mikäli se oli havaittavissa. Tällä datalla päästiin käsiksi tyhjän mestan muodossa olevaan hukkaan mestan käyttöasteen kautta. Kahden viikon mittausjaksolle mestan toteutuneeksi käyttöasteeksi saatiin 37 % varsinaisesta työajasta. Tämä tulos on suurempi, kuin aiemmin tehdyissä tutkimuksissa. Ward ja McElwee (2007) sai perinteisesti toteutetun työmaan mestan käyttöasteeksi 10 % ja Salerton (2019) diplomityössä viikon tahtiajalla ja suurella tahtialueella toimineen tahtityömaan mestan käyttöasteeksi saatiin noin 20 % työajasta.

Nauhoitetusta videomateriaalista kävi myös ilmi, että mestoilla oli kymmenen päivän kuvausjakson aikana huomattava määrä käyntejä. Kahdessa hotellihuoneessa käytiin kymmenen työpäivän aikana yhteensä 1590 kertaa, mikä tarkoittaa 79,5 käyntiä yhdessä 20 m² kokoisessa hotellihuoneessa per päivä. Käynnit olivat useimmiten hyvin lyhyitä ja yli viiden minuutin käyntien osuus olikin vain noin 10 % kaikista käynneistä. Näitä käyntejä oli mittauksella yhteensä 162, loppuja, eli alle viiden minuutin käyntejä oli siis yhteensä 1428 kappaletta. Tutkimuksessa oletettiin, että arvoa tuottavaa työtä ei voida tehdä, mikäli mestalla ollaan yhtäjaksoisesti alle viisi minuuttia. Ainoastaan yli viiden minuutin käynnit huomioiden mestan käyttöaste onkin matalampi, 31 % työajasta, mikä vastaa hyvin esim. Zhaon ym. (2019) sisäpaikannuksella tekemiä mittauksia.

Tutkimuksen systemaattisen havainnoinnin yhteydessä huomattiin, että tahtituotannon ohjaus oli casekohteessa puutteellista. Tahtituotannon aamupalavereja ei sovitusta huolimatta juurikaan pidetty, eikä tahtiaikataulua tai sen toteumia tarkasteltu mestaripalavereissa eikä urakoitsijapalavereissakaan. Laiminlyötyä tahtituotannon ohjausta pidettiinkin diplomityön johtopäätöksissä yhtenä pääsyyntä tarpeettoman liikkeen muodossa ilmenneeseen hukkaan. Tyhjän mestan muodossa olevaa hukkaa saatiin poistettua tahtituotannon avulla vähentämällä tarpeetonta käynnissä olevaa työtä (WIP) sekä yksittäisten työvaiheiden sisältä että eri työvaiheiden väliltä. Tämä toteutettiin pienentämällä tuotannon eräkokoa ja tahdistamalla työt etenemään samalla vauhdilla mestalta toiselle. Toisin sanottuna mestojen virtausta saatiin parannettua. Mestän virtauksen parantuessa tulee työn virtauksesta alttiimpi häiriölle. Casekohteen tahtituotannon ohjauksen ollessa puutteellista, ilmeni se häiriönä työn virtauksessa, mikä havaittiin diplomityössä suurena määränä tarpeettoman liikkeen muodossa olevaa hukkaa.

Näiden diplomitöiden valossa mestakameroiden hyödyntäminen hukan mittaamisessa on erityisen hyödyllistä tahtikohteissa, koska ne osoittavat, että ”kireänkään” tahdin saavuttamiseen ei oikeasti tarvita paljon läsnäoloa mestalla. Tämä sama tulos näkyy kypäräkameroilla mitattuna siten, että työntekijä joutuu liikkumaan paljon työpäivän aikana, koska kaikki tarvittavat asiat eivät ole työkohteessa. Toisesta näkökulmasta ilmiöön pääsee kiinni sisäpaikannuksella. Jatkotutkimuksessa olisi tärkeää hyödyntää kaikkia näitä menetelmiä yhdessä, jotta voidaan arvioida myös, mitä tapahtuu mestan ulkopuolella, kun työntekijä joutuu poistumaan sieltä. Mestakameran datan analysointi on käsityönä työlästä mutta kuvantunnistus on kehittynyt jo siihen pisteeseen, että pitäisi olla varsin helppoa todeta automaattisesti, onko mestassa työntekijä vai ei. Perusanalyysiin voi siis päästä helpostikin, jos joku kaupallinen toimija rakentaa yksinkertaisen tekoälyn mestakamerajärjestelmäänsä.

3.4. Hukan arviointi kulunvalvontadatasta

Hankkeen osatutkimuksessa selvitettiin, miten kulunvalvontadataa voi hyödyntää hukan mittaamiseen. Kolmesta jo valmistuneesta hankkeesta otettiin kulunvalvontadata, aikataulutieto sekä työmaakokousten pöytäkirjat ja verrattiin niitä päätelmien tekemiseksi. Koska hankkeissa ei alun perin ollut otettu tutkimusta huomioon, tieto oli osin vajavaista ja tulkinnessa jouduttiin tekemään oletuksia. Päätelmiä hukasta tutkittujen hankkeiden osalta ei siis voinut luotettavasti tehdä. Tavoitteena olikin arvioida, miten tietoa voitaisiin jatkossa käyttää.

Tarkastelun kohteeksi päätyi kolme eri aliurakoitsijaa, joista kerätyt tiedot olivat riittävän hyvällä tasolla. Pois jouduttiin jättämään useita urakoitsijoita pääosin seuraavista syistä:

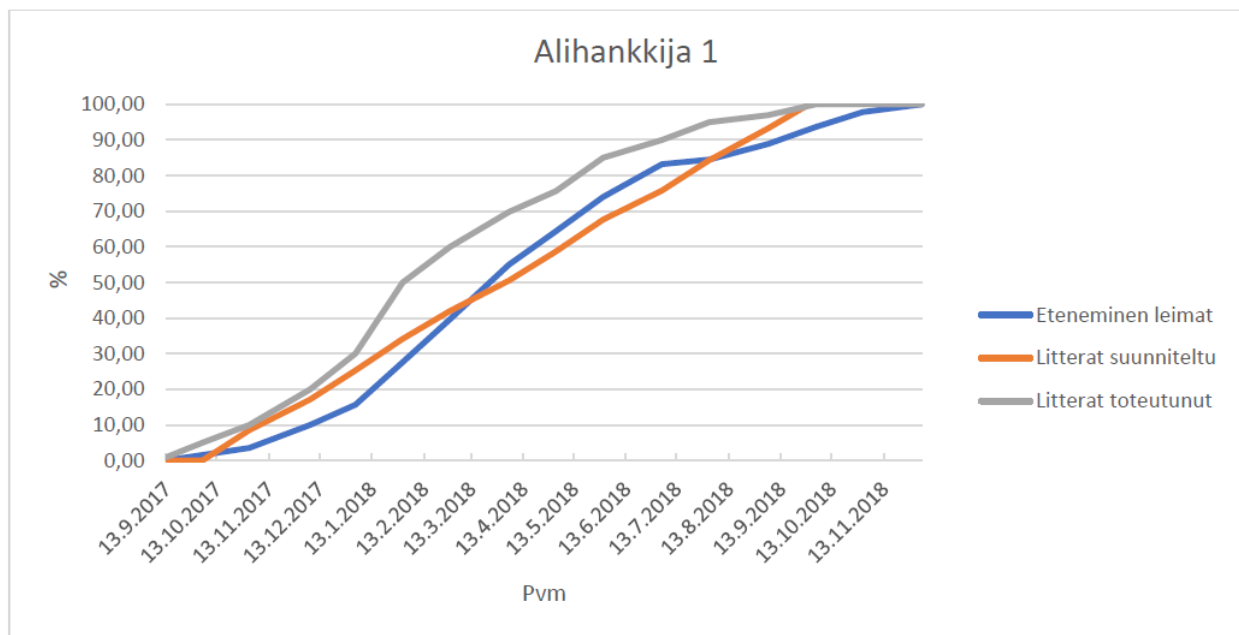
- Liikaa puuttuvia leimoja

- Leimausten yhdistäminen työvaiheeseen liian hankalaa
- Kulunvalvontaleimojen aikaväli suuri suhteessa työvaiheen kokonaiskesto
- Työmaakokousten pöytäkirjoissa ei tietoja ko. Urakoitsijan työvaiheesta.

Tyypillinen haaste on, että urakoitsija tekee useita työvaiheita eri puolella rakennusta yhtä aikaa. Kulunvalvontadatatassa työvaiheita ei ole eroteltu, joten tuntien jakamisen työvaiheille on perustuttava oletuksiin.

Jotta kulunvalvontadatatasta olisi hyötyä työn etenemisen valvontaan, tieto on yhdistettävä muihin tietoihin. Kulunvalvontadataa voi tulkita esimerkiksi kustannusseurannan litteroiden perusteella, työmaakokousten pöytäkirjojen perusteella tai aikatauluvalvonnan pohjalta. Yhdistämällä tiedot voidaan arvioida esimerkiksi tunteja suhteessa etenemään tarkastelujaksolla.

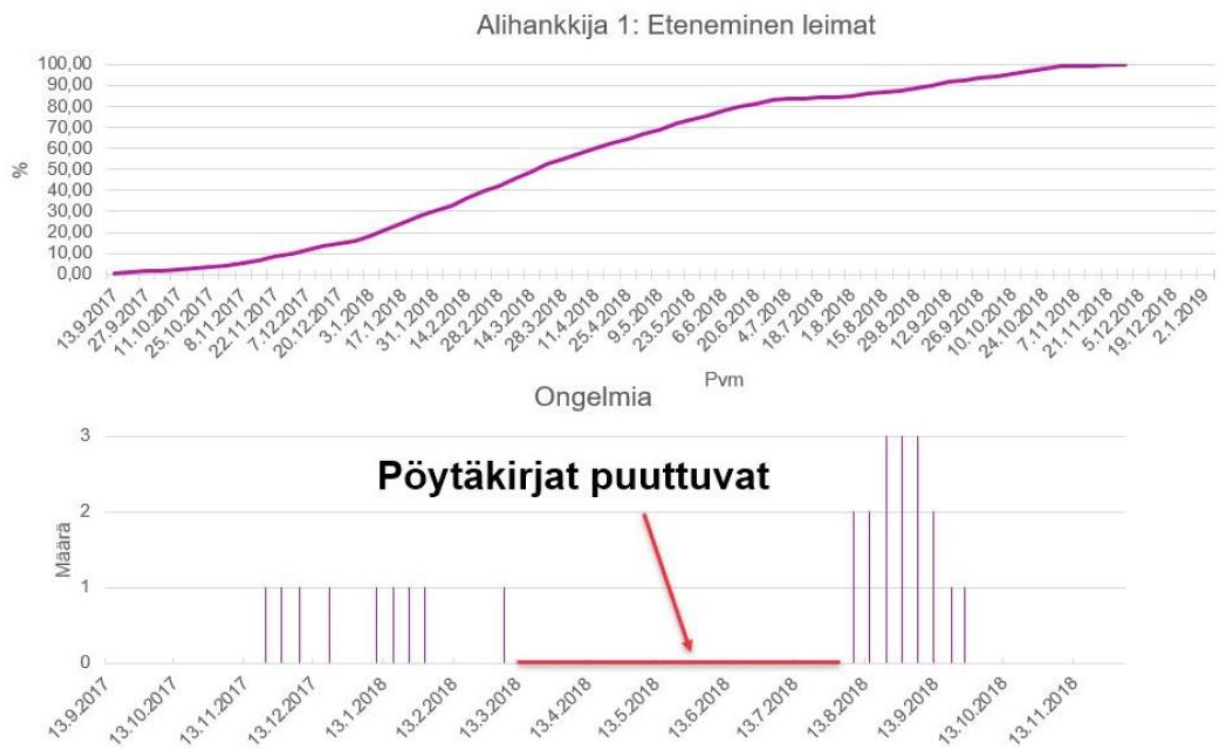
Kaikkien tutkittujen urakoitsijoiden osalta kulunvalvonnasta lasketut kumulatiiviset tuntikäyrät noudattivat S-käyrää eli alkuun tunteja tuli maltillisesti ja työn loppuvaiheessa tunteja tuli myös vähemmän. Toisaalta kulunvalvontaleimat jatkuivat vielä merkittävästi sen jälkeen, kun työvaiheet olivat kustannusten tai aikatauluvalvonnan osalta valmiina. Tunteja kertyi kaikissa kolmessa tapauksessa vielä monta kuukautta työvaiheiden muiden järjestelmien pohjalta todetun päättymisen jälkeen. Kuvassa 10 on esitetty yhden aliurakoitsijan kuvaaja. Myös muilla tutkituilla aliurakoitsijoilla, joiden vertailutieto otettiin aikatauluvalvonnasta, kuvaajat ovat samanlaisia. Tehtävät on merkitty valmiiksi huomattavasti ennen tuntien loppumista.



Kuva 10: Työn eteneminen (sininen viiva) suhteessa suunniteltuun ja toteutuneeseen kustannusten kertymään

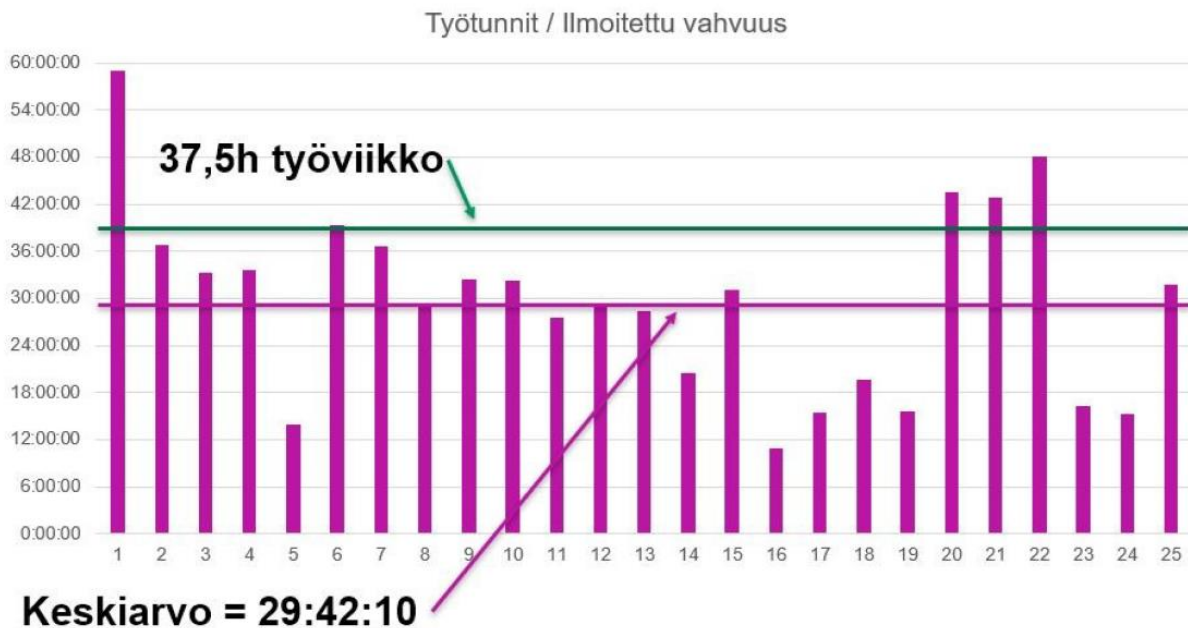
Kun tuntien kertymistä verrattiin kokouspöytäkirjoissa raportoituuihin ongelmiin, voi huomata selvän korrelaation. Kun ongelmia raportoidaan enemmän, eteneminen hidastuu (Kuva 11). Pöytäkirjoista on

tässä laskettu ongelmia, jotka vaikuttavat suoraan työskentelynopeuteen - esimerkiksi edellisten työvaiheiden ongelmat tai ylimääräisten materiaalien löytyminen mestalta.



Kuva 11: Eteneminen suhteessa pöytäkirjoissa ilmoitettuuihin ongelmiin.

Kun kulunvalvontatietoa verrattiin ilmoitettuun vahvuuteen, huomattiin, että vahvuus ei anna kovin hyvää kuvaa työmaalla todellisuudessa olleista resursseista. Monesti vahvuus ilmoitetaan ilmoitushetkellä työmaalla olevien työntekijöiden mukaan mutta kulunvalvontadatasta on nähtävissä, että keskimääräinen viikoittainen työntekijä per ilmoitettu työntekijä jää vajaaksi täydestä viikosta (kuva 12). Käytännössä koko vahvuus ei välttämättä ole koko aikaa työmaalla. Tässä tutkimuksessa epäselväksi jäi, kumpi tieto oli tässä tapauksessa tarkempaa.



Kuva 12: Alihankkijan työn kertymä suhteessa ilmoitettuun vahvuuteen (viikon työtunnit/viikon ilmoitettu vahvuus)

Kulunvalvontadatasta voidaan siis tehdä kiinnostavia havaintoja yhdistelemällä tietoa muihin tietoihin. Esimerkiksi oli havaittavissa selkeä korrelaatio ilmoitettujen ongelmien ja tuntien kanssa. Kulunvalvontatunteja voisikin ajatella käytettävän ongelmien ennakkointiin. Merkittävät muutokset urakoitsijan tuntikertymässä voivat kertoa haasteista työvaiheissa ja niihin voidaan puuttua heti. Toinen merkittävä asia oli hidas aloitus ja hidas lopetus, joka ajoittui työvaiheiden raportoidun valmistumisen jälkeen. Laatuvirheitä ja viimeistelyä tehtiin siis kulunvalvontatiedon mukaan kaikkien kolmen urakoitsijan osalla merkittävästi tehtävän ”valmistumisen” jälkeen.

Kulunvalvontadatasta ei siis suoraan voi päätellä hukkaa mutta sitä voidaan käyttää poikkeavien tilanteiden tunnistamiseen, mikä voi auttaa hukan vähentämisessä. Datasta voisi olla myös arvoa projektien toteutuksen kehittämisessä pitkällä aikavälillä. Erityisesti hitaat aloitukset on todettu muissakin yhteyksissä ongelmiksi, ja niitä voidaan hyvin mitata tällä menetelmällä.

3.5. Hukka sähkö- ja putkitöissä asentajan näkökulmasta

Tutkimuksessa arvioitiin hukkaa sähkö- ja putkitöissä haastatteleamalla sähkö- ja putkiasentajia. Tavoitteena oli selvittää, miten työn tekijä määrittelee hukan, ja mitkä tekijät tekijöiden mielestä vaikuttavat hukan syntymiseen. Yksilöhaastattelut toteutettiin teemahaastatteluina, joten haastateltavat saivat vapaasti tuoda esiin itseään koskevia asioita. Sähköasentajia haastateltiin 9 ja putkiasentajia 8. Haastatellut työskentelivät kaiken kokoisissa yrityksissä ja tasapuolisesti uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen kohteissa.

Työryhmän ajankäyttöön vaikuttivat aikatauluihin, suunnitelmiin, työmaan logistiikkaan ja materiaalivirtaan sekä tiedonvaihtoon liittyvät ongelmat. Kommunikaatio liittyikin osaltaan kaikkiin

hukkaa aiheuttaviin aihepiireihin. Sähkö- ja putkiasentajilla oli monen osa-alueen osalta yhteneviä vastauksia mutta sähköasentajien hukkaan vaikutti useimpien asentajien mielestä suunnitelmien viivästyminen tai laatu. Putkiasentajat nostivat myös suunnitelmat esille mutta heidän haasteensa oli lähennä putkien "risteily" eli törmäykset muiden järjestelmien kanssa ja suunnitelmaviiveet.

Suunnitelmaviiveet ja muutokset

Sähköasentajat olivat yleisesti tyytymättömiä suunnitelmien ajoitukseen ja laatuun. Asentajien kokemus oli, että työmaalle toimitetaan usein suunnitelmia, jotka olivat keskeneräisiä tai virheellisiä. Työmaalla suunnittelupuutteet ilmenivät esimerkiksi mahdottomina asennusreitteinä tai väärinä asennuskorkoina. Vastauksia suunnittelijoilta ei saatu riittävän nopeasti. Molemmat työläjit olivat tyytymättömiä suunnitelmien yhteensovitukseen, esimerkiksi asennukset oli suunniteltu läpi kantavien palkkien, joita ei saanut rei'ittää. Erityisesti sähköasentajat kaipasivat 3D-mallinnuksen laajennettua käyttöä, jotta suunnitelmien toteutettavuus voitaisiin tarkastaa.

Suunnitteluongelmien lisäksi haastateltavat ottivat usein esille muutostöiden haitallisen vaikutuksen tuottavuuteen. Suunnitteluun liittyvät ongelmat ja muutokset vaikuttavat viikkotasoon työjärjestyksiin ja resursointiin mutta myös koko hankkeen työaikatauluun ja eri työvaiheiden yhteensovitukseen. Tämä johtaa merkittävään hukkaan erityisesti kärke miehen osalta, joka joutuu käyttämään paljon työaikaa suunnitelmapuutteiden selvittelyyn ja töiden uudelleen järjestelyyn. Asentajatasolla hukkaa aiheutuu siitä, että suunnitelmapuutteiden takia joudutaan siirtymään toiseen työkohteeseen tai jopa purkamaan jo tehtyjä asennuksia, kun suunnitelmia päivitetään liian myöhään.

Aikataulut

Aikataulujen hallinta aiheutti asentajien mielestä merkittävästi hukkaa työmaalla. Asentajilla ei tyypillisesti ollut tiedossaan työhönsä liittyviä välitavoitteita, vaan työtä tehtiin vanhentuneiden aikataulujen mukaan. Aikatauluissa päivämääriin ei voinut luottaa. Sähköurakoitsijat pääsivät haastateltavien mukaan töihin joskus jopa kuukausia myöhässä ja työt pakkautuvat työmaan viimeisille viikoille. Aikataulun hallinnan puutteet aiheuttavat kiirettä ja resurssiongelmia yksittäisen työmaan tasolla.

Suurimpana haasteena asentajan kannalta koettiin se, että vaikka aikataulusta ollaan myöhässä jopa kuukausia, aikataulua ei päivitetä. Rakennusurakoitsija tyypillisesti vähättelee aikatauluvaikeiden vaikutuksia. Hukkaa voisi olennaisesti vähentää, jos asennustyöt voitaisiin tehdä suunnitelmallisemmin ja työvaiheet aina kerralla alusta loppuun. Haastateltujen putkiasentajien mielestä tehtävien suunniteltu järjestys ei ole paras mahdollinen, vaan hukkaa aiheutuu siitä, että asentaja joutuu käymään useita kertoja samassa työkohteessa. Hyppiminen työkohteesta toiseen koettiin merkittäväksi hukan aiheuttajaksi.

Asentajat kokivat saavansa enemmän aikaan, jos heillä oli selvillä viikkotasolla tavoitteet. Eräällä tutkimukseen osallistuneella työmaalla pääurakoitsija kävi viikkotasolla tavoitteet läpi kärke miesten kanssa ja he saivat raportoida esteitään muille. Tällainen Last Planner –tyylinen menettely vähensi asentajien mielestä hukkaa olennaisesti. Suurimmalle osalle asentajista viikkotavoitteet eivät kuitenkaan olleet selvillä, vaan kärke mies teki viikkoaikataulut itsenäisesti ja koki prioriteettien olevan epäselvät.

Erityisesti pääurakoitsijan toimintaa kritisoitiin. Jos edeltävä työvaihe oli kesken, pääurakoitsija vaati kuitenkin aloittamaan työt, mikä johti asentajien mielestä merkittävään hukkaan erityisesti sähkötöissä. Edeltävien työvaiheiden viiveet johtivat työjärjestysten muuttumiseen epäoptimaaliseksi. Työmaan

lopussa viiveet kasaantuivat ja aiheutui turhaa kiirettä ja liikaa resursseja työmaalle. Kiire ja edeltävien tehtävien viiveet johtivat siihen, että asennuksia purettiin ja asennettiin uudelleen useita kertoja. Tämä oli erittäin turhauttavaa asentajien näkökulmasta. He kokivat asian niin, että pääurakoitsija ei kunnioita itse tekemäänsä aikataulua. Kärkimiesten mielestä aikataulua pitäisikin päivittää ”matkan varrella” toteutumattomien perusteella.

Kommunikaatio

Kommunikaatiota pidettiin suurena hukan aiheuttajana. Rakennusurakoitsijalta saatiin ristiriitaisia työohjeita. Työmaalla oli liikaa palavereita, joissa oli liikaa osapuolia. Siitä huolimatta töiden koordinointi koettiin heikoksi. Kommunikaatio-ongelmia oli myös suunnittelijoiden ja sähköasentajien välillä. Ne aiheuttivat hukkaa. Erityisesti sähköasentajien mukaan huono kommunikointi johti turhaan odotteluun ja sekaannuksiin, jotka johtivat usein väärin työjärjestyksiin, väärin tehtyihin asennuksiin ja valmiiden asennusten purkamiseen. Toiset talotekniikka-alat, erityisesti IV-urakoitsijat, koettiin hankaliksi yhteistyökumppaneiksi.

Kommunikaatio-ongelmat korostuivat isommilla työmailla. Mitä enemmän osapuolia asian selvittämiseen otetaan mukaan, sitä vaikeampi on asentajan mielestä saada vastauksia. Viestiketjut katkesivat todennäköisemmin, jos mukana oli enemmän osapuolia. Kommunikaatio-ongelmien ratkaisuksi työmaalle toivottiin paremmin kohdennettuja palavereja, esim. talotekniikan risteilypalaverit ja viikoittaiset kärkimiespalaverit. Isoilla työmailla olisi eduksi, jos olisi omia kärkimiehiä kullakin alueella. Hukan vähentäminen olikin sähköasentajien mielestä helppoa: asentajan pitäisi saada tieto teknisestä toteutuksesta, siihen liittyvistä muista asennuksista ja työvaiheen aikataulullisista tavoitteista ennen töiden aloitusta. Urakoitsijapalaverin pöytäkirja ei ole tähän hyvä työkalu.

Kärkimiehen ajankäyttö

Suurilla ja keskisuurilla työmailla sähköasentajien kärkimies käyttää kärkimiehen tehtäviin 50-100 % työajastaan, mikä on enemmän kuin TES:n mukainen korvaus. Paikallisesti on sovittu kärkimiehen tehtävien lisäyksestä mutta silloinkin kärkimiehen kokemuksen mukaan muihin kuin asennustöihin kului enemmän aikaa kuin korvattava prosenttiosuus. Mitä enemmän työmaalla oli haasteita aikataulun tai suunnittelun kanssa, sitä enemmän kärkimiehellä meni aikaa ylimääräiseksi koettuun asioiden selvittelyyn.

Haastattelu hukan mittaamisen välineenä

Kokonaisuutena haastattelulla pääsi hyvin käsiksi asentajien kokemien hukan tyyppeihin ja erityisesti sähköasentajilla oli paljon kehitysehdotuksia prosessiin, jotta heidän hukkaamansa aikaa voisi vähentää. Määrällisesti haastattelulla ei päästä hukan prosenttiosuuksiin mutta työntekijöiden haastatteluilla pääsee syventymään hukan syihin.

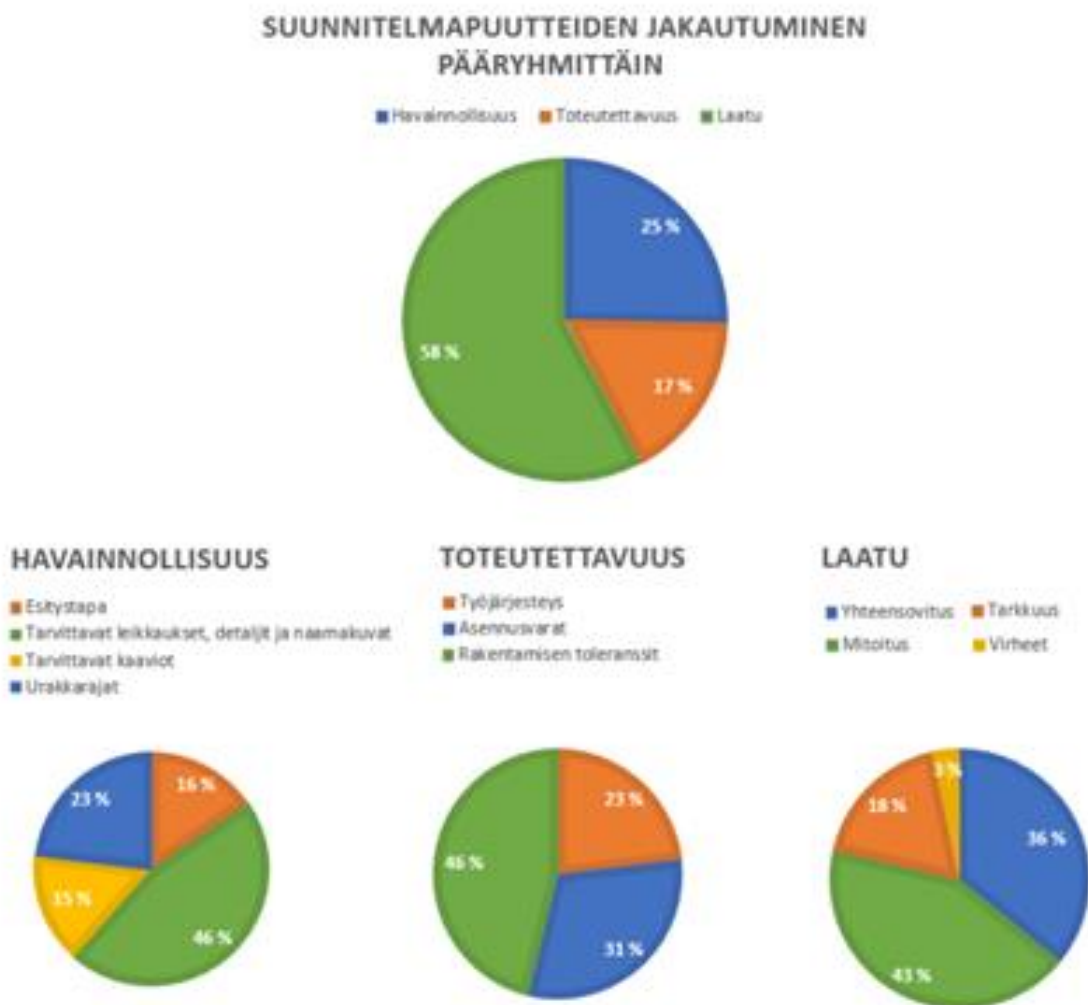
3.7. Tuotannon hukan vähentäminen suunnittelua kehittämällä

Edellä kuvatut tutkimukset ovat lähestyneet tuotannon hukkaa asentajan työaikaa arvioimalla. Vaikka suunnitteluasiat nousivatkin esille esimerkiksi haastatteluissa, Building 2030 työryhmässä koettiin tarpeellisenä arvioida erikseen rakennussuunnittelun vaikutusta tuotannossa syntyvään hukkaan. Teemu Järvinen (2019) teki aiheeseen liittyvän diplomityön kohdeyrityksenä YIT Suomi Oy.

Työn tavoitteena oli tarkastella, kuinka hyvin työmaalla käytetyt toteutussuunnitelmat vastaavat tuotannon tarpeita. Lisäksi työssä pyrittiin kehittämään nykyisiä suunnittelun ohjauskäytäntöjä tuotannon vaatimusten näkökulmasta. Tutkimusaineisto koostui aiempien tutkimusten tuloksista, asiantuntijahaastatteluista sekä yritysvierailuiden yhteydessä suoritetuista dokumentoinneista.

Aiempien tutkimusten perusteella nykyisillä suunnittelun ohjauskäytännöillä ei pystytä riittävän tehokkaasti vastaamaan kaikkien hankkeen osapuolten tavoitteisiin ja vaatimuksiin. Puutteelliset toteutussuunnitelmat nousevat myös usein esille yhtenä merkittävistä tuotantoa häiritsevistä tekijöistä.

Haastatteluihin osallistui 27 henkilöä. Haastatteluihin osallistui pääurakoitsijan, suunnitteluryhmän sekä aliurakoitsijoiden edustajista. Vastausten perusteella tuotantoon päätyvät toteutussuunnitelmat sisältävät puutteita ja aiheuttavat tuotannossa hukkaa. Työmaalla havaitut suunnitelmapuutteet pystyttiin jakamaan kolmen pääryhmän alle: havainnollisuuden, toteutettavuuden ja laadun. Tyypillisinä suunnitelmapuutteina nousi esille epäonnistunut yhteensovitus, rakentamisen toleranssien huomioiminen ja suunnitelma-asiakirjojen vähäinen määrä.



Kuva 13: Suunnitelmapuutteiden jakautuminen pääryhmittäin (Järvinen 2019)

Haastateltavat kokivat suunnitelmapuutteiden aiheuttavan merkittävää hukkaa tuotannossa. Valtaosa oli sitä mieltä, että suunnitelmapuutteista aiheutuu odotusta, tarpeetonta materiaalien ja välineiden siirtelyä, tarpeetonta varastointia sekä rakentamisen laatuvirheitä. Nykyisten käytäntöjen kipupisteitä tarkasteltiin suunnitelmapuutteiden juurisyiden kautta. Juurisyiksi tunnistettiin mm. epäselvä suunnittelutehtävien sisällön määrittely ja aikatauluttaminen sekä suunnitelmien yhteensovittamisen vakioitujen käytäntöjen puute. Kuvassa 14 on esitetty haastateltavien mielestä merkittävimmät suunnitelmapuutteista johtuvat hukan muodot.



Kuva 14: Suunnitelmapuutteista aiheutuvan tuotannon hukan muodot (Järvinen 2019)

Yritysvierailujen tarkoituksena oli tunnistaa sellaisia suunnittelun ohjauksen parhaita käytäntöjä, joilla havaittiin olevan potentiaalia poistaa Suomen nykytilassa tunnistettuja kehityskohtia. Vierailut keskittyivät Yhdysvaltojen Kalifornian osavaltion San Franciscon lahden alueen asuinrakennushankkeisiin. Vierailuja isännöi pääurakoitsijana toimiva Suffolk Construction, jonka standardoimalla suunnittelun ohjauksen toimintamallilla on saavutettu merkittäviä kustannussäästöjä. Kustannussäästöjä raportoitiin myös tilaajan ja alihankkijaketjun puolelta. Olennaisia eroavaisuuksia suomalaiseseen rakentamiseen verrattuna tunnistettiin kaksi. Ensimmäinen näistä liittyi suunnittelun ohjauksen resursointiin, johon käytettiin keskimäärin 10 000 lisätuntia isossa korkean rakentamisen hankkeessa. Toisena erona esille nousi suunnittelun ohjauspalveluiden ja detaljitason suunnittelutehtävien tilaaminen kolmannelta osapuolelta, joka myös yhteensovittaa toteutussuunnitelmat keskenään. Yhteensovittaminen tapahtuu kuitenkin yhteistyössä suunnitteluryhmän kanssa ja vastuu toteutussuunnittelukokonaisuudesta on pääsuunnittelijalla. Suffolkin suunnittelunohjausprosessi on yksityiskohtaisemmin kuvattu Järvisen (2019) diplomityössä.

Parhaiden käytäntöjen tunnistamisessa tietomallintamisen standardoidut prosessit korostuivat. Kehitysehdotuksina nousikin esille mm. tietomallintamisen tarkkuusmääritelmiin perustuva suunnittelutehtävien aikatauluttaminen ja tuotannon imuohjauksella tapahtuva tietomallin lohkoittainen koordinointi. Kohdeyrityksen sisäisen asiantuntija-arvioinnin perusteella todettiin, että tunnistetut parhaat käytännöt soveltuvat osittain suomalaiseseen rakentamiseen. Tutkimuksen lopputulemana esitetään, että rakennussuunnittelun ohjauksen standardisoinnilla ja tähän panostamisella on huomattavaa potentiaalia parantaa rakentamisen tuottavuutta vähentämällä tuotannossa syntyvää hukkaa.

4. Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet

Tutkimus osoitti, että sekä suunnittelussa että tuotannossa on valtava määrä hukattua aikaa. Riippumatta siitä, ollaanko tahtihankkeessa vai perinteisessä tuotannossa, arvoa lisäävän ajan osuus on pieni. Hukan vähentämisessä on siis valtava liiketoimintamahdollisuus, koska nykyiset aikataulut ja budjetit tehdään perustuen 20–30 % arvoa lisäävään aikaan työmaalla ja aikataulutehtävien kestoissa on jopa 70 % varausta häiriöille. Hukan puolittamisella voitaisiin puolittaa työvoimakustannukset, lyhentää aikataulut lähes puoleen (kuivumisaikoja ja rungon pystystä ei voine puolittaa) ja vähentää merkittävästi rakennushankkeiden aikatauluriskejä, koska työryhmien koot ovat pienempiä, jolloin resursseja voidaan tarvittaessa joustavasti lisätä.

Tuloksista havaittiin, että hukkaa voidaan aika yksinkertaisin keinoin poistaa yksittäisiltä työryhmiltä. Hukan poistaminen laajalla rintamalla rakentamisessa onkin sitten vaikeampi haaste. Suosituksena jatkossa onkin ensin varmistaa, että kaikki rakentamiseen liittyvät henkilöt ymmärtävät, mitä hukka on ja mistä sitä aiheutuu. Toiseksi tarvitaan jatkuvaa mittaamista, jotta päästään rakennushankkeittain näkemään, kuinka paljon hukkaa on hanketasolla. Uusia teknologioita ja prosesseja pitäisi arvioida käyttäen yhtenä kriteerinä sitä, miten paljon ne vähentävät hukkaa suunnittelussa ja tuotannossa. Hukan vähentämisen pitäisi olla kaikilla päällimmäisenä mielessä ja litterakohtaisesta osittaisoptimoinnista pitäisi siirtyä kohti kokonaisuuksien hallintaa. Erityisesti tätä viimeistä on tietysti toistettu jo aika pitkään ilman havaittavaa muutosta, mutta nyt uudet hukan mittaamiseen liittyvät työkalut mahdollistavat systemaattisemman etenemisen.

Suunnitteluprosessin osalta tutkimuksen johtopäätöksenä voidaan suositella tehtäväpohjaista suunnitteluprosessin hallintaa ohjelmistoilla, jotka mahdollistavat prosessitiedon tallentamisen jatkoselvityksiä varten. Tutkimuksen pohjalta voidaan jatkossa mahdollisesti muodostaa prosessitiedosta reaaliaikainen tilannekuva suunnitteluprosessista. Hukan mittaamiseen suunnittelussa soveltuu esimerkiksi revisioiden systemaattinen hallinta ja analyysi. Suunnittelun sisällön huomattiin vaikuttavan merkittävästi asennusprosessin hukkaan. Asiasta onkin käynnistetty jatkotutkimuksia, joissa selvitetään, miten asentajien osaaminen pitäisi ottaa huomioon suunnittelussa.

Tuotannon hukkaa voi mitata yksiselitteisemmin kuin suunnittelun hukkaa. Erityisen lupaavia olivat sisäpaikannusmittaukset, joilla voidaan häiriöttömästi läsnäolosta suoraan päätellä hukkaa kokonaisuutena ja tehtävätasolla, jos tiedot voitiin yhdistää aikataulutietoon. Sisäpaikannus onkin kaikkein skaalautuvien tutkimistamme menetelmistä. Kypäräkamerakuvauksilla pääsee todella yksityiskohtaiseen ymmärrykseen yksittäisten työvaiheiden hukasta mutta analyysiprosessi on varsin raskas. Sitä voi suositella esimerkiksi niiden työvaiheiden yksityiskohtaiseen tutkimukseen, jotka nousevat esille sisäpaikannusdatasta. Työntekijöiden halu osallistua hukan vähentämiseen oli osittain jopa yllättävää. Haastatelluilta asentajilta saatiin todella arvokasta tietoa hukan aiheuttajista. Määrällisesti hukkaan ei kuitenkaan pääse haastatteluilla kiinni, koska asentajat kokevat hukatun ajan olevan osa heidän työtään, koska sitä on aina ollut prosessissa. Kun tuloksia tarkastellaan yhdessä, voidaan todeta, että rakennushankkeiden sisävalmistusvaiheessa on tahtituotannossa vielä ainakin 70 % "ilmaa". Seuraava loikka läpimenoajoissa saadaankin hukkaa poistamalla. Tahtituotanto ei monista dokumentoiduista hyödyistään huolimatta vielä ole onnistunut vähentämään hukattua aikaa työntekijätasolla. Tämä johtuu erityisesti siitä, että tahtikohteissa tahtiaikataulua ei ole saatu tehokkaasti jalkautettua työntekijätason tekemiseen, mikä näkyy ristiriitaisina työsuunnitelmina sekä hukkana.

Jatkotutkimuksena suosittelemme suunnitteluprosessin systematisointia ja tarkkuustasojen huomioon ottamista. Kun suunnitteluprosessin tehtävät liittyvät BIM-mallin tarkkuustasoon, voidaan suunnittelun tuottavuutta alkaa tarkastella suoraan arvioimalla BIM-malleja. Tämä voisi jatkossa tapahtua osittain automaattisesti, kunhan tutkimuksella selvitetään ensin, miten asiaa pitäisi arvioida. Tuotannon osalta olemme keskittäneet mittaukset pääosin tahtikohteisiin, joista löytyi paljon hukkaa, vaikka monet muut mittarit olivatkin parempia. Olisi tärkeä tietää, miten tahtikohteet vertautuvat perinteiseen tuotantoon eli hukkaa pitäisi mitata myös perinteisissä kohteissa. Optimaalista tapaa yhdistää asentajatason työsuunnittelu ja -ohjaus tahtituotannon kokonaisuuteen tulisi myös tutkia jatkossa. Toisaalta emme ole vielä mitanneet hukkaa allianssihankkeissa, joten emme tiedä, miten hyvin esimerkiksi Big Room -työskentely vähentää hukkaa asentajatasolla. Hukan mittaamisen menetelmät alkavat olla jo kaupallisessa käytössä, joten suosittelemme yrityksiä ottamaan niitä käyttöön ja aloittamaan systemaattinen mittaus ja jatkuva parantaminen. Kun tutkijat saavat dataa useista hankkeista, voimme alkaa tekemään yleisempiä johtopäätöksiä hukan juurisyistä, ja mitkä keinot todella auttavat eniten hukan poistamisessa.

5. Lähdeluettelo

- Aalto, A. (2020). *Measuring waste in precast concrete design through design revisions*. Master's thesis. Aalto University.
- Ballard, G. (1999). Can pull techniques be used in design? *Proceedings of the Conference on Concurrent Engineering in Construction*, Espoo, Finland.
- Ballard, H. G. (2000). *The last planner system of production control*. Doctoral dissertation, University of Birmingham.
- Ballard, G., & Howell, G. (1994). Implementing lean construction: stabilizing work flow. *Lean construction*, 2, 105-114.
- Bertelsen, S., & Koskela, L. (2002). Managing the three aspects of production in construction. *IGLC-10, Gramado, Brazil*.
- Formoso, C., Tzortzopoulos, P., Jobin, M., & Liedtke, R., (1998). Developing a protocol for managing the design process in the building industry. *Proc., 6th Annual Conf. Int. Group for Lean Construction, International Group for Lean Construction*.
- Jenkins, J. L. & Orth, D. L. 2003. Productivity improvement through work sampling. *AACE International Transactions*, CS51-CS57. Morgantown, WV, USA. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/208178476?accountid=27468>
- Jørgensen, B., & Emmitt, S. (2008). Lost in transition: the transfer of lean manufacturing to construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 15(4), 383–398.
- Järvinen, T. (2019). *Talonrakennushankkeen tuotannon edellytysten luominen rakennussuunnittelun ohjauksessa*. Diplomityö, Aalto-yliopisto.
- Kalsaas, B.T. 2010, 'Work-Time Waste in Construction' In: Walsh, K. & Alves, T., *18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Haifa, Israel, 14-16 Jul 2010. pp 507-517.
- Kalsaas, B.T. 2013, 'Measuring Waste and Workflow in Construction' In: Formoso, C.T. & Tzortzopoulos, P., *21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Fortaleza, Brazil, 31-2 Aug 2013. pp 33-42.
- Koniel, O. (2019). *Suunnittelun ohjausmenetelmän kehittäminen toteutussuunnittelun hukan eliminoimiseksi*. Diplomityö, Aalto-yliopisto.
- Koskela, L. (2004). Making do - the eighth category of waste. *Proc., 12th Annual Conf. on Lean Construction, C. T. Formoso and S. Bertelsen, eds., Lean Construction—DK, Elsinore, Denmark*.
- Koskela, L., Ballard, G., & Tanhuanpää, V. P. (1997, July). Towards lean design management. In *Proceedings of the 5th annual conference of the International Group for Lean Construction* (pp. 1-13).
- Koskela, L., & Huovila, P. (1997). On Foundations of Concurrent Engineering. *Anumba, C. and Evbuomwan, N. (eds.). Concurrent Engineering in Construction CEC97*, London 3-4 July. The Institution of Structural Engineers, London, 22-32.
- Lappalainen, E. (2018). Building 2030 työryhmässä esitetyt kalvot.

Lee, S., Diekmann, J.E., Songer, A.D. & Brown, H. 1999, 'Identifying Waste: Applications of Construction Process Analysis' In: *7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Berkeley, USA, 26-28 Jul 1999. pp 63-72

Liu, M., & Ballard, G. (2008, July). Improving labor productivity through production control. In *Proceedings of the 11th Annual Conference of International Group for Lean Construction*.

Lehtovaara, Seppänen, Heinonen, Tomunen, Kulta, Kujansuu, Grönvall (2019). : *Building2030: Tahti suunnittelussa ja tuotannossa*. Available at <https://www.aalto.fi/fi/building-2030/loppuraportit>

Pasila, H-J. (2019). *Impact of Lean-Intervention on Productivity*. Diplomityö. Aalto-yliopisto.

Pikas, E. (2019). Causality and Interpretation: Integrating the Technical and Social Aspects of Design. Doctoral dissertation. Aalto University.

Pikas, E., Koskela, L., & Seppänen, O. (2020). Improving building design processes and design management practices: a case study. *Sustainability*, 12(3), 911.

Romo, J. (2018). *Työmaan resurssien automaattisen seurannan hyödyntäminen tuotannonohjauksessa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto.

Ruohomäki, A. (2020). Hukan mittaaminen tahtituotannossa. Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Salerto, S. (2019). Hukan mittaaminen tahtihankkeessa. Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Seppänen, O., Zhao, J., Badihi, B., Noreikis, M., Xiao, Y., Jäntti, R., Singh, V. and Peltokorpi, A. (2019). Intelligent Construction Site (iCONS) Project Final Report. Available at: https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2019-02/icons_final_report.pdf. Accessed 9.6.2020

Womack, J.P. & Jones, D.T. 2003. *LEAN THINKING. Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. London, UK. Simon & Schuster UK Ltd. pp.15-89. ISBN: 978-0-7432-3164-0.

Zhao, Y. & Chua, D.K.H. 2003. 'Relationship Between Productivity and Non Value-Adding Activities', In: *Proceedings of the 11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Virginia, USA. 1-.

Zhao, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Badihi, B., & Olivieri, H. (2019). *Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction*. *Automation in Construction*, 104, 52-65.