



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Building 2030 korkea rakentaminen

Kirjoittajat¹:

Olli Seppänen, Joonas Lehtovaara, Alaa Al Barazi, Ergo Pikas, Muge Tetik, Jianyu Zhao

Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos



20.5.2021

¹ Tutkimuksen toteutuksessa on ollut mukana Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Building 2030 tutkimushankkeen yrityskumppanit: A-Insinöörit, Amplit, Fira, Granlund, Haahtela, Lujatalo, Parma, Pohjola Rakennus, Rakennusliike U Lipsanen, Ramboll, Ramirent, Skanska, SRV, Stark, Tocoman, Trimble ja YIT

Lisätiedot: Olli Seppänen, olli.seppanen@aalto.fi

Sisällysluettelo

1.	Johdanto.....	3
1.1	Tutkimuksen tausta	3
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät	3
2.	Kansainvälisen vertailun tulokset	5
2.1	Korkea rakentaminen	5
2.2	Korkean rakentamisen tuotantoprosessi	7
2.2.1	Tuotantojärjestelmän suunnittelu	8
2.2.2	Tuotannonohjaus	10
2.2.3	Tuotannon jatkuva kehitys.....	10
2.3	Kansainvälinen vertailututkimus	10
3.	Tahtituotanto korkeassa rakentamisessa.....	13
3.1	Tausta.....	13
3.2	Kirjallisuuskatsaus - Tahtituotanto korkeassa rakentamisessa	13
3.3	Tutkimusmenetelmät	14
3.4	“Miksi tahtituotantoa” – hyödyt korkeassa rakentamisessa	15
3.5	“Miten tahtituotantoa” – prosessimalli korkeaan rakentamiseen	17
3.6	Tapausesimerkit tahtisuunnittelun havainnollistamiseksi	18
3.7	Yhteenveto	20
4.	Korkean rakentamisen logistiikka	21
5.	Korkean rakentamisen simulointimalli	24
5.1.1	Mallinnettava ongelma.....	24
5.1.2	Testisimuloinnit: lähtötiedot ja testatut skenaariot	26
5.1.3	Testisimulointien tulokset.....	27
5.1.4	Johtopäätökset	29
6.	Kylpyhuone-elementit korkeassa rakentamisessa.....	30
7.	Johtopäätökset ja jatkotutkimus-aiheet	35
8.	Lähteet	37

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Korkea rakentaminen on lisääntymässä Suomessa. Monella Building 2030 -konsortion jäsenyrityksellä oli hanketta aloitettaessa jo jonkun verran kokemusta korkeiden asuin- ja liikera-kennusten suunnittelun ja rakentamisen erityispiirteistä. Hanketyyppejä pidettiin haastavana. Kansainväliset vieraat suomalaisilla korkean rakentamisen työmailla olivat kiinnittäneet huomiota mm. nosturien alhaiseen käyttöasteeseen ja rakennesuunnitelmien massiivisiin rakenteisiin. Näitä asioita oli jo verrokkimaissa ratkaistu vuosikymmeniä sitten.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteena oli lisätä konsortion jäsenten ymmärrystä kansainvälisistä parhaista käytännöistä korkeassa rakentamisessa. Erityisesti hankkeessa tavoiteltiin ratkaisuja rungon asennusnopeuteen ja korkean rakentamisen pystylogistiikkaan. Koska hankkeen budjetti oli pieni, ajatuksena oli kutsua korkean rakentamisen osaajia Suomeen ja käsitellä heidän esittelemiään parhaita käytäntöjä työryhmän kokouksissa.

Näistä lähtökohdista hankkeen työryhmä päätti tavoitella seuraavia tuloksia:

- **Kansainvälisten parhaiden käytäntöjen dokumentointi liittyen suunnittelun ohjaukseen ja rakentamiseen**
- **Parhaita käytäntöjä korkean rakentamisen pystylogistiikkaan**
- **Arvio korkean rakentamisen hankkeissa olevan hukan määrästä**

Menetelminä suunniteltiin case-hankkeita korkean rakentamisen kohteissa sekä yhteistoiminnallisia työpajoja, joihin kutsutaan kansainvälisiä asiantuntijoita. Lisäksi tarkoituksena oli tehdä matkoja parhaiden käytäntöjen löytämiseksi ainakin Kaliforniaan ja Aasiaan.

COVID-19 pandemian vuoksi tutkimuksen kansainvälistä osuutta ei voitu tehdä suunnitellusti. Ennen pandemian alkua ehdittiin tehdä yksi matka Kaliforniaan, josta saatiin hyviä oppeja. Pandemian puhjettua saimme lisäksi järjestettyä israelilaisen Tidharin kanssa työpajan virtuaalisesti. Lisäksi teimme kansainvälistä aikataulujen ja BIM-mallien vertailua. Niko Timonen selvitti diplomityössään kylpyhuonemoduulien asennustapoja korkean rakentamisen kohteessa hyödyntäen myös kansainvälistä aineistoa. Case-hankkeiden osalta teimme jonkun verran sisäpaikannusmittauksia SRV:n Loiston hankkeessa mutta tulokset jäivät tavoiteltua vähemmiksi, koska keväällä 2020 laitteiston ylläpito oli rajoitusten vallitessa vaikeaa.

Pandemian takia suunnitelmaa oli siis muutettava kesken hankkeen. Päätimme keskittyä tahtituotantoon korkean rakentamisen kohteissa ja korkean rakentamisen logistiikan simulointiin. Tahtituotannon osalta teimme 12 haastattelua kansainvälisten osajien kanssa ja kehitimme niiden pohjalta tahtituotantomallin korkeaan rakentamiseen. Korkean rakentamisen logistiikassa hyödynsimme case-hankkeen mittaustuloksia ja työryhmän osaamista korkean rakentamisen logistiikan simulointimallin kehittämiseen. Simulointimallia testattiin hankkeen aikana teoreettisella projektilla ja tuloksista keskusteltiin työryhmissä mutta hankkeen jälkeen sitä on hyödynnetty konsortion jäsenten korkean rakentamisen hankkeissa. Lisäksi työryhmissä kuultiin asiantuntijoiden puheenvuoroja SRV:ltä, YIT:ltä, Granlundilta, Rambollilta ja Amplitilta.

Tässä loppuraportissa käymme läpi hankkeen keskeiset opit liittyen kansainvälisiin parhaisiin käytäntöihin, kylpyhuonemuodulien hyödyntämiseen korkeassa rakentamisessa, tahtituotantoon korkeassa rakentamisessa ja korkean rakentamisen pystylogistiikasta tekemiimme havaintoihin ja mittauksiin sekä simulointimalliin liittyen.

2. Kansainvälisen vertailun tulokset

Lisääntyvä kysyntä uusille tiloille ja tonttien vähyys on kasvattanut kaikkialla maailmassa tarvetta rakentaa korkeita rakennuksia. Sama ilmiö on havaittu myös Suomessa ja erityisesti pääkaupunkiseudulla. Muualla maailmassa kokemusta on jo paljon, kun taas Suomessa korkeaa rakentamista ollaan vasta aloittelemassa. Suomessa onkin ollut julkisuudessa esillä paljon haasteita korkeaan rakentamiseen liittyen. Samat haasteet olivat korkean rakentamisen alussa myös muilla markkinoilla mutta vuosikymmenten kokemuksen jälkeen haasteisiin on löydetty ratkaisut. Haastatellut yritysten edustajat sanoivatkin, että korkean rakentamisen hankkeet ovat kokeneelle yritykselle parhaita hankkeita, koska oppimisefekti saman projektin sisällä on niin suuri. Tässä luvussa esitetään hankkeen aikana tehdyn kansainvälisen vertailun tuloksia.

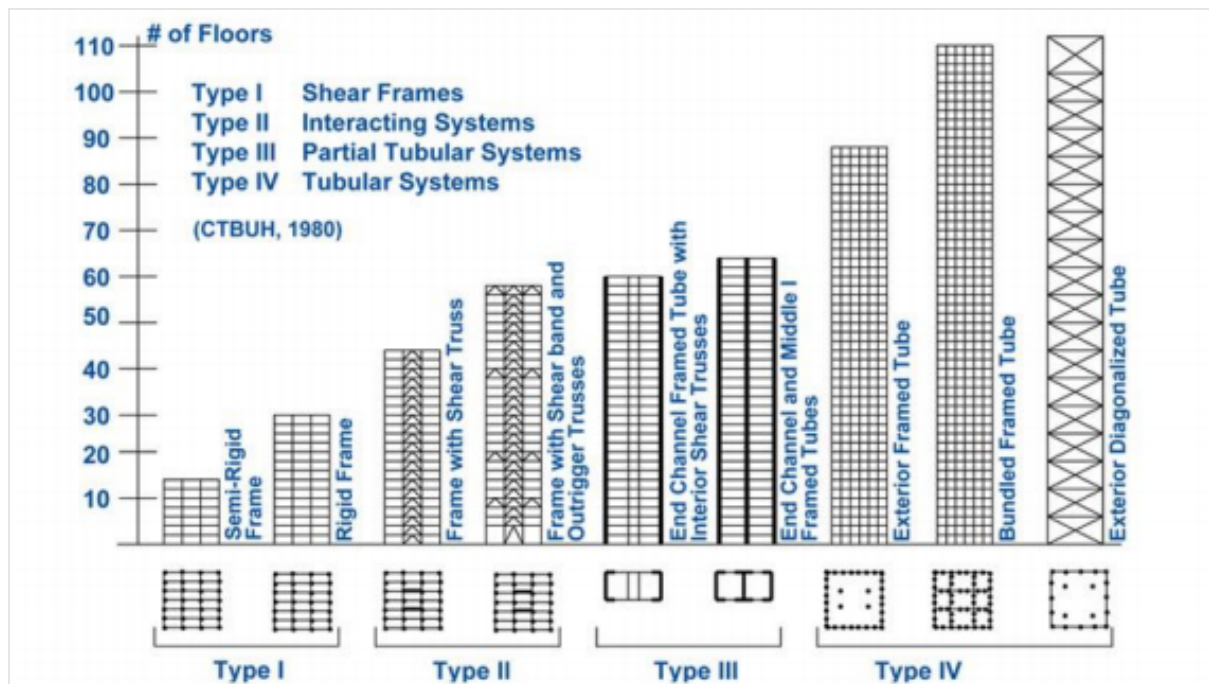
2.1 Korkea rakentaminen

Rakennukset määritetään ”korkeiksi” yleensä kerrosluvun perusteella mutta kerrosmäärät vaihtelevat suuresti maittain. Esimerkiksi Virossa yli kymmenkerroksiset rakennukset ovat korkeita rakennuksia mutta Israelissa korkeiksi rakennuksiksi määritellään yli 20-kerroksiset rakennukset.

Kohteiden rakennejärjestelmän valinta ja suunnittelu riippuvat kaikkialla projektin kontekstista ja ympäristöstä. Historiallisesti korkea rakentaminen on eroteltu kolmeen sukupolveen:

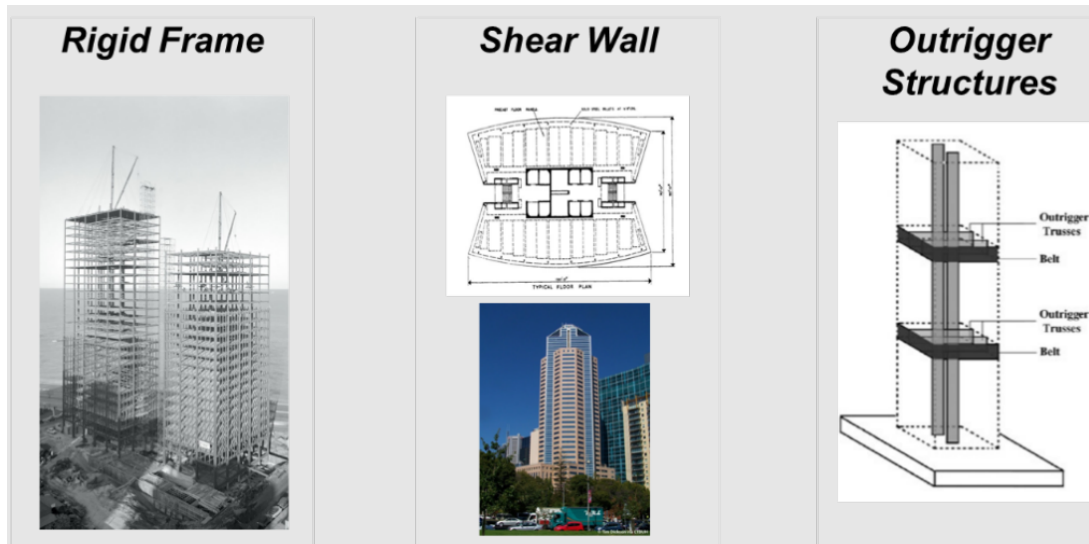
- **Ensimmäinen sukupolvi (1900-luvun alku):** Korkeiden rakennusten ulkoseinät olivat pääasiassa kiveä tai tiiliä.
- **Toinen sukupolvi (1900-luvun puoliväli):** Korkeat rakennukset olivat pääosin teräs-rakenteita läpi rakennuksen.
- **Kolmas sukupolvi (2000-luvusta nykypäivään):** Korkeat rakennukset ovat usein hybridijärjestelmiä ja niissä on useampi kuin yksi rakennejärjestelmä. Esimerkiksi perustukset voivat olla betonista, pääosa rungosta teräksestä ja laatat betonista. Tämän päivän korkeat rakennukset ovat yleensä teräksestä, paikallavaletusta betonista tai näiden yhdistelmästä.

Korkeiden rakennusten runkojärjestelmiä on luokiteltu eri tavoin. Esimerkkityyppejä on esitetty kuvassa 1. Käytetyt järjestelmät vaihtuvat, kun kerroksia tulee lisää.

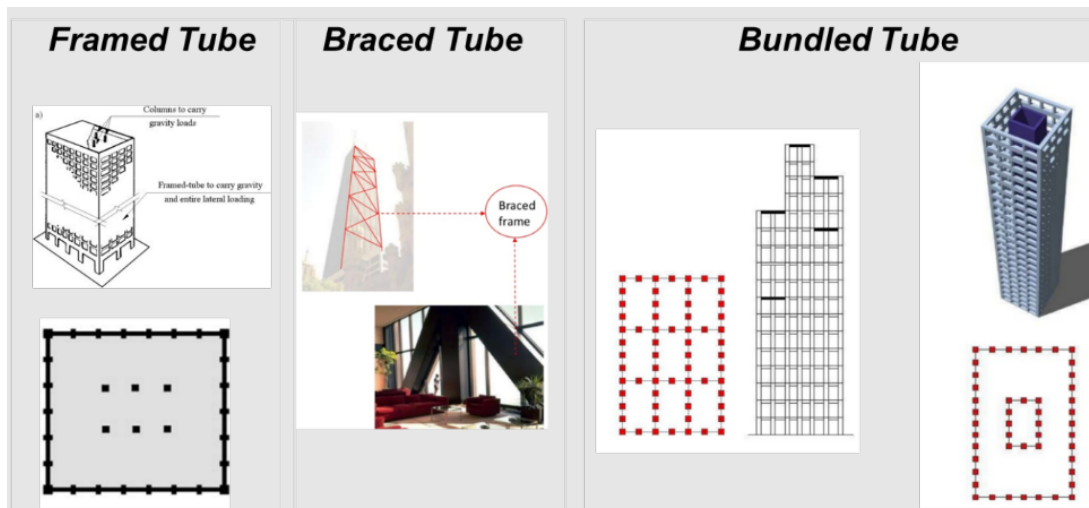


Kuva 1. Korkean rakentamisen runkoratkaisujen kehitys ja tyypit (Singhal et al. 2016)

Yleisemmällä tasolla, korkean rakentamisen rakenneratkaisut on jaettu kahteen luokkaan. Sisäisten rakenteiden luokkaan kuuluvat rakennukset, joiden kantavat rakenteet ovat pääosin rakennuksen sisällä. Näihin kuuluvat kehäjäykistys (rigid frames), jäykistävä seinä (shear wall) ja vaakasuuntaiset jäykistävät ”outrigger”-rakenteet. Ulkoisten rakenteiden luokassa kantavat rakenteet ovat rakennuksen ulkokuorella. Näihin kuuluvat esimerkiksi kehämäinen putkirakenne (framed tube), jäykistetty putkirakenne (braced tube) ja niputettu putkirakenne (bundled tube). Kuvassa 2 on esitetty esimerkkejä sisäisistä ja ulkoisista rakenteista. Hankkeessa ei päästy paneutumaan syvemmälle rakenneratkaisuihin, koska COVID-19 vuoksi jouduttiin perumaan aiheeseen liittyviä matkasuunnitelmia ja virtuaalisesti saatiin toteutettua lähinnä rakentamisprosessiin liittyviä vierailuja.



(a)



(b)

Kuva 2. Esimerkkejä sisäisistä (a) ja ulkoisista rakenteista (b) (*The Constructor*, 2017)

2.2 Korkean rakentamisen tuotantoprosessi

Hankkeen aikana tehtiin vierailu Kaliforniaan juuri ennen pandemiaa ja lisäksi pitkin vuotta tutustuttiin virtuaalisesti useiden yritysten prosesseihin. Mukana oli israelilaisia, virolaisia, brasilialaisia ja amerikkalaisia yrityksiä. Kaikista käytännöistä pisimmälle viety ja laajin oli israelilaisen Tidhar Constructionin prosessi. Seuraavassa kuvaamme Tidharin leaniin pohjautuvan menetelmän korkeaan rakentamiseen.

Yrityksen korkeiden rakentamisen prosessi perustuu leanista tuttuun tieteellisen kokeilun malliin eli Demingin Plan-Do-Check-Act kehään. Tuotannon suunnittelu on siis iteratiivinen prosessi. Erityisesti hankkeen alkuvaiheessa käytetään paljon resursseja jatkuvaan oppimiseen ja

kehittämiseen. Tuotantojärjestelmä suunnitellaan huolella, sen ohjaukseen panostetaan ja sitä kehitetään jatkuvasti hankkeen aikana.

2.2.1 Tuotantojärjestelmän suunnittelu

Ensimmäinen johdon tehtävä on suunnitella hankkeen tuotantojärjestelmä. Yritys on jakanut suunnittelun kuuteen vaiheeseen, jotka on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Korkean rakentamisen tuotantojärjestelmän suunnittelun vaiheet

Tavoitteiden ja strategioiden määrittäminen

Korkean rakentamisen prosessin suunnittelu lähtee asiakkaan liiketoiminnan ymmärtämisestä. Erityisen tärkeää on selvittää, mitkä ovat ajan, kustannusten ja laadun painoarvot. Tavoitteet muutetaan seuraavaksi tuotantojärjestelmän vaatimuksiksi. Tuotantotavoitteet määritetään kerroksina / kuukausi, valujen lukumääränä per viikko ja valumäärä per päivä. Lisäksi selvitetään työmaan olosuhteisiin ja logistiikkaan liittyvät rajoitteet. Näiden tavoitteiden pohjalta määritetään päätasolla tuotantostrategia: eri työläjien osallistaminen, resurssien siirtäminen hankkeesta toiseen (jos useampi rakennus rakennetaan yhtä aikaa) ja tuotantojärjestys. Tärkeät päätökset ovat mm. aliurakoitsijoiden lukumäärä, nosturien määrä ja sijainti sekä työmaahissien lukumäärä pystylogistiikkaa varten.

Kerrosten osittelu

Seuraavaksi määritetään, miten kerrokset jaetaan osiin. Kerrosten osittelu määrittää tuotannon eräkoon, mikä vaikuttaa merkittävästi tuotantojärjestelmään. Yritys tähtää mahdollisimman pieneen eräkokoon eli kerros jaetaan mahdollisimman moneen työkohteeseen läpimeinoajan lyhentämiseksi. Tämä eroaa perinteisestä tavasta rakentaa korkeita rakennuksia. Perinteisesti muottikalustoa ja betonointia on osittaisoptimoitu suosimalla isoja eräkojoja. Osittelu tehdään aluksi kahteen osaan: ydinkuilu ja muu kerros. Ydinkuilu ja muut alueet jaetaan sitten

edelleen pienempiin alueisiin ja nämä alueet vielä pysty- ja vaakaelementteihin. Osittelu määrittää määrälaskennan tarkkuustason.

Määrälaskenta ja resurssianalyysi

Seuraavaksi määrät lasketaan sijainneittain muottityölle, raudoitukselle ja betonoinnille. Muottityön pinta-ala määrittää tarvittavan muottikaluston ja tukien määrän. Seuraavaksi lasketaan tarvittava tuotantonopeus ja tehdään alustavat päätökset työryhmien lukumäärästä ja työryhmien koosta.

Kestojen laskenta ja aikataulun visualisointi

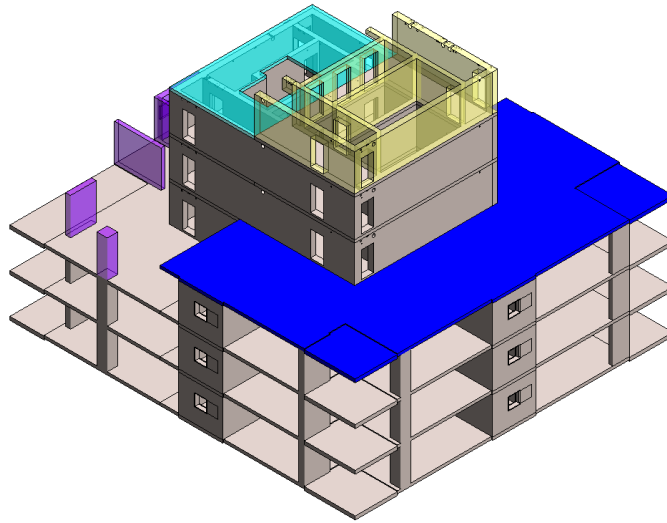
Määrälaskennan jälkeen voidaan tehdä eri tason tuotantosuunnitelmat. Rungon tuotantoaikataulu on päivätasolla. Betonointiaikataulu on tuntitasolla. Nostoaikataulu on minuuttitasolla. Resursseja suunnitellaan nosturia ja betonointia lukuunottamatta päivätasolla. Suunnitelma tehdään kunkin kerroskierron osalta erikseen. Suunnitelmat visualisoidaan 4D-BIM mallissa ja käydään läpi aliurakoitsijoiden kanssa ja iteroidaan, kunnes kaikki osapuolet hyväksyvät suunnitelman toteutuskelpoisuuden.

Riskien analyysi ja hallinta

Riskit määritetään yhdessä kumppanien kanssa kokemukseen perustuen. Riskirekisteriin määritetään riskin todennäköisyys ja vakavuus. Riskien seuraukset arvioidaan ja priorisoidaan. Riskeihin liittyvät toimenpiteet (riskin poisto, vähentäminen tai siitä selviäminen) suunnitellaan etukäteen ja vastuutetaan osapuolille.

Päivittäiset tuotantosuunnitelmat

Tuotantostrategiaan pohjautuvat päivittäiset tuotantosuunnitelmat kehitetään viimeiseksi. Suunnitelmat tehdään visuaalisesti värikoodattuina 2D paperitulosteina. Jokainen työryhmä saa joka päivä oman suunnitelman, jossa näkyvät päivän aikana asennettavat elementit. Erilliset suunnitelmat tulostetaan muottityölle, raudoitukselle, betonoinnille ja muottien purulle. Lisäksi päivittäinen minuuttitason nostosuunnitelma annetaan nosturin kuljettajalle. Kokonaisuutta hallitaan 4D-mallin avulla päiväkohtaisesti (kuva 4)



Kuva 4: Esimerkki runkokiertoa havainnollistavasta 4D-suunnitelmasta, näytetty päivän 4 työt (Lähde: Tidhar Construction)

2.2.2 Tuotannonohjaus

Tuotannonohjaus perustuu jokaisen työryhmän tukemiseen siten, että tuotantotavoitteet saavutetaan. Pääurakoitsija varmistaa, että kaikilla työryhmillä on aina käytössään ajantasainen tieto, ml. päivittäiset työsuunnitelmat jokaiselle työryhmälle. Tuotantoa valvotaan yhdessä kumppanien kanssa. Tavoitteena on varmistaa, että tuotantosuunnitelmia noudatetaan ja ongelmista saadaan tieto mahdollisimman pian. (1) varmistetaan, että työryhmät tulevat työmaalle ajallaan; (2) varmistetaan, että muotit ja telineet nostetaan suunnitellusti; (3) varmistetaan, että tuotantojärjestystä noudatetaan; ja (4) varmistetaan, että rakentaminen pysyy toleransseissa. Työntekijöiden lukumääriä, toteutuneita aloituksia ja lopetuksia valvotaan tuntitasolla. Tietoa käytetään prosessin visualisointiin ja toteutuman vertaamiseen suunniteltuun.

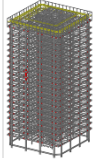
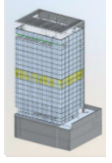
2.2.3 Tuotannon jatkuva kehitys

Tuotantojärjestelmää kehitetään jatkuvasti perustuen nykytilaan ja nykyiseen suorituskyykyyn. Tuotantomenetelmiä kehitetään ja parannetaan kaiken aikaa ja joka päivä työryhmille tulostetaan päivitetyt tuotantosuunnitelmat. Visuaalinen ohjaus ja työryhmiltä saatu palaute sekä objektiivisesti mitattu suorituskyyky toimivat kehityksen ajureina.

2.3 Kansainvälinen vertailututkimus

Tutkimusta varten kerättiin korkean rakentamisen tietomalleja ja tuotantoaikatauluja. Mukaan osallistui kahdeksan hanketta neljästä eri maasta. Osasta hankkeita ei kuitenkaan saatu tietomallin lisäksi aikataulua, joten kaikkia avainmittareita ei voitu vertailla. Projektien esittely ja tulokset on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Projektien perustiedot ja mittarit.

Sijainti	Chicago, USA	São Paulo, Brazil	Ramateim, Israel	Bar Kochva, Israel	Gefen, Israel	Ybox, Israel	Tal-linn, Estonia
Kuva							
Projektien perustiedot							
Käyttötarkoitus	Toi-misto	Asunto	Toimisto	Toimisto	Asunto	Asunto	Toi-misto
Kerroksia	21	21	12	17	39	46	30
Kerroksen pinta-ala	1936	509	707	1205	707	700	330.5
Rakennejärjestelmä	Kehä-jäykistys	Pilari-laatta	Jäykistävä seinä + pilarit (ulkokehällä)	Jäykistävä seinä + pilarit (ulkokehällä)	Jäy-kis-tävä seinä	Jäy-kis-tävä seinä	Pilari-laatta
Materiaali	Teräs	PV	PV	Elementti/PV	PV	PV	PV
Pohja-ratkaisu	Yksin-kertai-nen	Vaikea	Yksin-ker-tainen	Suht. Yk-sin-kertai-nen	Yksin-kertai-nen	Yksin-kertai-nen	Yksin-kertai-nen
tv/kerros	-	8	8	12	8	8	8
Tehokkuuden tunnusluvut							
Kerrosala per päivä m²/d:	-	63.5	124	100	88.7	100	41
Rakenne-elementtien tilavuus kerroksessa per päivä m³/d:	-	24.5	38.9	34.5	-	-	13.3
Pystyelementtien suhde vaaka-elementteihin	-	0.13	0.04	0.07	-	-	0.09

Hankkeita ei ole riittävästi vahvojen johtopäätöksien tekemiseen mutta Israelissa olevat yritykset näyttävät olevan tuotannon tehokkuudeltaan verrokkimaita tehokkaampia. Pääero tuotantomenetelmissä on israelilaisten virtaustehokkuuden optimointi pelkän resurssitehokkuuden lisäksi: pelkässä resurssitehokkaassa korkeassa rakentamisessa valetaan harvemmin ja isompia

valuja kerralla, mikä lisää läpimenoaikaa. Israelissa virtaustehokkuutta optimoivissa menetelmissä valut ovat päivittäisiä tai joka toinen päivä, mikä johtaa lyhyempiin läpimenoaikoihin.

Edellä mainittujen tulosten lisäksi haastatteluissa ja keskusteluissa toistuivat kaikkialla samat teemat. Opit voidaan jakaa suunnittelunohjaukseen ja tuotannonohjaukseen liittyviin oppeihin.

Suunnittelu ja suunnittelunohjaus

- Rakenteet pitäisi suunnitella vastaten asiakkaan tarpeeseen ja ottaa huomioon rakennesuunnittelussa tavoiteltu tuotantonopeus ja teollinen rakentaminen
- Rakennusosien määrä pitäisi minimoida ja niitä pitäisi yksinkertaistaa mahdollisimman pitkälle: pystyelementtien minimointi, raudoituksen minimointi ja talotekniikan läpivientien minimointi.
- Pohjien standardointi ja yksinkertaistaminen – sama pohjaratkaisu kaikissa kerroksissa.
- Minimoitava rakennepaksuuksien muutokset – vaihdetaan mieluummin materiaaleja (esim. betoniluokka) tai raudoitusta

Tuotannonsuunnittelu ja -ohjaus

- Pääurakoitsijan ja tärkeimpien urakoitsijoiden pitäisi olla mukana alusta asti, jotta tuotannon näkemys saadaan mukaan jo suunnittelun alkuvaiheessa
- Tuotannon tietoja hyödynnettävä saatavuuden, rakennettavuuden, kustannusten ja tuottavuuden osalta, kun tehdään päätöksiä rakenteista, järjestelmistä ja materiaaleista, ml. esivalmistusmahdollisuudet.
- Tuotannonsuunnittelun on alettava jo suunnitteluvaiheessa – etsittävä tasapaino arvon, virtauksen ja resurssien tehokkuudelle, kohteen osittelulle, tukitoiminnoille (suunnittelun järjestys ja logistiikka), muottikalustolle jne.

3. Tahtituotanto korkeassa rakentamisessa

3.1 Tausta

Tahtituotanto on sijaintipohjainen tuotannonsuunnittelu- ja ohjausmenetelmä, joka on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi tuotannon virtauksen tehostajana (Lehtovaara ym. 2020a). Tahtituotannossa työryhmät etenevät tilasta toiseen yhteisessä rytmissä, tahdissa, luoden tasaisen ja ennakoitavan tuotantoprosessin jossa hukka on minimoitu (mm. Sacks 2016). Lisäksi, tahtituotannon on dokumentoitu mahdollistavan selkeästi lyhyemmän tuotannon kestön (mm. Binner ym. 2018), paremman laadun ja turvallisuuden (Heinonen & Seppänen 2016), sekä paremman läpinäkyvyyden ja kommunikaation tuotannon aikana (Linnik ym. 2013).

Tahtituotannon on esitetty tuovan nopeita hyötyjä erityisesti suuren toistuvuuden omaavissa rakennushankkeissa, jollaisia myös korkean rakentamisen hankkeet ovat. Vaikka tahtituotannon potentiaali korkean rakentamisen tehostajana on siis ilmeinen, ei tahtituotannon soveltamista korkeaan rakentamiseen ole juurikaan tutkittu eikä siitä ole olemassa juurikaan dokumentoituja kokemuksia, vaikka tämän raportin kirjoittajat ovatkin tietoisia useasta onnistuneesta korkean rakentamisen tahtituotantohankkeesta. Sitä vastoin, tahtituotantoa on tutkittu paljon mm. sairaala- ja laboratoriahankkeissa (esim. Frandson & Tommelein 2014) sekä auto-tehtaiden rakentamisessa (esim. Dlouhy ym. 2016). Vatne & Drevland (2016) tarkastelivat tutkimuksessaan tahtituotantoa korkean rakentamisen asuntokohteessa, mutta he keskittyivät analyysissään lähinnä tahtituotannon soveltamiseen yleisesti asuntorakentamiseen eivätkä erityisesti pohtineet tahtituotannon soveltuvuutta korkeassa rakentamisessa.

Tältä pohjalta tutkimushankkeessa haluttiin luoda erillinen katsaus siihen miten tahtituotanto soveltuu korkeaan rakentamiseen, ja miten tahtituotantoa tulisi käytännössä soveltaa korkean rakentamisen hankkeissa. Katsaus luo uutta soveltavaa tietoa siitä, miten tahtituotantoa voidaan hyödyntää korkean rakentamisen tehostamisessa mahdollisimman onnistuneesti.

3.2 Kirjallisuuskatsaus - Tahtituotanto korkeassa rakentamisessa

Tahtituotannon soveltaminen rakennushankkeeseen koostuu useasta eri tuotannon suunnittelun ja ohjaukseen liittyvästä osakokonaisuudesta, jotka voidaan jakaa karkeasti viiteen osaan (Lehtovaara ym. 2020a):

- **Tiedonkeruu ja karkean tason tahtisuunnittelu**
- **Tarkan tason tahtisuunnittelu**

- **Tahtisuunnitelman viimeistely ja tukitoimintojen integrointi**
- **Tahtituotannon käynnistys**
- **Tahtiohjaus ja jatkuva parantaminen**

Tahtituotannon onnistumiseksi tuotantosysteemin tulisi pystyä täyttämään vähintään seuraavat vaatimukset (Lehtovaara 2020b): tahtisuunnitteluvaiheessa tuotannon osakokonaisuuksien (tahtivaunut, tahtialueet, tahtiaika, resursointi) välillä tulisi löytää tasapainoinen ja kaikkia osapuolia tyydyttävä kompromissi, johon myös tukitoiminnot kuten suunnittelu, hankinta, logistiikka ja aliurakan johtaminen on sidottu (Fransson ym. 2015). Lisäksi tahtiohjauksen tulisi olla määrätyn tahdin mukaan rytmitettyä (Alhava ym. 2019). Ohjauksessa ongelmia ratkaistaan jatkuvasti ja yhteistoiminnallisesti välttämällä kumuloituvien virheiden kasvamista. Jatkuva parantaminen projektien välillä standardoi tahtituotannon soveltamisen prosessin, jolloin hyödyt kasvavat hankkeesta toiseen (Binner ym. 2018).

Korkean rakentamisen näkökulmasta tahtituotanto voi tarjota hyötyjä usealla eri tavalla. Tahtituotannon rytmitetty eteneminen on helppo yhdistää korkeiden rakennusten suureen määrään toistuvia kerroksia ja tiloja (Arditi ym. 2002). Myös materiaali- ja informaatiovirtojen sitominen tarkkaan tahtisuunnitelmaan voisi auttaa myös tukitoimintojen (erityisesti pystylogistiikan) hallinnassa ja juuri-oikeaan-aikaan toimituksien mahdollistamisessa. Lisäksi, tahtisuunnitelman helposti ymmärrettävä visualisointi sekä rytmitetty tuotannonohjaus voisivat auttaa hallitsemaan tuotantoa tehokkaammin eri osapuolten välillä. Esimerkiksi kriittisen polun menetelmästä (joka on yleinen tapa ohjata tuotantoa monessa maassa) kaikki nämä ominaisuudet puuttuvat (Pe'er 1974).

3.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin kolmivaiheisena suunnittelututkimuksena (engl. design science research). Ensimmäisessä vaiheessa tahtituotannon soveltuvuutta korkeaan rakentamiseen kartoitettiin kansainvälisellä benchmarkauksella, joka koostui kahdentoista tahtituotannon ja korkean rakentamisen asiantuntijan haastattelusta. Haastateltavat työskentelevät pääasiassa Yhdysvalloissa Kaliforniassa ja Texasissa, joissa korkeasta rakentamisesta on vuosikymmenten vankka kokemus. Haastateltavat koostuivat pääasiassa rakennusliikkeiden operatiivisista johtajista, työnjohtajista sekä tutkijoista. Haastattelut keskittyivät tuotantosysteemien tarkasteluun sekä strategisella että operatiivisella tasolla, ja haastatteluissa pyrittiin saamaan tahtituotannon soveltamisen lisäksi yleiskuva menestyksekkään korkean rakentamisen keskeisistä elementeistä. Haastatteluiden lisäksi datankeruuta täydennettiin työmaakäynneillä (3kpl), tuotantopalaverien havainnoinnilla (2kpl) sekä aikataulujen ja BIM-mallien tarkastelulla. Lisäksi benchmarkausta tuettiin kahdella tutkimusryhmän työpajalla, joista ensimmäinen tapahtui ennen benchmarkausta (benchmarkauksen esittely & palaute tutkimuksen tavoitteista) ja toinen

heti sen jälkeen (alustavien tulosten esittely & palaute). Työpajoihin osallistui tutkijoiden lisäksi pääurakoitsijoiden, erikoisurakoitsijoiden sekä suunnittelukonsulttien edustajia.

Haastateltavat

- H1: Operatiivinen johtaja, pääurakoitsija #1 (120min)
- H2: Toimitusjohtaja, pääurakoitsija #2 (35min)
- H3: Aikataulutuksesta vastaava johtaja, pääurakoitsija #3 (90min)
- H4: Tietomallinnuspäällikkö, pääurakoitsija #4 (60min)
- H5: Työmaainsinööri, pääurakoitsija #4 (30min)
- H6: Työnjohtaja, pääurakoitsija #4 (30min)
- H7: Suunnittelupäällikkö, pääurakoitsija #5 (90min)
- H8: Tuotantoinsinööri, pääurakoitsija #5 (60min)
- H9: Rakentamisen tuotantotalouden professori (60min)
- H10: Rakentamisen tuotantotalouden professori (60min)
- H11: Rakentamisen tuotantotalouden tutkija (60min)
- H12: Rakentamisen johtamisen tutkija (60min)

Toisessa vaiheessa tulosten pohjalta luotiin tahtituotantoprosessi, jonka nähtiin soveltuvan käytettäväksi myös Suomen korkean rakentamisen kontekstissa. Lisäksi työryhmän alustavan palautteen pohjalta luotiin neljä erilaista tapausesimerkkiä, jotka auttoivat havainnollistamaan tahtisuunnittelun erilaisia vaihtoehtoja yksinkertaistetussa tilanteessa. Tahtituotannon malli sekä tapausesimerkit toimivat pohjana myös simulaatiomallin (kts. luku 5) luomisessa ja perustapausten määrittämisessä. Kolmannessa vaiheessa mallia validoitiin ja jatkokehitettiin työryhmän palautteen pohjalta. Tähän vaiheeseen kuului kaksi työryhmän työpajaa, jossa mallia esiteltiin sekä jatkokehitettiin Suomen korkeaan rakentamiseen soveltuvaksi.

3.4 “Miksi tahtituotantoa” – hyödyt korkeassa rakentamisessa

”Korkea rakentaminen on peruseriaatteiltaan hyvin samanlaista kuin muukin rakentaminen”

Haastateltavat olivat yhtä mieltä siitä, että korkea rakentaminen ei prosessitasolla juurikaan eroa ”matalasta” rakentamisesta. Korkea rakentaminen tarjoaa kuitenkin erinomaiset

mahdollisuudet hyödyntää skaalautuvuutta edukseen, kunhan keskeiset pullonkaulat, kuten materiaalien ja ihmisten virtaus, on erityisesti huomioitu: (tahti)tuotannon rytmiin päästään usein vasta 4-5 kerroksen jälkeen, eikä tämän jälkeistä tasaista tekemistä ehditä matalissa rakennuksissa saavuttaa. Työpajoissa kuitenkin muistutettiin, että korkea rakentaminen eroaa matalammasta rakentamisesta kuitenkin käytännössä huomattavasti, ja samojen periaatteiden soveltaminen korkeaan rakentamiseen saattaa olla korkeaa rakentamista aloitteleville yrityksille haastavaa ennen kuin oppia on kertynyt.

”Tehokas korkea rakentaminen edellyttää teollisia prosesseja ja ratkaisuja”

Teollisten prosessien sekä lean-menetelmien (kuten tahtituotannon) hyödyntäminen nähtiin sekä haastateltavien että työpajojen osallistujien mielestä keskeiseksi korkean rakentamisen onnistumistekijäksi. Perinteiset urakka- ja sopimusmuodot eivät tue yhteistoiminnallisuutta, vaikka pidettiin selvänä, että toteuttavien osapuolten tiivis osallistaminen sekä suunnittelu- että tuotannosuunnitteluvaiheessa on välttämätöntä. Esimerkiksi pääurakoitsijan tietotaito rakennettavuudesta ja kustannuksista yleissuunnitteluvaiheessa tai hissitoimittajan ja logistiikkaurakoitsijan osaaminen tuotannosuunnitteluvaiheessa on kriittistä ottaa huomioon, jotta tehokas tuotanto on mahdollista. Myös teolliset logistiikkaratkaisut (kuten keskitetty logistiikka, jossa materiaalinhallinta on erotettu arvoa tuottavasta työstä) sekä tahtituotanto nähtiin keskeisinä onnistumisen mahdollistajina.

”Tahtituotanto mahdollistaa tuotannon virtauksen parantamisen kokonaisuutena”

Yhtenä tahtituotannon keskeisenä etuna korkealle rakentamiselle on keskittyminen tuotannon kokonaisvirtauksen parantamiseen, yksittäisten työryhmien virtauksen ja osaoptimoinnin sijasta. Tätä ei aktiviteettipohjaisissa menetelmissä (kuten kriittisen polun menetelmä, CPM tai janakaavio) tai muissa sijaintipohjaisissa menetelmissä (kuten vinoviiva-aikataulutus) ole huomioitu. Vaikka hyvin tarkan tason tahtisuunnittelu vaatii paljon aikaa ja resursseja, olivat useimmat haastateltavat sitä mieltä, että tämä kuitenkin maksaa itsensä takaisin korkean rakentamisen skaalautuvuuden ansiosta, kun samaa toistuvaa prosessia voidaan hyödyntää kerroksesta toiseen. Tahtituotannon nähtiin antavan myös hyvän pohjan toteuttaa järjestelmällistä ja rytmitettyä toteutussuunnittelua sekä materiaalinhallintaa. Haastateltavat korostivatkin materiaalinhallinnan merkitystä, joka edistyksellisimmissä hankkeissa suunniteltiin jopa minuutin tarkkuudella. Joissain benchmarkatuissa hankkeissa materiaalinhallinnalle oli allokoitu oma tuotantoinsinööri. Erityisesti pystylogistiikan (hissien ja nosturien hallinta) nähtiin keskeisenä tuotannon virtauksen kannalta.

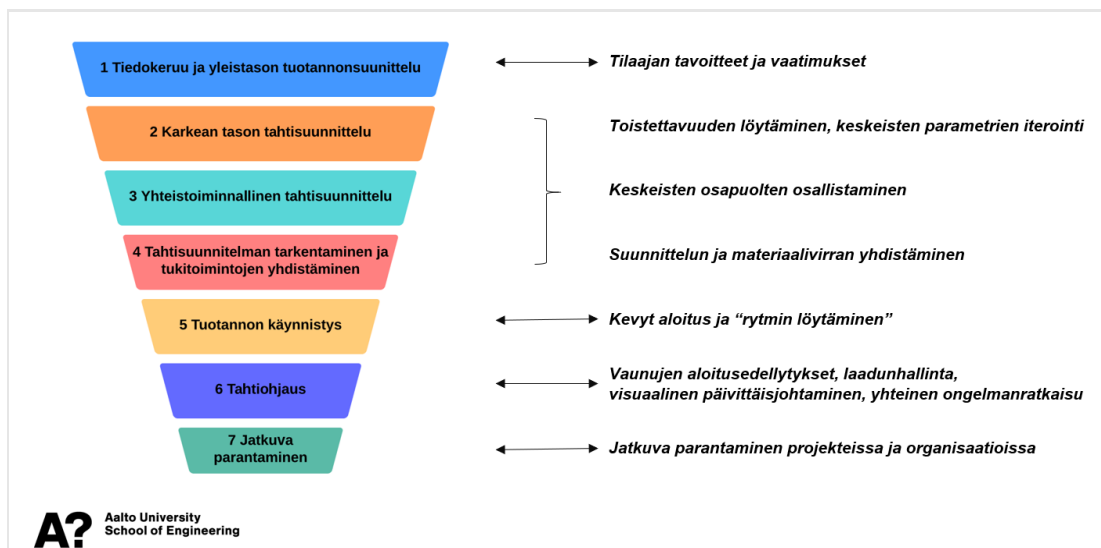
”Tahtituotanto mahdollistaa yhteistoiminnallisen tuotannon ohjauksen”

Myös tarkan tahtiohjauksen ja jatkuvan parantamisen todettiin olevan kriittistä erityisesti tuotannon alkuvaiheessa, jotta ensimmäisten kerrosten haasteet saadaan selätettyä nopeasti ja esitettyä niiden kasaantuminen tuotannon edetessä. Erityisesti jatkuva yhteistoiminta

pääurakoitsijan sekä keskeisten erikoisurakoitsijoiden (kuten runko-, hissi- ja tate-urakoitsijoiden) välillä on välttämätöntä tehokkaan tahtiohjauksen mahdollistamiseksi. Myös työpaikoissa todettiin, että ensimmäisten kokemusten pohjalta tahtituotanto voi tuoda huomattavia etuja myös erikoisurakoitsijoille. Kun tuotannon rytmi löytyy, erikoisurakoitsijoiden tuotannonhallinta on ennakoitavampaa ja tasaisempaa, jolloin työtä päästään tekemään pienemmällä stressillä ja suuremmalla katteella. Tämä kuitenkin vaatii erikoisurakoitsijoiden aikaista sitouttamista sekä motivaatiota tehdä tahtituotantoa.

3.5 “Miten tahtituotantoa” – prosessimalli korkeaan rakentamiseen

Kirjallisuuskatsauksen, benchmarkkauksen, työpajojen sekä edellisvuoden tahtitutkimuksen pohjalta luotiin seitsemänosainen prosessimalli (kuva 5), joka soveltuu tahtituotannon toteuttamiseen erityisesti korkeassa rakentamisessa. Tahtisuunnittelu aloitetaan tilaajan tavoitteiden ja vaatimusten määrittelyllä, johon karkean tason tahtisuunnittelu sekä tuotannon kokonaisvirtauksen optimointi pohjautuvat. Tahtisuunnitelmaa tarkennetaan yhteistoiminnallisesti ja keskeisiä suunnitteluparametreja (tahtivaunut, tahtialueet, tahtiaika, resursointi) iteroidaan tuotanto-osapuolten kanssa. Myös materiaaliveirto ja suunnittelun informaatioliveirto yhdistetään tahtisuunnitelman rytmiin. Tahtiohjaus aloitetaan kevyemmällä tuotannon rytmillä, jossa fokus on yhteisen tahdin löytämisessä sekä isoimpien virheiden löytämisessä ja korjaamisessa. Itse tahtiohjauksessa keskiössä ovat työtehtävien aloitusedellytysten varmistaminen vaunuttaen, tahditettu laadunhallinta, sekä visuaalinen päivittäisjohtaminen ja ongelmanratkaisu. Lopuksi, tahtituotannon koko potentiaali saavutetaan sekä hankkeiden sisällä että välillä tapahtuvalla jatkuvalla parantamisella.



Kuva 5: tahtituotannon prosessimalli korkeaan rakentamiseen

3.6 Tapausesimerkit tahtisuunnittelun havainnollistamiseksi

Tahtituotannon prosessin lisäksi luotiin neljä tapausesimerkkiä, jotka auttoivat havainnollistamaan tahtisuunnittelun erilaisia vaihtoehtoja yksinkertaistetun esimerkin kautta (kuva 6). Tapausesimerkit käsittävät pääasiassa tahtiprosessin vaiheet 1-2, joissa keskeisimmät ison kuvan päätökset liittyen tuotantosysteemin rakenteeseen tehdään. Tapausesimerkit luotiin alustavasti workshoppien keskustelun pohjustukseksi, mutta ne toimivat myös havainnollistavina esimerkkeinä kehitetystä prosessista.

Jokaisessa neljässä tapausesimerkissä tehtiin seuraavat, yksinkertaistavat oletukset:

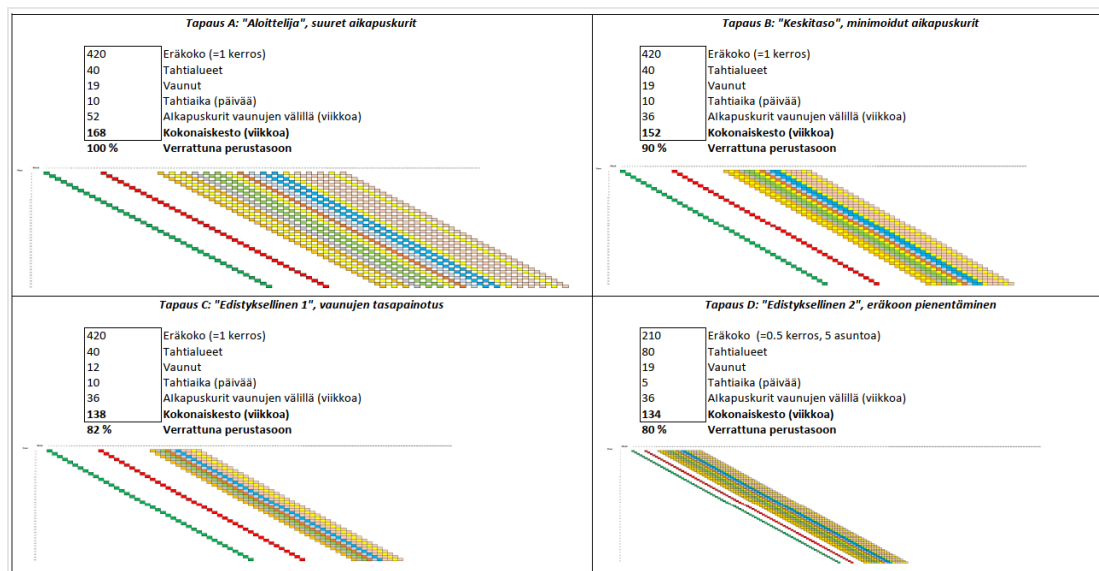
- **40-kerroksinen asuinrakennus, jossa kerrokset ja asunnot toistuvat samanaikaisesti**
- **Jokaisessa kerroksessa 10 asuntoa**
- **Tahtisuunnitelmaan kuuluu yksinkertaistetut runko & julkisivuvaiheet, sekä sisä- ja luovutusvaiheet (asunnoista vain kuivat tilat, märkätilat esim. moduuleina).**
- **Vaatimuksena 5 kerroksen puskuri runko-, julkisivu- ja sisävaiheiden välillä**

Tapaus A kuvaa perustason tahtisuunnitelmaa, jossa työ on tasapainotettu suurilla aikapuskureilla. Soveltuu tahtituotantoa ensimmäisiä kertoja soveltavalle hankkeelle, jossa ei ole välttämättä valmiuksia tehokkaalle tahtiohjaukselle ja/tai tukitoimintojen tahdittamiselle. Hankkeen kokonaiskesto on 168 viikkoa.

Tapaus B kuvaa keskitason tahtisuunnitelmaa, jossa aikapuskureita on vähennetty selkeästi. Tämä mahdollistetaan tehokkaalla tahtiohjauksella, kun työryhmät sekä materiaali- ja informatiovirrat saadaan pysymään pääsääntöisesti tahdin rytmissä. Toteutus vaatii yhteistoiminnallisuutta osapuolten kesken sekä tahtisuunnittelussa että -ohjauksessa. Kokonaiskesto on -10% alkuperäisestä.

Tapaus C kuvaa edistyneistä tahtisuunnitelmaa, jossa aikapuskureiden vähentämisen lisäksi sisävaiheen tehtäviä on yhdistetty vaunujen sisälle työpaketteja tasapainottamalla, jolloin vaunumäärä selkeästi pienenee. Tämä mahdollistetaan hyvin tarkan tason vaunukohtaisella tahtisuunnittelulla sekä tasapainotuksella, jolloin tahtialueen käyttöastetta voidaan nostaa huomattavasti. Toisaalta tällöin myös työryhmälle varattu tila tahtialueella vähenee; vaunujen yhdistämisen ytimessä on vaunujen hyvin tarkka tarkastelu sen suhteen, mitä töitä voidaan tehdä tahtialueella limittäin (esim. asunnoittain) tai jopa samanaikaisesti. Tämän tason tahtisuunnitelma vaatii erikoisurakoitsijoiden tiivistä osallistamista tahtisuunnitteluun sekä -ohjaukseen. Kokonaiskesto on noin -20% alkuperäisestä.

Tapaus D kuvaa vaihtoehtoista edistysellistä tahtisuunnitelmaa, jossa eräkö on puolitettu kerroksesta puoleen kerrokseen. Ideologia on sama kuin tapaus C:ssä, mutta sen sijaan että tehtäviä yhdistettäisiin vaunujen sisällä, pilkotaan itse vaunukokonaisuuksia pienempiin osiin. Kuten tapaus C:ssäkin, tämä vaatii huomattavan tarkan tason yhteistoiminnallista tahtisuunnittelua ja -ohjausta, jotta työryhmien törmäyksiltä vältytään. Kokonaiskesto on noin -20% aluperäisestä.



Kuva 6: Tahtisuunnittelun tapausesimerkit

On hyvä huomata, että esitetyt tapaukset ovat vain karkeita esimerkkejä. Kun ylimääräisistä aikapuskureista on päästy eroon, se, onko vaunumäärän vähentäminen tai eräkoon pienentäminen järkevää, tulee aina määritellä tilannekohtaisesti – ideaalitalanteessa hyödynnetään monia keinoja, jolloin paras ratkaisu voikin löytyä näiden kahden ratkaisun välimaastosta. Vaikka esitetyt tapaukset mahdollistavat toinen toistaan lyhyemmän kokonaiskeston ja paremman tuotannon virtauksen sekä prosessin läpinäkyvyyden, vaativat ne toimiakseen kuitenkin intensiivistä tahtisuunnittelua ja -ohjausta, joka onnistuakseen vaatii usein jonkintasoista kokemusta tahtituotannon soveltamisesta. Tämän vuoksi ensimmäisissä hankkeissa voi olla järkevää soveltaa aluksi esimerkiksi tapaus B:n tyylistä tahtiaikataulua, ennen siirtymistä tahtiaikatauluun, joka vaatii tarkemman tason ohjausta ja enemmän yhteistoimintaa ja yhteensovittamista kumppanien kanssa.

Yhteistoiminnallisen ja iteratiivisen tahtisuunnittelun luonteen lisäksi tapausesimerkit havainnollistavat pullonkaulatehtävien merkittävää roolia kokonaiskeston kannalta. Vaikka hankkeen kokonaiskesto on helppo vaikuttaa muuttamalla tahdin parametreja, ei eräkoon pienentäminen kuitenkaan aina järkevää, varsinkaan jos pullonkaulatehtävät luovat esteen hankkeen nopeuttamiselle. Esimerkeissä vakionopeuksiset runko- ja julkisivuvaiheet muodostivat pullonkaulan, eikä eräkoon pienentäminen tapaus D:sta esimerkiksi päivän tahtiaikaan ja asunnon tahtialueeseen juuri lyhentänyt kestoja. Haastatteluissa kuitenkin todettiin, että kokeneiden

korkean rakentamisen urakoitsijoilla esimerkiksi rungon kiertoaikaa on mahdollista lyhentää jopa 50-70% (3-4 päivää verrattuna 9-10 päivään), jonka jälkeen pullonkaulaksi saattavatkin muodostua sisävaiheen tehtävät.

Pullonkaulatehtävien, käsillä olevien resurssien sekä kyvykkyyden suorittaa tahtituotantoa lisäksi myös tilaajan vaatimusten tulisi ohjata tahtisuunnittelua. Eräkoon pienentäminen ja pullonkaulatehtävien nopeuttaminen saattaa lyhentää hankkeen kestoa, mutta näin tehtäessä tulisi myös harkita, tuottaako keston lyhentäminen asiakkaalle arvoa, ja onko tämä valmis maksamaan sen eteen tarvittavista toimenpiteistä.

3.7 Yhteenveto

Yhteenvetona, aikaisempi kirjallisuus, haastattelut sekä työpajat kaikki viittaavat tahtituotannon suureen potentiaaliin korkean rakentamisen tehostamisessa. Tahtituotannon tarkka, tasapainoiseen tuotantosuunnitelmaan pyrkivä tahtisuunnittelu on omiaan tukemaan korkean rakentamisen toistuvaa tuotantoa, samalla kun intensiivinen tahtiohjaus tukee työryhmien välistä yhteistoiminnallisuutta sekä yhteistä tuotannon rytmin löytämistä. Seuraava askel onkin ottaa esitetty prosessimalli käyttöön korkean rakentamisen hankkeessa, ja tarkentaa mallin ta-soja sekä käytännön sovelluksen että tietokonesimulaatioiden avulla.

4. Korkean rakentamisen logistiikka

Tahtituotantomallia kehitettäessä yhtenä avainhaasteena korkean rakentamisen aggressiivisessa aikataulutuksessa nähtiin materiaalien ja työvoiman liikkuminen korkeassa rakentamisessa. Tutkimmekin hankkeessa erikseen korkean rakentamisen logistiikkaa havainnoimalla ja mittaamalla logistiikan toimivuutta suomalaisessa korkean rakentamisen kohteessa. Hankkeessa logistiikkapalvelu ja logistiikkatyöntekijät oli ulkoistettu eri yrityksille. Logistiikkapalvelun toimittaja oli vastuussa materiaalien siirtojen organisoinnista ja logistiikkakeskuksen toiminnasta. Logistiikkatyöntekijät eri yrityksestä tekivät varsinaiset siirrot. Vaikka pääosa hankkeen materiaaleista tulikin logistiikkakeskuksesta, osa urakoitsijoista toimitti ja haalasi omat materiaalinsa.

Mittaukseen käytettiin iCONS -sisäpaikannusjärjestelmää (Zhao ym. 2019). Havainnointia tehtiin kolmen kuukauden aikana. Lisäksi haastateltiin logistiikkatyöntekijöitä ja materiaalivirrasta vastaavia henkilöitä logistiikkapalvelun toimittajalta. Työmaalla tapahtuvaa tutkimusta haittasi COVID-19 epidemian puhkeaminen työmaan aikana. Tästä syystä esimerkiksi sisäpaikannus rajautui vain muutamaaan testikerrokseen, joihin järjestelmä oli ehditty asentaa ennen epidemian puhkeamista. Havainnoinnille ei myöskään ollut suunnitellussa laajuudessa edellytyksiä projektin vierailijarajoitusten takia.

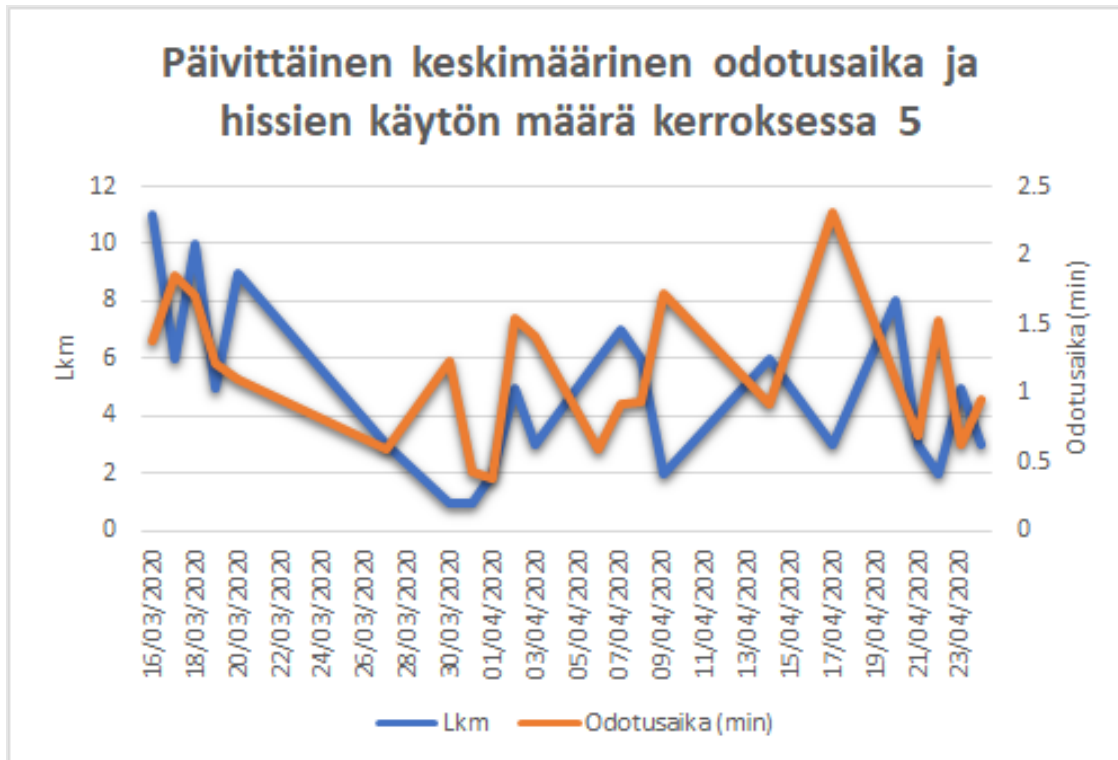
Logistiikan havainnoinnissa havaittiin useisiin muihinkin rakennushankkeisiin liittyviä haasteita. Suunnittelumallin määrätiedot eivät ole materiaaliluettelon (Bill of Materials) tasolla, mikä johtaa materiaalitarpeiden yliarviointiin ja ylimääräisiin siirtoihin työmaalla. Korkean rakentamisen kohteessa lisääntynyt materiaalin käsittely johtaa hissien tarpeettomaan käyttöön, mikä hankaloittaa myös ihmisten liikkumista. Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä tarpeettomista siirroista. Taulukosta voi havaita, että yli jääneitä materiaaleja kuljetetaan kerroksesta toiseen tai takaisin kerroksista varastoalueelle (taulukon “under the bridge”).

Taulukko 2: Tarpeettomia materiaalisirtoja kerroksista takaisin varastoon

Date	Material	Quantity	Unit	From	To	Moving time (h)	Workers
3.2.2020	HB Priima 88	63	piece	Under the bridge	6.krs sauna area	0,5	2
4.2.2020	Leca -harkko	11	piece	10.krs	18.krs	0,2	2
4.2.2020	Leca -harkko	11	piece	10.krs	20.krs	0,2	2
4.2.2020	ML Leca	1	piece	7.krs	18.krs	0,2	2
4.2.2020	ML Leca	1	piece	7.krs	19.krs	0,2	2
4.2.2020	ML Leca	1	piece	7.krs	20.krs	0,2	2
6.2.2020	ML Leca	137	piece	9.krs	Under the bridge	0,5	2
6.2.2020	ML Leca	2,5	bag	10.krs	Under the bridge	0,2	2
6.2.2020	ML5	2,5	bag	10.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	Kahitiiliä	7	piece	10.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	OL15	500	kg	10.krs	Under the bridge	0,2	2
6.2.2020	Leca-harkko	33	piece	10.krs	Under the bridge	0,2	2
6.2.2020	HB Priima ohutsaun	1	bag	10.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	OL15	2,5	bag	9.krs	Under the bridge	0,2	2
6.2.2020	ML Leca	6,5	bag	9.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	ML5	7,5	bag	9.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	S30	25	kg	8.krs	Under the bridge	0,1	2
6.2.2020	ML Leca	3,5	bag	7.krs	Under the bridge	0,2	2
6.2.2020	ML5	5	bag	7.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	OL15	3	bag	7.krs	Under the bridge	0	2
6.2.2020	S30	25	kg	7.krs	Under the bridge	0	2
7.2.2020	HB Priima 88	69	piece	13.krs	Under the bridge	0,5	2
7.2.2020	HB Priima 88	76	piece	14.krs	Under the bridge	0,5	2
7.2.2020	HB Priima 88	86	piece	15.krs	Under the bridge	0,5	2
12.2.2020	HB Priima 88	96	piece	16.krs	Under the bridge	0,5	2
12.2.2020	HB Priima 88	144	piece	17.krs	Under the bridge	0,5	2
13.2.2020	HB priima	20	piece	6.krs	Under the bridge	0,2	2
2.3.2020	Weber B100	4	bag		1 floor up	1	2

Sisäpaikannus

Sisäpaikannuksen avulla arvioitiin logistiikkatyöntekijöiden käyttämän hissin odotusaikoja pohjakerroksen ja viidennen kerroksen välillä. Keskimääräinen hissin odotusaika oli normaalin päivänä 1-2 minuutin välillä ja logistiikkatyöntekijät käyttivät hissiä 1-11 kertaa päivässä (Kuva 7). Sisäpaikannuksen osalta tuloksia ei kuitenkaan saatu COVID-19 pandemian takia riittävästi johtopäätösten tekemiseen, koska seurannassa ollut hissi oli käytössä vain materiaalien haalaukseen. Pystylogistiikan ja odotusaikojen analysointi sisäpaikannuksella osoittautui kuitenkin mahdolliseksi, joten tutkimusta voidaan jatkaa COVID-rajoitteiden loputtua tulevissa korkean rakentamisen kohteissa.



Kuva 7. Päivittäiset keskimääräiset odotusajat ja logistiikkatyöntekijän hissien käyttö (kerta per päivä)

Havainnoinnista opittua

Materiaalin liiallinen kuljetus työkohteisiin on tyypillinen rakennusalan ongelma. Lähtökohdista on varmistaa se, että materiaali ei lopu kesken. Korkean rakentamisen kohteessa pystylogistiikka on kuitenkin haastavampaa, joten turhaa materiaalin siirtelyä pitäisi välttää. Tarkempiin materiaaliluetteluihin onkin syytä panostaa.

Materiaalin ja työntekijöiden käyttämien hissien on syytä olla erillisiä. Hissit tarvitsevat myös jatkuvaa huoltoa. Materiaalin siirtoihin varatun hissien rikkoutuminen johtaa henkilöliikenteen merkittävään hidastumiseen. Haastatellut aliurakoitsijoiden työntekijät kertoivat joutuvansa usein odottamaan hissiä yli 10 minuuttia ennen siirtymistä työkohteeseen.

Vaikka havainnoinnin ja sisäpaikannuksen tulokset jäivät COVID-19 epidemian takia laihoiksi, niistä saatu ymmärrys antoi lähtölaukauksen korkean rakentamisen simulointimallille, joka kehitettiin hankkeen loppuvaiheessa.

5. Korkean rakentamisen simulointimalli

Koska empiiristä tutkimusta työmailla ei päästy tekemään suunnitellussa laajuudessa, ohjausryhmä päätti rahoittaa tohtorikoulutettava Alaa Al Barazin tutkimusta, jossa hyödynnetään simulointimalleja rakentamisen tutkimuksessa. Alaa kehitti hankkeessa alustavan korkean rakentamisen simulointimallin, jota voidaan hyödyntää, kun arvioidaan pystylogistiikan vaihtoehtojen vaikutusta tuottavuuteen. Hankkeen aikana mallia sovellettiin kuvitteelliseen case-esimerkkiin, jonka tuloksia käytiin läpi työpajoissa. Hankkeen jälkeen mallia on sovellettu todellisiin konsortion yritysten hankkeisiin ja sitä on jatkokehitetty hankkeiden palautteen pohjalta.

Rakennustuotanto on varsin monimutkainen prosessi, jossa päätöksenteko on varsin hajautettua asentajatasolle. Vaikka tuotantoa ohjataan erilaisilla aikatauluilla, aiemmassa Building 2030 tutkimuksessa on noussut esille työryhmien ja yksittäisten asentajien tärkeä rooli työmaan päätöksenteossa (Seppänen ym. 2020). Tilannekuva rakentamisessa syntyykin osittain asentajien ja nokkamiesten tasolla ja työtä koordinoidaan myös epämuodollisesti. Tällaista järjestelmää on vaikeaa optimoida matemaattisesti, koska jokainen järjestelmän osa tekee myös itsenäisesti päätöksiä siitä, mitä tehdä seuraavaksi.

Simuloinnissa käytetään todellista prosessia yksinkertaistavaa mallia, joka kuitenkin toimii olennaisilta osin todellista prosessia vastaavalla tavalla. Simulointimalleilla voidaan arvioida järjestelmän toimintaa erilaisissa olosuhteissa tai eri lähtötiedoilla. Näin voidaan arvioida eri muuttujien merkitystä, arvioida suorituskykyä tai tehdä päätöksiä.

Hajautetun työnsuunnittelun projektin tulosten perusteella simulointimenetelmäksi valikoitui agenttipohjainen simulointi. Agenttipohjaisessa simuloinnissa mallinnus tehdään yksittäisen ”agentin” (toimijan, esimerkiksi sähköasentaja) tasolla ja mallinnetaan päätökset ja olosuhteet yksittäisen asentajan näkökulmasta. Näin tarkka mallinnus vaatii paljon laskentakapasiteettia, joten aiemmin simulaatiot on yleisemmin toteutettu karkeammalla tasolla, esimerkiksi simuloinnilla tehtävien kestojen avulla koko projektin suorituskykyä. Laskentateho on kuitenkin kasvanut riittävästi, joten päädyimme agenttipohjaisen menetelmän käyttöön.

Seuraavassa kuvaamme pääpiirteissään simulointimenetelmän ja simuloinnissa huomioon otetut olosuhteet ja päätökset. Tarkkoja kaavoja tai laskelmia ei tässä raportissa ole syytä esittää mutta niistä tehdään erillisiä tieteellisiä julkaisuja, jotka ilmestyvät aikanaan Building 2030 – verkkosivuille niistä kiinnostuneille. Konsortion ohjausryhmätason jäsenet voivat hyödyntää simulointimallia omissa hankkeissaan.

5.1.1 Mallinnettava ongelma

Korkean rakentamisen tuottavuuteen vaikuttaa olennaisesti pystylogistiikka eli työvoiman ja materiaalien kuljetus oikeaan kerrokseen. Nostokalustolla voi olla merkittävä vaikutus aikatauluun, koska se rajoittaa työhön käytettävissä olevaa aikaa ja voi viivyttää resurssien siirtymistä

työkohteesta toiseen. (Park et al., 2013; Jung et al., 2017). Jos siirtymiseen kerroksesta toiseen kestää liian kauan, tuottavaan työhön käytettävissä oleva aika vähenee. Toisaalta materiaalien pitää saapua oikeaan aikaan kerrokseen tai työntekijät joutuvat odottamaan materiaalien toimitusta. Korkeassa rakentamisessa nämä vaikutukset kertaantuvat, joten työmaahissien määrällä on merkittävä vaikutus rakentamisen viiveisiin.

Ratkaisuja on esitetty paljon aiemmassa tutkimuksessa. Esimerkiksi hissin palvelemien kerrosten rajoittaminen on tehokas tapa optimoida nostokalustoa. Tässä menetelmässä työntekijöiden virtausta ohjataan ohjaamalla samoihin kerroksiin menossa olevat matkustajat samoihin hisseihin (Barney and Al-Sharif, 2015). Käytännössä hissit jaetaan alueisiin siten, että tietyt hissit palvelevat tiettyjä alueita. Haasteena on valvonta. Tarvitaan joko automaattinen järjestelmä tai hissien kuljettajat, jotka varmistavat, että säännöistä pidetään kiinni (Jung et al., 2017). Lisäksi eri rakentamisen vaiheet tarvitsevat eri strategioita, kun liikenne lisääntyy ja muuttuu luonteeltaan projektin edetessä. Tämän takia on tärkeää voida simuloida eri tilanteita etukäteen, koska yhteen tilanteeseen optimoitu järjestelmä harvoin toimii läpi hankkeen.

Kehitetyssä mallissa resurssien virtaus hankkeessa mallinnettiin resurssien kautta. Mallinnetut resurssit olivat hissejä, työntekijöitä, tiloja ja materiaaleja. Työntekijät pyrkivät noudattamaan tahtiaikataulua ja pääsemään omaan työkohteeseensa käytettävissä olevia hissejä käyttämällä tai menemällä portaita, jos siirryttävien kerrosten lukumäärä oli pieni. Lisäksi mallissa otettiin huomioon taukotilat, WC-tilat ja niiden kapasiteetti ja työntekijöiden pitämät tauot. Kukin asentaja mallinnettiin yksittäisenä toimijana, jolla oli tarpeen mukaan pyrkimys päästä johonkin paikkaan (esim. tahtiaikataulun mukaiseen kerrokseen tai taukotilaan). Simuloinnilla voidaan tutkia odotusaikoja ja käyttöasteita esimerkiksi tilanteessa, jossa hissejä lisätään tai hissi rikkoutuu tai lisätään taukotiloja useampaan kerrokseen. Lisää esimerkkejä mahdollisista tutkittavista strategioista on esitetty taulukossa 3.

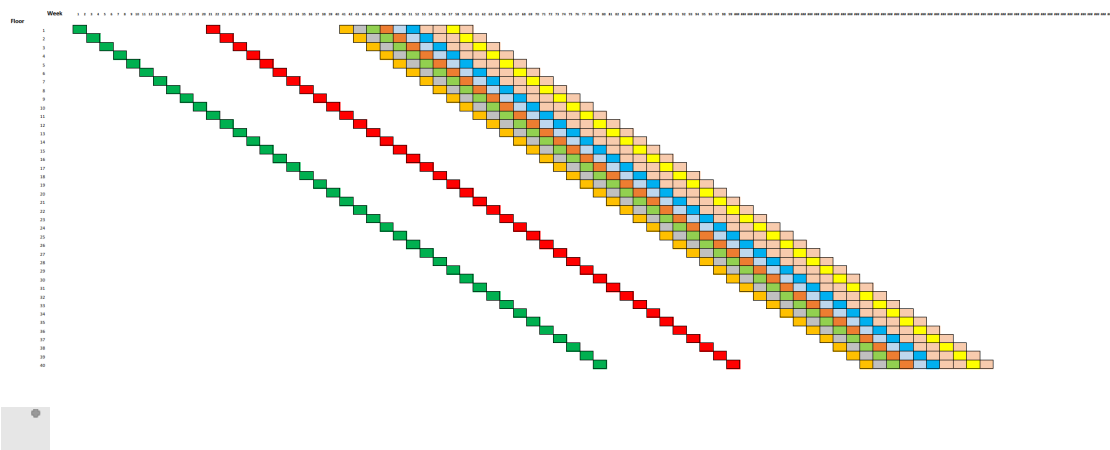
Taulukko 3: Simulaatiossa muutettavissa olevia parametreja

ID	Parametri	Selite
1	Hissien määrä ja tyyppi	Käytössä olevien hissien määrä valittuna ajankohtana
2	Hissien palvelualue	Kerrokset, joita hissi palvelee (erikseen kullekin hissille)
3	Hissien säännöt	Esim. Ylemmäs menevät henkilöt korkeammalla prioriteetilla
4	Hissin ominaisuudet	Kapasiteetti (henkilöä), nopeus
5	Hissien käyttötarkoitus	Materiaalit/logistiikka tai henkilöliikenne tai molemmat
6	Materiaalien siirrot	Osana runkokiertoa, viikonloppuisin, työaikoina, työaikojen ulkopuolella
7	Taukotilojen sijainnit	Esim. Joka 5. kerros, joka 10. kerros tai vain työmaatoimistossa
8	Hissien tilaamisen säännöt	Yksi tilausnappi per hissi tai yhdistetyt tilaukset
9	Käänteinen logistiikka	Miten jätteet poistetaan?
10	Materiaalien varastointi	Missä kerroksissa voi varastoida materiaaleja?
11	Simuloitava kerros: esim 10,30,50,70 krs	Määritellään ylimmän tahtivaunun mukaan (= runko)
12	Esivalmistus: esim. Kylpyhuonemoduulit	Vähemmän työvaiheita tahtiaikatualussa

5.1.2 Testisimuloinnit: lähtötiedot ja testatut skenaariot

Hankkeen aikana tavoite oli kehittää simulointimalli ja esittää sen pohjalta laskettuja tuloksia, jotta voidaan selvittää, antaako lähestymistapa järkeviä tuloksia. Käytettäviä parametreja ja muuttujia käytiin läpi tutkimushankkeen työryhmissä. Simulointia käytettiin arvioimaan useita eri strategioita, kuten hissien määriä ja sijainteja, taukotilojen sijaintia ja materiaalien siirron vaikutuksia.

Hankkeena käytettiin kuvitteellista 40-kerroksista hanketta, jonka tahtialueena oli yksi kerros. Kerrosten läpi meni 12 työvaihetta kymmenen päivän tahtiajalla. Aikataulu on esitetty kuvassa 8. Kullekin vaunulle oli määritelty työryhmän koko ja tarvittavat materiaalsiirrot (montako pystysiirtoa per tahti).



Kuva 8 Simuloidun 40-kerroksisen hankkeen tahtiaikataulu

Simuloinnissa mallinnettiin työkohteet, varastoalueet, hissit ja taukotilat. Työntekijät noudattivat TES:n mukaisia virallisia kahvitaukoja ja lounastaukoja kuitenkin siten, että kunkin henkilön tarkka tauon aloitusaika ja kesto vaihtelivat satunnaisesti keskiarvojen ympärillä. Esimerkiksi lounastauko oli keskimäärin 30 minuuttia mutta lyhimmillään 25 minuuttia ja pisimmillään 45 minuuttia. Vastaavalla tavalla taukoja ja työpäivän alkua muutettiin yksilöllisesti kulakin simulaatioajolla, jotta kaikki eivät pyri hisseihin täsmälleen samaan aikaan.

Testiajoissa testattiin taukotilojen sijaintia (joka 5. kerros / joka 10. Kerros / vain työmaatoimistossa), hissien lukumäärien ja sääntöjen vaikutusta ja ylimmän vaunun kerroksen vaikutusta kokonaistehokkuuteen.

5.1.3 Testisimulointien tulokset

Hankkeessa määriteltiin kaksi olennaista mittaria pystylogistiikan tehokkuuden arvioimiseksi. Ensimmäinen mittari on järjestelmän viive (system latency). Järjestelmän viive on keskimääräinen aika työntekijän päätöksestä siirtyä toiseen kerrokseen (esim. tauolle tai työkohteeseen) siihen, että työntekijä pääsee haluamaansa kerrokseen. Iso järjestelmän viive voi heikentää työmotivaatiota tai johtaa erimielisyyksiin, kun työntekijät kokevat käyttävänsä liian ison osuuden päivittäisestä työajasta hissien odotteluun. Toinen olennainen mittari on käyttöaste eli kuinka ison osuuden työpäivästä työntekijät ovat aikataulun mukaisessa työkohteessa.

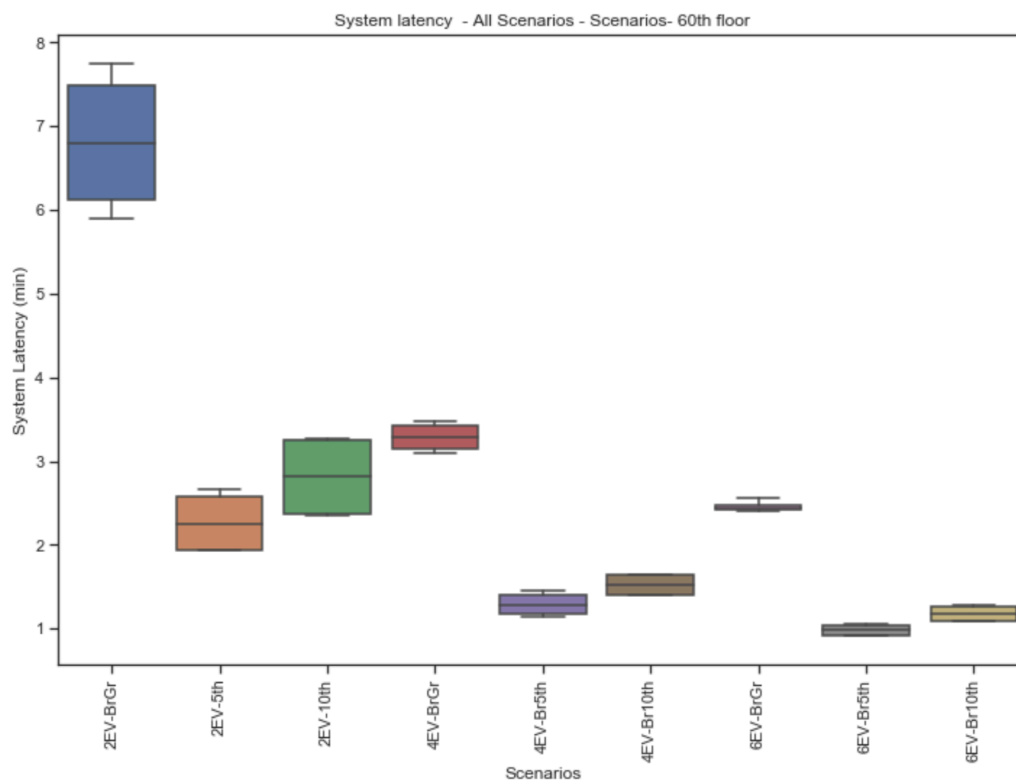
Simuloinnit toteutettiin seuraaville parametreille:

- **Hissien lukumäärä: 2,4 tai 6**
- **Taukotilojen sijainnit: vain työmaatoimisto, joka 5.kerros ja joka 10.kerros**
- **Ylimmän vaunun kerros: 20.kerros, 40.kerros ja 60. Kerros**

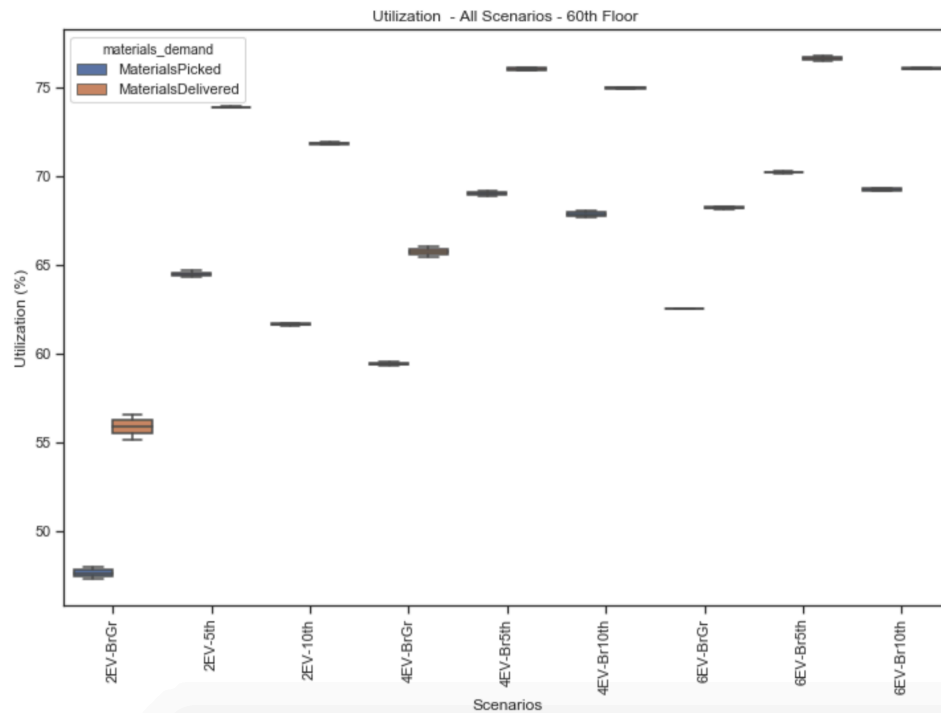
Parametreista tulee kaikkiaan 27 yhdistelmää, joita kutakin arvioitiin keskiarvoina yhden työviikon mittaisella simulointijaksolla. Alla olevissa tuloksissa skenaariot on nimetty kertomalla ensin hissien lukumäärä (esim. 2EV) ja sitten taukotilojen kerrokset (Br5th = joka 5 kerros).

Esimerkiksi 4EV-BrGr on skenaario, jossa on neljä hissiä ja taukotila vain pohjakerroksessa. Samalla tavalla on nimetty kaikki strategioiden yhdistelmät.

Järjestelmän viive vaihteli skenaarioiden välillä yhdestä minuutista korkeintaan kahdeksaan minuuttiin. Suurin osa työntekijöistä pääsi haluamaansa kohteeseen alle minuutissa. Simuloinnin antamat käyttöasteet vastasivat työryhmän kokemuksia ja olivat 40% - 70% eri skenaarioissa. Kuten odotettua, kerroksia lisättäessä järjestelmän viive kasvaa. Suurin viive tuli ajosta, jossa runkoasennus oli 60. kerroksessa, rakennuksessa oli vain kaksi hissiä ja taukotilat olivat vain pohjakerroksessa. Mielenkiintoinen tulos oli, että taukotilojen sijoittaminen kerroksiin vaikutti viiveeseen enemmän kuin hissien lisääminen (Kuva 9). Vastaavasti käyttöasteet laskivat olennaisesti, kun taukotilat olivat vain pohjakerroksessa (kuva 10).



Kuva 9 Järjestelmän viive rungon ollessa 60 kerroksessa eri skenaarioissa



Kuva 10 Käyttöaste eri skenaarioissa rungon ollessa 60. kerroksessa

5.1.4 Johtopäätökset

Simulointimallilla voitiin ennustaa korkean rakentamisen logistiikan suorituskykyä eri skenaarioissa. Mallin oletukset todettiin tutkimushankkeen työryhmässä järkeviksi ja niitä kehitettiin hankkeen aikana eteenpäin saadun palautteen kannalta. Mallin antamat tulokset olivat työryhmältä saadun palautteen perusteella suuruusluokaltaan oikeita. Simulointeja ei vielä käytetä laajasti rakentamisen päätöksenteossa mutta tämäntyyppiset simulointimallit voivat auttaa, kun tehdään päätöksiä työmaanaikaisista hisseistä ja taukotiloista. Erityisesti taukotilojen suuri merkitys aiheutti työryhmässä keskustelua, koska niiden vaikutus osoittautui suureksi suhteessa muihin muuttujiin.

Hankkeen jälkeen simulointia on jo sovellettu kahdessa konsortion jäsenen todellisessa kohteessa ja sen pohjalta on tehty pystylogistiikkaan liittyviä päätöksiä. Tulokset julkaistaan myöhemmin tutkimusartikkeleissa. Jatkossa simulointimalliin pitäisi linkittää todellisen järjestelmän tilanne eli esimerkiksi älykkäät hissit tai paikannetut hissit jatkuvasti kertovat tilanteestaan mallille, joka päivittyy ja oppii järjestelmän toiminnan. Tällöin optimointia voidaan tehdä jatkuvasti, kun havaitaan järjestelmässä pullonkauloja. Näille jatkotutkimusaiheille olemme hakemassa rahoitusta Business Finlandilta ja EU:lta.

6. Kylpyhuone-elementit korkeassa rakentamisessa

Materiaalien siirtoa sisävalmistusvaiheessa voi vähentää siirtämällä mahdollisimman paljon kokoonpanoa pois työmaalta. Esivalmistusasteen nosto nousi myös kansainvälisessä tutkimuksessa olennaiseksi onnistumistekijäksi korkean rakentamisen kohteissa. Suomessa konsortion jäsenet ovat lisänneet esimerkiksi kylpyhuonemoduulien käyttöä asuntorakentamisessa. Korkean rakentamisen kohteissa niitä ei toistaiseksi vielä ole paljon käytetty, joten YIT:n Niko Timonen (2020) teki aiheeseen liittyen diplomityön.

Niko Timonen (2020) tutki diplomityössään kylpyhuone-elementtien (KPH-elementtien) asennusmenetelmien eroja korkeassa rakentamisessa läpimenoajan näkökulmasta. Lähtökohdaisesti tutkimus osoittaa, että kylpyhuoneiden asentaminen paikan päällä on hitaampaa (jopa kuukausia) mutta korkeassa rakentamisessa tulee paljon toistoja ja pystylogistiikka on haastavaa, joten työvaiheiden minimointi on tärkeää. Erityisesti runkokiertoa ei saisi tarpeettomasti hidastaa. Diplomityössä tutkittiin kolmen eri asennusmenetelmän soveltuvuutta korkean rakentamisen kohteisiin: kololaatta-asennus, kuiluasennus ja julkisivuasennus.

Menetelmistä kololaatta-asennusta ja kuiluasennusta on jo käytetty Suomessa. Niistä tietoa saatiin havainnoimalla kololaatta-asennusta työmaalla ja tehtaalla ja haastatteleamalla sekä työmaan että kph-elementtitehtaan henkilöstöä. Julkisivuasennuksesta ei toistaiseksi ole vielä kokemusta Suomessa, joten sen osalta tutkimus pohjautui julkisesti saatavilla oleviin dokumentteihin ja videoihin, erityisesti Yhdysvalloista.

Kololaatta-asennus

Kololaatta-asennus voidaan tehdä sekä ontelo- että massiivivälipohjaratkaisuihin. Kylpyhuone-elementit asennetaan runkovaiheen yhteydessä, jolloin pystylogistiikkaan käytetään usein samaa nosturia kuin runkoasennuksiin. Ontelolaattamenetelmässä kph-elementti laskeaan suoraan ontelolaatastossa valmiiksi madallettuun syvennykseen ja asennuspaloilla varmistutaan oikeasta korosta. Elementin liittyminen lopullisesti sitä ympäröivään kantavaan välipohjaan toteutetaan jälkivaluilla.

Paikalla valettuun välipohjaan asennus on työläämpää, koska se vaatii muutoksia levymuottitekniikkaan. Tarvittava syvennys voidaan toteuttaa muottitekniikalla (lisääntynyt muottityö, haastavaa) tai hyödyntämällä esivalmistettua pohjalaattaa kph-elementin alla. Tällöin pohjalaatta asennetaan muottityön jälkeen levymuotin päälle. Sen jälkeen kph-elementin asennus tapahtuu samalla tavalla kuin ontelolaattojen kanssa.

Tutkimuksessa havaittiin menetelmään liittyviä hyötyjä ja haittoja. Menetelmä soveltuu useiden eri runkorakenneratkaisujen kanssa ja on helppo asentaa. Vaikutus rakennuksen rungon

suunnitteluun on vähäinen (vaadittava syvennys ja tekniikkahormi). Suomessa on runsaasti kokemusta menetelmän käytöstä. Toisaalta asennusmenetelmä varaa nosturin ja kerroskohtaisen runkokiertoaika voi pitkittyä jopa yhdellä työvuorolla, kun kaikki asentamiseen liittyvät työvaiheet otetaan huomioon. Korkeissa rakennuksissa runkokierron lisäpäivä vaikuttaa kokonaislöpimenoaikaan merkittävästi. Reunavaluihin on liittynyt myös kuivumiseen liittyviä haasteita, mitkä saattavat viivyttää seuraavia työvaiheita.

Kuiluasennus

Kuiluasennusmenetelmässä elementit nostetaan ylhäältäpäin päällekkäiseksi torniksi runkovaiheessa tai sen jälkeen riippuen rakennuksen kerroskorkeudesta. Elementit lasketaan asennuskuilun kanssa ja asennetaan paikalleen kerroskohtaisesti järjestyksessä. Asennusaikana elementti tuetaan väliaikaisesti lattiarakenteeseen, kunnes tarvittavat tekniikkaliitokset on tehty. Sen jälkeen pohjalaatan ja lattiarakenteen välinen asennus valetaan betonimassalla yhtenäisen rakenteen muodostamiseksi.

Matalissa rakennuksissa elementit asennetaan usein kerralla mutta korkeissa rakennuksissa elementtejä voisi ajatella nostettavan esimerkiksi viiden – kahdeksan kerroksen välein pystylohkoissa. Tällöin tarvitaan väliaikainen vesikatto jokaisen asennuslohkon jälkeen, jotta asennetut elementit pysyvät säältä suojassa.

Menetelmä asettaa rungon suunnittelulle ja runkoratkaisuille vaatimuksia kantavaan välipohjaan jätetyn asennusaukon vuoksi, mutta ratkaisut ovat melko yksinkertaisia ja laajalti käytettyjä. Haasteena menetelmässä on sen suhteellinen uutuus ja käytännön kokemusten vähyys. Asennuskuilu voi mahdollisesti johtaa myös työturvallisuusongelmiin. Suomessa on vain kaksi elementtivalmistajaa, jotka valmistavat kuiluasennukseen soveltuvia kph-elementtejä. Yksittäisten elementtien asennus kestää kauemmin kuin kololaattamenetelmässä mutta etuna on se, että asennus voidaan tehdä runkokierron ulkopuolella. Toisaalta asennuskuilua voi hyödyntää rakennuksen kuivattamisessa tai työmaalogistiikassa.

Julkisivuasennus

Julkisivuasennusmenetelmää käytettäessä kph-elementit otetaan sisään auki jätetystä julkisivusta, joten se vähentää runkovaiheen aikana tehtyjä nostoja merkittävästi. Asennusmenetelmää voidaan käyttää useiden rakenne- ja välipohjaratkaisujen kanssa. Ainoa rajoittava tekijä on rakennuksen kerroskorkeus, jonka pitää olla riittävän suuri. Runkoratkaisun pitää olla sellainen, että julkisivu voidaan asentaa rungon ollessa nostettuna harjakorkeuteen. Tämän mahdollistaa esimerkiksi pilari-laatta- tai teräsrunkoratkaisut. Vaihtoehtoisesti julkisivuun jätetään koko rakennuksen korkeudelta yhdeltä linjalta julkisivuasennus tekemättä tai käytetään kerroskohtaisia väliaikaisia lastaustasoja.

Elementit nostetaan paikalleen erikoisvalmisteisella nostolavalla. Nostoihin voi käyttää torninosturia tai erillistä ajoneuvonosturia, jolloin se ei vaikuta muuhun nostologistiikkaan.

Kylpyhuone-elementti voidaan siirtää paikalleen kerroksessa esimerkiksi pumppukärryillä. Kun koko rakennuksen kph-elementtiasennus on valmistunut, julkisivu voidaan sulkea.

Suomessa menetelmästä ei ole vielä kokemusta korkeassa rakentamisessa mutta esimerkiksi Yhdysvalloissa menetelmää käytetään laajasti. Haasteena on esimerkiksi kynnyskorkeus mutta hyötyinä on nopea läpimenoaika, koska menetelmä mahdollistaa rungon häiriöttömän etene-
misen. Yhdysvaltaisen Weitz Companyn mukaan kylpyhuonemoduuleilla on voitu korkeassa rakentamisessa säästää jopa 15% työvoimakustannuksissa ja rakennusjäte on vähentynyt jopa 40%. Aikataulusäästö on Weitzin mukaan ollut 2-3 kk verrattuna korkean rakentamisen koh-
teeseen, jossa kylpyhuoneet rakennetaan paikan päällä.

Menetelmien ristiinvertailu

Taulukossa 1 on esitetty menetelmien vertailu. Diplomityön lopputuloksena Timonen (2020) päätyi suosittelemaan julkisivuasennusta myös suomalaisessa korkeassa rakentamisessa. Esi-
merkiksi asennuslattia voisi auttaa julkisivuasennuksen mahdollistamisessa. Tuloksia esitettiin hankkeen työpajassa. Työpajan osallistujista 44% piti julkisivuasennusta soveltuvimpana me-
netelmänä, 28% suosi kololaatta-asennusta ja 20% kuiluasennusta. 8% esitti jotain muuta asennustapaa. Työpajan osallistujien avoimet kommentit on koottu yhteen taulukossa 2.

Taulukko 1: Asennusmenetelmien soveltuvuus (Timonen 2020: 50-51)

<i>Tekijä</i>	<i>Case 1: Kololaatta- asennus</i>	<i>Case 2: Kuiluasennus</i>	<i>Case 3: Julkisivuasennus</i>
<i>Paikallavalurakentami- nen ja -rakenteet</i>	Soveltuu kohtalai- sesti, haasteena pohjalaatan ja - viemärien vaati- mat syvennykset.	Soveltuu, ei vielä paljon kokemuk- sia paikallavalura- kenteiden yhdistä- misestä.	Soveltuu, haasteena kynnyskorkeus (vaatii esimerkiksi asennuslattian), riittävä kerroskor- keus huomioitava.
<i>Soveltuminen muiden runkorakennejärjestel- mien kanssa</i>	Soveltuu ontelo- laatta- ja paikalla- valujärjestelmien kanssa.	Soveltuu ontelo-, superlaatta- ja paikallavalujär- jestelmien kanssa.	Soveltuu parhaiten esimerkiksi pilari- laatta runkoraken- nejärjestelmän kanssa.
<i>Rakentamisen aikainen kosteudenhal- linta</i>	Haasteena kylpy- huone-elementin suojamuovin tiivius ja sadeve- den kulkeutumi- sen estäminen tekniikkahormiin.	Haasteena asen- nuskuilun tiiveys rakentamisen ai- kana, vaatii väli- aikaisen vesitii- viin rakenteen kuilun yläpään.	Rakennuksen julki- sivu auki pitkään ennen kylpyhuone- elementtien ja lo- pullisen julkisivun asentamista.
<i>Kylpyhuone-elementin asennusaika</i>	Nopea asennus- aika (10-15min).	Hidas asennus- aika (n.40min).	Ei dokumentoitua kokemusta Suo- messä.

<i>Työturvallisuus</i>	Ei merkittäviä haasteita työturvallisuudessa.	Haasteena asennuskulun työturvallisuus rakentamisen aikana.	Kylpyhuone-elementtien nostaminen julkisivun kautta saattaa aiheuttaa ylimääräisiä riskitekijöitä.
<i>Soveltuminen korkeaan rakentamiseen</i>	Soveltuu, haasteena paikallavalurakentamisen rakenneratkaisut.	Soveltuu, ei vielä kokemuksia, asentaminen tehtävä lohkoittain.	Soveltuu, mahdollistaa runkotyövaiheen nopeamman etenemisen.
<i>Rakenneliitosten betonin kuivuminen</i>	Kylpyhuone-elementin jälkivalettavien reunavälujen kuivuminen huomioitava, jottei muodostu tahdistavaksi.	Kylpyhuone-elementin jälkivalettavien reunavälujen kuivuminen huomioitava, jottei muodostu tahdistavaksi.	Rakennuksen välipohjalaatan oltava riittävän kuiva ennen kylpyhuone-elementin asentamista.
<i>Runkotyövaiheen läpimenoaika</i>	Hidastaa läpimenoaika yhdistettäessä paikallavalurakentamisen kanssa.	Riippuu valitusta asennusjärjestyksestä.	Nopeampi läpimenoaika kylpyhuone-elementtiasennuksen jäädessä pois osana runkotyövaihetta.

<i>Logistiikka</i>	Lukumäärällisesti enemmän toimintuksia asentamisen tapahtuessa kerroksittain.	Valittu asennusjärjestys vaikuttaa toimitusten lukumäärään.	Vähemmän toimintuksia asentamisen tapahtuessa isommissa erissä runkotyövaiheen jälkeen.
<i>Menetelmän yleisyys ja tunnettavuus</i>	Tuttu ja paljon käytetty menetelmä.	Uudehko ja vielä vähän käytetty menetelmä.	Ei juurikaan käytetty Suomessa.
<i>Menetelmän erityiset hyödyt</i>	Tuttu ja nopea menetelmä.	Ei ongelmia lattian korkojen kanssa, asennuskulun työmaa-aikainen hyödyntäminen.	Ei hidasta runkotyövaihetta, kylpyhuone-elementtien kosteudenhallinnan parantuminen.
<i>Menetelmän erityiset haasteet</i>	Haasteet paikallavalurakentamisen yhdistämisen kanssa.	Hidas asentaminen, asennuskulun työturvallisuus ja kosteudenhallinta.	Vieras tapa Suomessa, riittävä kerroskorkeus, vaatii kevytrakenteisen julkisivurakenteen.

Taulukko 2: Building 2030 osallistujien näkemykset kph-elementtien asennustavoista (Timonen 2020)

MENETELMÄ	POSITIIVISET ASIAT	NEGATIIVISET ASIAT
Kololaatta-asennus	- Tuttu menetelmä - Nopea ja yksinkertainen - Useita toimijoita, vähemmän riskiä - Valmiina rungon mukana	- Jälkivalut ja niiden kuivuminen - Hidastaa runkokiertoa - Paikallavalun yhdistämisen ongelmat - Lattian korkojen kanssa usein ongelmia - Yhteensovitusriskit
Kuiluasennus	- Ei hidasta rungon nostamista - Lohkoajattelu asentamisessa hyvä ratkaisu - Ei ongelmia lattian korkojen kanssa - Mahdollistaa paikallavalun yhdistämisen - Selkeä asentaminen - Soveltuu myös korjausrakentamiseen - Asennuskuilun hyödyntäminen logistiikassa	- Haastavaa korkeassa rakentamisessa - Olosuhde- ja kosteudenhallinta - Asennuskuilun työturvallisuus - Asentaminen hidasta
Julkisivuasennus	- Mahdollistaa rungon nopean nousemisen - Samalla menetelmällä mahdollista nostaa kerroskohtaiset ilmanvaihtokoneet - Muun logistiikan mahdollisuus ilman runkoasennuksen omaa nosturia - Nousuhormit ja muu tekniikka mahdollista asentaa runkokierron yhteydessä	- Vieras tapa Suomessa - Kerroskorkeusvaatimus - Työturvallisuus rakennuksen julkisivun ollessa auki - Vaatii kevytrakenteisen julkisivurakenteen - Ei sovellu sokkeloiselle kerros-pohjalle

7. Johtopäätökset ja jatkotutkimus-aiheet

Hankkeen ensimmäisenä tavoitteena oli dokumentoida kansainvälisiä parhaita käytäntöjä korkeaan rakentamiseen liittyen. Pandemian vuoksi kansainvälinen tutkimus ei toteutunut odotetusti, joten tutustuimme lähinnä Kalifornian, Texasin ja Israelin korkeaan rakentamiseen. Aasian korkeaan rakentamiseen emme voineet etänä tutustua. Kuten oletettiin ennakolta, pitkään korkeaa rakentamista tehneet yritykset ovat optimoineet erityisesti rungon asentamista ja lyhentäneet runkokiertoa rakenteita optimoimalla ja hyödyntämällä lean-rakentamisen oppeja. Mielenkiintoista oli, että korkea rakentaminen oli kaikkien haastateltujen yritysten mielestä yksi kannattavimpia projektityyppejä suuren toiston myötä. Avainasioina olivat prosessien standardointi ja jatkuva kehittäminen.

Yritykset olivat ottaneet korkeassa rakentamisessa käyttöön tuttuja lean- ja VDC-menetelmiä mutta niitä oli viety huomattavasti normaalia rakentamista pidemmälle, koska toiston vuoksi korkeassa rakentamisessa menetelmistä koettiin saatavan enemmän hyötyä. Israelilaisen casen minuutitason nostoaikataulutus tähtäsi runkovaiheessa olennaisimman resurssin eli nosturin maksimaaliseen käyttöasteeseen. Tarkka päivittäin päivitettävä työnsuunnittelu ja visuaalinen ohjaus ulkomaisille aliurakoitsijoille mahdollisti nopean läpimenon ja jatkuvan kehittämisen. Näissä kohteissa ei nähty esimerkiksi normaalista poikkeavaa esivalmistusta mutta ennakkosuunnitteluun ja suunnitelmien jatkuvaan päivittämiseen sekä visuaaliseen ohjaukseen käytettiin huomattavasti enemmän resursseja kuin Suomessa. Israelissa haaste oli sama, että paikallisia aliurakoitsijoita ei ollut. Siellä käytettiin urakoitsijoita Kiinasta ja Turkista, mikä havaittiin kielimuurista huolimatta tehokkaimmaksi tavaksi saada runkokierto optimoitua. Kansainvälistä benchmarkkausta on COVID-pandemian jälkeen syytä tehdä lisää. Kirjallisuuden perusteella erityisesti Etelä-Koreassa, Singaporessa, Hong Kongissa ja Japanissa on kiinnostavia kohteita, joissa esivalmistusta ja moduuleita hyödynnetään huomattavasti Israelia ja Kaliforniaa enemmän.

Hankkeessa selvitettiin tahtituotannon hyödyntämistä korkeassa rakentamisessa ja tehtiin prosessimalli kansainvälisen palautteen pohjalta. Loppupäätelmänä, tahtituotanto soveltuu erinomaisesti korkeaan rakentamiseen, jonka soveltamisen pohjana voi käyttää tässä raportissa esitettyä prosessimallia. Emme tehneet hankkeessa vielä tahtituotannon tutkimusta suomalaisissa case-hankkeissa. Yksityiskohtainen tahtiaikataulutus ja toteutumien keruu toisivat varmasti jatkossa vielä lisätietoa, joilla korkean rakentamisen tuottavuutta voidaan parantaa.

Korkean rakentamisen pystylogistiikka on olennainen asia tuottavuuden kannalta. Työmaatesetit jäivät COVID-pandemian takia vajaiksi mutta jo lyhyellä seurantajaksolla ilmeni haasteita hissikaluston rikkoutumisen ja pitkien odotusaikojen suhteen. Hankkeessa kehitettiin pystylogistiikan simulointimalli, jolla voidaan määrällisesti arvioida eri ratkaisujen vaikutuksia

käyttöasteeseen. Mallia testattiin kuvitteellisella hankkeella ja se antoi oikean suuntaisia tuloksia. Jatkotutkimus on jo käytössä ja hankkeen jälkeen simulointia on tehty kahteen todelliseen hankkeeseen, joissa on ennakolta kokeiltu useita eri vaihtoehtoja. Mallia testanneet yritykset ovat tehneet sen pohjalta päätöksiä mm. tavaralogistiikan ajoitukset, taukutilojen sijainnin ja hissien lukumäärän suhteen. Mielenkiintoinen tulos oli mm. kerroksiin sijoitettujen taukutilojen merkitys käyttöasteeseen ja tuottavuuteen. Niiden merkitys paljastui simuloinneissa suuremmaksi kuin esimerkiksi materiaalilogistiikan siirtäminen pois työajalta. Jatkossa simulointimallia voidaan jatkokehittää ja hyödyntää myös rakennusvaiheessa linkittämällä simulointimalli todelliseen logistiikkaprosessiin esimerkiksi hissien kulkua seuraamalla tai sisäpaikannuksella.

Moduulirakentamisen osalta hankkeessa pohdittiin kylpyhuonemoduulien käyttöä ja vertailtiin kolmea eri asennusmenetelmää. Kololaattamenetelmä ja kuilumenetelmä ovat Suomessa jo tunnettuja menetelmiä mutta korkeaan rakentamiseen voisi soveltua vielä paremmin Yhdysvalloissa käytössä oleva menetelmä, jossa kylpyhuonemoduuli tuodaan runkokierrosta riippumattomana julkisivusta sisään. Menetelmää ei vielä ole korkean rakentamisen kohteissa testattu Suomessa mutta kansainvälisten tulosten pohjalta menetelmää olisi syytä testata.

8. Lähteet

Alhava, O. , et al. , 2019. Can a takt plan ever survive beyond the first contact with the trades on-site? *27th annual conference of the international group for lean construction*, 3–5 July 2019 Dublin, Ireland, 453–464.

Arditi, D., Sikangwan, P., & Tokdemir, O. B., 2002. Scheduling system for high rise building construction. *Construction Management & Economics*, 20(4), 353-364.

Barney, G., & Al-Sharif, L. 2015. *Elevator traffic handbook: theory and practice*. Routledge.

Binninger, M. , et al. , 2018. Short takt time in construction – a practical study. *26th annual conference of the international group for lean construction* , 18–20 July 2018 Chennai, India, 1133–1143

The Constructor (n.d.): <https://theconstructor.org/structural-engg/high-rise-buildings-structural-systems/23076/> Käyty: 20.5.2021.

Dlouhy, J. , et al. , 2016. Three-level method of takt planning and takt control – a new approach for designing production systems in construction. *24th annual conference of the international group for lean construction*, 20–22 July 2016 Boston, USA, Sect. 2, 13–22

Frandsen, A.G. and Tommelein, I.D. , 2014. Development of a takt-time plan: a case study. In *Construction research congress 2014* . Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1646–1655.

Frandsen, A.G. , Seppänen, O. , and Tommelein, I.D. , 2015. Comparison between location based management and takt time planning. *23rd annual conference of the international group for lean construction*, 29–31 July 2015 Perth, Australia, 3–12.

Heinonen, A. and Seppänen, O. , 2016. Takt time planning in cruise ship cabin refurbishment: lessons for lean construction. *24th annual conference of the international group for lean construction*, 20–22 July 2016 Boston, USA, 23–32.

Jung, M., Park, M., Lee, H. S., & Chi, S., 2017. Agent-based lift system simulation model for high-rise building construction projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(6), 04017064.

Lehtovaara, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Kujansuu, P., Grönvall, M., 2020. How takt production contributes to construction production flow: a theoretical model. *Construction management and Economics*.

Lehtovaara, J., Heinonen, A., Lavikka, R., Ronkainen, M., Kujansuu, P., Ruohomäki, A., ... & Peltokorpi, A., 2020b. Takt Maturity Model: From Individual Successes Towards Systemic Change in Finland. *28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Berkeley, CA, USA.

Linnik, M. , Berghede, K. , and Ballard, G. , 2013. An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work. *21st annual conference of the international group for lean construction*, 31 July–2 August 2013 Fortaleza, Brazil, 609–618.

Park, M., Ha, S., Lee, H. S., Choi, Y. K., Kim, H., & Han, S. (2013). Lifting demand-based zoning for minimizing worker vertical transportation time in high-rise building construction. *Automation in Construction*, 32, 88-95.

Pe'er, S., 1974. Network analysis and construction planning. *Journal of the construction division*, 100, 203–210.

Sacks, R. , 2016. What constitutes good production flow in construction? *Construction management and economics* , 34 (9), 641–656.

Seppänen, O., Lehtovaara, J., Lappalainen E., Uusitalo P., Hiitola T., Sahlberg H. & Jääsvuo, J. (2020). *Building 2030: Hajautettu työnsuunnittelu. Loppuraportti*. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/sites/g/files/flghsv161/files/2020-12/Building2030-hajautettu-tyonsuunnittelu-v1.pdf>. Haettu 20.5.2021.

Singhal, A., Verma, G. & Kaushal, R. (2016), B.arch, 9th Seminar. Saatavilla: <https://www.slideshare.net/anujsinghal20/high-rise-structure>. Käyty: 20.5.2020.

Timonen, N. (2020). *Kylpyhuone-elementin käyttö korkeassa rakentamisessa läpimenoajan lyhentämiseksi*. Diplomityö, Building Technology maisteriohjelma. Aalto-yliopisto. Rakennetekniikan laitos.

Vatne, M. E, and Drevland, F. , 2016. Practical Benefits of Using Takt Time Planning: A Case Study. *24th annual conference of the international group for lean construction*, Boston, MA, USA, 173–182.

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.