

Betonin 3D-tulostus

Menetelmän soveltuvuus betonirakentamiseen

Toni Reinikka

Opinnäytetyö

Toukokuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (ylempi AMK), rakennustekniikka

Tekijä(t) Reinikka, Toni	Julkaisun laji Opinnäytetyö, ylempi AMK	Päivämäärä toukokuu 2021
	Sivumäärä 76 + 15	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: X
Työn nimi Betonin 3D-tulostus Menetelmän soveltuvuus betonirakentamiseen		
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikka, ylempi AMK		
Työn ohjaaja(t) Jukka Konttinen, Pekka Lähdesmäki		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän ammattikorkeakoulu/ SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hanke		
<p>Tiivistelmä</p> <p>3D-tulostamisen potentiaali betonirakentamisessa on tunnistettavissa, vaikka teknologia onkin vielä kehityksensä alkuvaiheessa. Tutkimus- ja kehitystyö osoittaa, että 3D-tulostamalla on mahdollista valmistaa betonirakenteita. Tutkimuksen mukaan 3D-tulostaminen lisää mahdollisuuksia betonirakentamiselle, mutta teknologialla on vielä heikkoutensa. Kun menetelmän haasteet saadaan ratkaistua, on 3D-tulostamisella edellytyksiä tulevaisuuden betonointimenetelmäksi.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää 3D-tulostamisen soveltuvuutta betonirakentamiseen sekä löytää vaihtoehtoja menetelmän jatkotutkimuskohteiksi työn toimeksiantajalle. 3D-tulostamista ei hyödynnetä vielä käytännön betonirakentamisessa, mutta soveltuvuutta arvioitiin tutkimalla menetelmän kehitystasetta sekä sen konkreettisia hyödyntämismahdollisuuksia nykypäivän betonirakentamisessa.</p> <p>Opinnäytetyössä toteutettiin kyselytutkimus, jonka avulla selvitettiin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta betonirakentamiseen. Kyselyn kohderyhmänä olivat arkkitehdit, rakennesuunnittelijat, betonielementtitehtaissa ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt sekä betonimassan tutkimus- ja kehitystyön työntekijät. Kyselytutkimuksen tietoperustaksi betonin 3D-tulostamisesta tehtiin kirjallisuuskatsaus menetelmän tämänhetkisestä kehitystilanteesta.</p> <p>Tuloksista ilmenee, että betonin 3D-tulostusmenetelmää kohtaan on paljon mielenkiintoa, mutta toisaalta myös epäilyksiä uuden menetelmän soveltuvuudesta betonirakentamiseen. Betonin 3D-tulostuksen yleistymiseksi rakentamisessa halutaan menetelmästä enemmän tutkimustuloksia. Yhteistyön tulisi ulottua kaikkien betonirakentamisen osapuoliin, jotta menetelmän rajallisuudet ja suunnittelun realiteetit saadaan sovitettua yhteen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, betonin 3D-tulostus, pursotus, sideaineen suihkut		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Reinikka, Toni	Type of publication Master's thesis	Date May 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 76 + 15	Permission for web publication: X
Title of publication Concrete 3D printing Suitability of the method for concrete construction		
Degree programme Civil Engineering, Master's Degree		
Supervisor(s) Jukka Konttinen, Pekka Lähdesmäki		
Assigned by JAMK University of Applied Sciences/ 3D printing of construction materials -project		
Abstract <p>The potential of concrete 3D printing is recognizable although the technology is still in the very early stages. Research and development work shows that it is possible to construct concrete structures with printing technology. According to the study of concrete 3D printing increases the opportunities for concrete construction but the technology still has its weaknesses. Once the challenges of the method are solved concrete 3D printing has the potential for a future concreting method.</p> <p>The aim of the thesis was to find out the suitability of 3D printing for concrete construction and to find alternatives for further research of the method for the employer. 3D printing is not yet utilized in practical concrete construction, but its suitability was assessed by examining the stage of development of the method and its possibilities for utilization in today's concrete construction.</p> <p>In the thesis a survey was carried out to determine the suitability of the 3D printing method for concrete construction. The target group of the survey were architects, structural designers, people working in precast concrete plants and construction production, and employees in concrete mass research and development. The data base for the survey on concrete 3D printing was a literature review of the current state of development of the method.</p> <p>The results show that there is a lot of interest for the concrete 3D printing method but also doubts about the suitability of the new method for concrete construction. In order to concrete 3D printing to become more common in construction, more research results are needed from the method. The co-operation should extend to all parties involved in concrete construction to reconcile the limitations of the method and the design realities.</p>		
Keywords/tags (subjects) Additive manufacturing, 3D printing, concrete 3D printing, material extrusion, binder jetting		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	3D-tulostaminen betonirakentamisen uudistajana	5
2	Tutkimusasetelma	6
2.1	Opinnäytetyön tavoite	6
2.2	Tutkimusongelma ja -kysymykset	8
2.3	Tutkimuksen rajaukset	9
2.4	Toimeksiantaja	11
3	Tutkimus, tiedonkeruu ja analysointi	12
3.1	Tutkimusmenetelmät	12
3.2	Tiedonkeruumenetelmät	15
3.2.1	Dokumentit.....	15
3.2.2	Kyselytutkimus.....	16
3.3	Analyysimenetelmät.....	17
4	Betonin 3D-tulostus	17
4.1	3D-tulostuksen määritelmä.....	17
4.2	Betonin 3D-tulostamisen historiaa.....	18
4.3	Betonin 3D-tulostamisessa käytetyt menetelmät	19
4.3.1	Pursotus	19
4.3.2	Sideainesuihkutus.....	20
4.3.3	Dynaaminen liukuvalu	20
4.3.4	3D-ruiskubetonointi.....	21
4.4	Betonitulostimet.....	22
4.4.1	Elementtitehtaat	22
4.4.2	Paikallarakentaminen	23
4.5	Tulostuskelpoisen betonin olennaiset ominaisuudet	27
4.6	Tulostusratkaisuja.....	29
4.6.1	Apis Cor	29
4.6.2	Contour Crafting Corporation.....	31
4.6.3	CONPrint3D	35
4.6.4	Emerging Objects.....	37

	2
4.7	Betonin 3D-tulostuksen potentiaali ja haasteet 39
5	Kyselytutkimus 41
5.1	Kyselylomake tiedonkeruuvälineenä 41
5.2	Tutkimuksen kohderyhmän määrittäminen 42
5.3	Otoksen suuruus ja kato 44
5.4	Kyselylomakkeen laatiminen 45
6	Kyselytutkimuksen tulokset 48
6.1	Kyselytutkimuksen toteutus ja vastausmäärät 48
6.2	Tulosten analysointimenetelmät 49
6.3	Kyselyyn vastanneiden taustatiedot 50
6.4	Tulosten analysointi 52
6.4.1	Tuotantoympäristön vaikutus 52
6.4.2	Betonin 3D-tulostusmenetelmän potentiaali 54
6.4.3	Betonin 3D-tulostusmenetelmän tarpeellisuus ja tulevaisuus 59
7	Johtopäätökset 64
8	Pohdinta 69
8.1	Opinnäytetyön tavoitteista 69
8.2	Tutkimuksen tulokset 70
8.3	Tutkimuksen onnistumiset ja epäonnistumiset 70
8.4	Työn luotettavuus ja eettinen arviointi 71
8.5	Jatkotutkimus 73
Lähteet 75
Liitteet 77
Liite 1.	Sähköpostikyselyn saatekirje 77
Liite 2.	LinkedIn -kyselyn saatekirje 78
Liite 3.	Kyselytutkimuksen muistutusviesti 79
Liite 4.	Kyselylomake, saateosa 80
Liite 5.	Kyselylomake, infosivu 81
Liite 6.	Kyselylomake, kysymykset 1 - 2 82
Liite 7.	Kyselylomake, kysymykset 3 - 5 83

	3
Liite 8. Kyselylomake, kysymykset 6 - 9	84
Liite 9. Kyselylomake, kysymykset 10 - 12	85
Liite 10. Kyselylomake, kysymykset 13 - 15	86
Liite 11. Kyselylomake, kysymykset 16 - 17	87
Liite 12. Kyselylomake, kysymykset 18.....	88
Liite 13. Kyselylomake, kysymykset 19 - 20	89
Liite 14. Kyselylomake, kysymykset 21 - 23	90
Liite 15. Kyselylomake, kysymykset 24.....	91

Kuviot

Kuvio 1. Periaatekuva pursotusmenetelmästä.....	19
Kuvio 2. Periaatekuva sideainesuihkutusmenetelmästä.....	20
Kuvio 3. Periaatekuva 3D-liukuvalusta	21
Kuvio 4. Periaatekuva 3D-ruiskubetoninnista	21
Kuvio 5. Periaatekuva tehtaaseen asennetusta tulostimesta	23
Kuvio 6. Periaatekuva rakennuksen sisälle sijoitettavasta tulostimesta.....	24
Kuvio 7. Periaate rakennuksen ulkopuolella toimivasta tulostimesta	25
Kuvio 8. Periaatekuva vajjereilla liikutettavasta tulostimesta	26
Kuvio 9. Periaatekuva ristikkopuominosturilla liikutettavasta tulostimesta.....	26
Kuvio 10. Periaatekuva betonipumppuauto -3D-tulostimesta	27
Kuvio 11. Epätäydellisesti sitoutuneiden valukerrosten poikkileikkaus.....	29
Kuvio 12. Havainnekuva tulostusprosessista.....	30
Kuvio 13. Havainnekuva rakennustyömaalta	30
Kuvio 14. Havainnekuva laatan tulostusprosessista.....	31
Kuvio 15. Konsepti pientalon tulostamiseen	32
Kuvio 16. Konsepti kerrostalon tulostamiseen.....	32
Kuvio 17. Konsepti laajarunkoisen kerrostalon tulostamiseen	33
Kuvio 18. Onttorunkoisen seinärakenteen tulostus.....	33
Kuvio 19. Raudoitettun seinärakenteen periaate.....	34
Kuvio 20. Havainne tuulivoimalan rungon tulostamisesta.....	35
Kuvio 21. CONPrint3D tulostusmenetelmän toimintaperiaate.....	36

Kuvio 22. CONPrint3D tulostusmenetelmän toimintaperiaate.....	36
Kuvio 23. 3D-ulostetuista elementeistä koostuva paviljonki, BLOOM.....	37
Kuvio 24. 3D-tulostetuista elementeistä koostuva paviljonki, SHED	38
Kuvio 25. 3D-tulostetuista elementeistä koostuva rakennus	38
Kuvio 26. Eri betonilaaduilla tulostettu rakenne.....	40
Kuvio 27. Kyselytutkimukseen vastanneet toimialoittain	51
Kuvio 28. Aktiivisuuden merkitys tulostusmenetelmän käyttöönottamisessa	52
Kuvio 29. Betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämisen kiinnostus.....	53
Kuvio 30. Betonin 3D-tulostusmenetelmän arvioitu potentiaali	55
Kuvio 31. Betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuus eri toimialoille.....	56
Kuvio 32. Menetelmän soveltuvuus suunnittelijoiden näkökulmasta	57
Kuvio 33. Menetelmän soveltuvuus tuotannon näkökulmasta	57
Kuvio 34. Betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuus	58
Kuvio 35. Betonin 3D-tulostusmenetelmän tarpeellisuus.....	60
Kuvio 36. Menetelmän tarpeellisuus, arkkitehdit ja rakennesuunnittelijat.....	61
Kuvio 37. Menetelmän tarpeellisuus, elementtituotanto ja rakennusurakointi .	61
Kuvio 38. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa	62
Kuvio 39. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa	63
Kuvio 40. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa	63

Taulukot

Taulukko 1. Vastausmäärien jakautuminen tutkimusjaksolle.....	49
---	----

1 3D-tulostaminen betonirakentamisen uudistajana

Betoni on maailmanlaajuisesti käytetyin rakennusmateriaali, jota valmistetaan noin 13 miljardia kuutiometriä vuodessa. Betonia käytetään rakennusmateriaalina infra-, teollisuus- ja talonrakentamisessa perustuksista kattotiiliin. (Betoni 2021). Betonin käyttäminen rakennusmateriaalina aiheuttaa kuitenkin monenlaisia haasteita niin työntekemiselle kuin ympäristöllekin. Betonirakentaminen on erittäin työvoimavaltainen ala, joka aiheuttaa suuria tuotantokustannuksia sekä lisää työturvallisuusriskejä. Betonin käyttämisestä aiheutuu myös suuria määriä rakennusjätettä muottityön ja materiaalihukan takia. Tavanomaisen betonirakentamisen keinoin arkkitehtonisesti haastavien rakenteiden valmistus on muottityön takia kallista, joka rajoittaa suunnittelutyön luovuutta. Lisäksi tavanomaisessa betonissa käytetty sementti aiheuttaa suuria hiilidioksidipäästöjä aiheuttaen betonirakentamiselle suuren hiilijalanjäljen. Betonin 3D-tulostaminen voi olla ratkaisu näille kaikille haasteille. (Nematollahi, Xia & Sanjayan 2017). Betonirakenteiden 3D-tulostaminen on rakennusalalla yksi suurimmista kehitystyön kohteista, koska menetelmän tarjoamat mahdollisuudet ja hyödyt ovat tunnistettavissa. Rakennusteollisuus tähtää 3D-tulostamisessa suuren mittaluokan sovellutuksiin ja maailmalla yritykset sekä oppilaitokset ovat tutkineet menetelmän tuomia mahdollisuuksia. (Wolfs 2015, 1)

Suomessa betonin 3D-tulostamisen hankkeita on toteutettu 2010-luvulta alkaen. Betonin 3D-tulostamista on kokeiltu muun muassa seinäelementtien sekä meluvallielementtien tulostamiseen. Fimatec Oy on kehittänyt ja testannut tulostinta, jolla voidaan tulostaa betoniseinäelementti eristeineen, raudoitteineen ja sähkövarauksineen. (Kakkonen-Yhtiöt Oy 2021). Lappeenrantalaisessa Urban Infra Revolution -hankkeessa on tutkittu geopolymeerimassaa ja sen 3D-tulostamista meluste-elementeiksi. (Kemia-lehti 2020). Nämä ovat tähän asti Suomessa pisimmälle viedyt hankkeet betonin 3D-tulostusmenetelmän tutkimiseksi.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu tutki, SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hankkeessa, betonin 3D-tulostamista, tulostamiseen liittyvää robotiikkaa sekä tulos-tettavaa betonimassaa ja geopolymeerin hyödyntämistä betonimassan valmistuk- sessa. Hanke aloitti toimintansa tammikuun alussa 2021. Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona hankkeelle, tavoitteena selvittää 3D-tulostamisen mahdolli- suuksia betonirakentamisessa sekä löytää jatkotutkimuskohteita betonin 3D-tulos- tusteknologian kehittämiseksi. Opinnäytetyö toteutettiin hankkeen alkuvaiheessa, jotta hanke saa tarvitsemaansa lisätietoa menetelmästä kehittääkseen toimintaansa betonin 3D-tulostamisen tutkimus- ja kehitystyössä.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Opinnäytetyön tavoite

Opinnäytetyön keskeisenä tavoitteena oli selvittää 3D-tulostusmenetelmän soveltu- vuutta betonirakentamiseen sekä löytää toimeksiantajalle kohteita tai tapoja mene- telmän tutkimus- ja kehitystyölle. Työn toimeksiantaja tutkii betonin 3D-tulostami- seen soveltuvaa betonimassaa, tulostusrobotiikkaa sekä menetelmän käytettävyyttä betonirakentamisessa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tuoda esille 3D-tulostamisen tarjoamia mahdollisuuksia betonirakentamisessa, etsiä prototyypinomaisia kohteita betonin 3D-tulostamiselle ja selvittää tuotantoympäristön suhtautumista betonin 3D- tulostusmenetelmää kohtaan. Opinnäytetyön tulosten oli määrä toimia selvitystyönä hankkeelle betonin 3D-tulostusmenetelmän jatkokehittämistyötä varten.

Tavoitteiden saavuttamiseksi opinnäytetyössä tehtiin kirjallisuus- sekä kyselytutki- mus. Kirjallisuustutkimuksella selvitettiin, mitä betonin 3D-tulostusmenetelmällä on tehty tähän mennessä. Kirjallisuustutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, millai- sia menetelmiä tällä hetkellä betonin tulostamiseen on tarjolla ja minkälaisia tulevai- suuden visioita tulostamiselle on mahdollisesti kehitteillä. Teoriaosalla ei ollut tarkoi- tuksena olla kaiken kattava kirjallisuuskatsaus betonin 3D-tulostamisesta, vaan olla

tiivis selvitys betonin 3D-tulostusmenetelmistä, mahdollisuuksista sekä tulevaisuuden näkymistä. Teoriaosa toimi myös tietoperustana opinnäytetyössä tehdylle kyselytutkimukselle kysymysten asettelun osalta.

Kyselytutkimuksen tavoitteena oli selvittää tarkemmin rakennusteollisuuden näkemyksiä betonin 3D-tulostamisen mahdollisuuksista rakennusalalla. Kyselytutkimuksella pyrittiin selvittämään rakennusteollisuuden näkemiä haasteita tulostusmenetelmässä sekä millaisiin kohteisiin tai rakentamiseen menetelmää ja sen tutkimista olisi järkevä alkaa soveltamaan. Tutkimuksen avulla selvitettiin yleisellä tasolla myös rakennusalan kiinnostuneisuutta betonin 3D-tulostusta kohtaan. Kirjallisuus- ja kyselytutkimusta on käsitelty kappaleissa 4 ja 5. Kappaleessa 6 käsitellään kyselytutkimuksen tuloksia.

Opinnäytetyön pessimistisenä hypoteesina oli, että betonin 3D-tulostusmenetelmä on kehityskaarensa alkupäässä, eikä menetelmä tule yleistymään vielä pitkään aikaan. Betonirakentamisessa on vakiintuneita käytäntöjä niin suunnittelutyössä kuin tuotannossakin, joten uuden menetelmän kehittäminen toteutuskelpoiseksi on vaikeaa tai koetaan jopa tarpeettomaksi. Vaikka menetelmää on tutkittu ja kehitetty maailmalla pitkään, voi konservatiivinen rakennusala rajoittaa menetelmän yleistymistä vielä pitkään. Menetelmän yleistymisen haasteina arvioitiin oleva teknologian kehitys ja ennen kaikkea tulostettujen betonirakenteiden rakenteellinen laatu. Myös sitä pidettiin mahdollisena, että 3D-tulostaminen ei sovellu menetelmänä betonirakentamiseen eikä näin ollen tuo mitään lisäarvoa betonirakentamiselle.

3D-tulostusmenetelmä on kuitenkin näyttänyt potentiaalinsa muilla teollisuuden aloilla, joten yhtä hyvin se voisi tuoda jotain lisäarvoa myös betonirakentamiseen. Optimistisena oletuksena opinnäytetyön odotettiin tuovan ideoita ja oivalluksia, mihin betonin 3D-tulostamista voitaisiin hyödyntää tehokkaasti betonirakentamisessa tulevaisuudessa. Menetelmä voisi jopa tarjota jonkin uuden tavan rakentaa betonista ja vakiintua lähitulevaisuudessa yhdeksi betonirakentamisen erikoismenetelmistä muiden erikoismenetelmien joukkoon. Positiivisena oletusarvona työlle oli, että menetelmä koetaan uusien mahdollisuuksien innoittajana ja että kiinnostusta menetelmän tutkimus- ja kehitystyötä kohtaan löytyy laajasti. Tutkimuksen odotettiin myös

lisäävän yhteistyömahdollisuuksia betonin 3D-tulostamisen kehittämiseksi toimeksiantajahankkeelle. Opinnäytetyön tuloksena odotettiin löytyvän potentiaalisia jatkokehityskohteita, joihin menetelmän tutkimista olisi järkevä soveltaa. Tutkimuksella pyrittiin löytämään menetelmän yleistymisen pullonkauloja sekä löytämään mahdollisia yhteistyöprojektien mahdollisuuksia.

2.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Työn tutkimusongelma oli selvittää betonin 3D-tulostusmenetelmän käyttöönottovalmiutta rakennusteollisuudessa. Tutkimusongelma ei ollut erityisen tarkkarajainen, joten ennen tutkimustyön aloittamista siitä piti kiteyttää tutkimuskysymyksiä.

Kanasen mukaan opinnäytetyö on tieteellinen työ ja tieteellisen työn tekeminen edellyttää aina tutkimusongelmaa. Ongelma tulee olla määriteltynä, jotta tieteellinen tutkimus voidaan toteuttaa. Ongelman määrittely on olennainen osa tutkimuksen onnistumista, koska tutkimusprosessi ohjautuu tutkimusongelman määrittelyn mukaisesti. (Kananen 2015, 45)

Tutkimuskysymykset ovat tutkijalle välineitä, joiden avulla tutkimusaineisto toteutetaan ja joiden avulla saadaan vastaus tutkimusongelmaan. Tutkimuskysymyksiä ei sellaisenaan esitetä tutkittavalle kohteelle, vaan näiden lisäksi tarvitaan tarkentavia kysymyksiä. (Kananen 2015, 57). Tutkimuskysymysten avulla opinnäytetyön aihe rajattiin tarkemmaksi ja työlle saatiin asetettua myös selkeämmät tavoitteet. Laaja-alainen tutkimusongelma rajattiin opinnäytetyön tavoitteiden määrittelyllä kolmeen tutkimuskysymykseen.

Ensimmäinen tutkimuskysymys

Mitä betonin tai betonin kaltaisen materiaalin tulostamisella voidaan saavuttaa?

Tällä kysymyksellä haluttiin selvittää, onko 3D-tulostamisella potentiaalista mahdollisuutta betonirakentamisessa. Kysymyksellä pyrittiin löytämään vastauksia siihen, minkälaiseen betonirakentamiseen menetelmä soveltuu, tuoko menetelmä lisäarvoa

betonirakentamiseen tai betonirakenteiden suunnittelulle sekä minkälaisia haasteita menetelmän käyttämisessä nähdään.

Toinen tutkimuskysymys

Minkälaiseen tuotantoon menetelmää voidaan ryhtyä soveltamaan tällä hetkellä?

Tämän kysymyksen avulla oli tarkoitus saada vastaus siihen, mikä tai mitkä ovat niitä realistisia ja potentiaalisimpia rakennuskohteita tai rakennusosia, joiden valmistamiseen menetelmää voitaisiin alkaa soveltamaan. Mitkä ovat suunnittelijoiden, elementtitehtaiden sekä rakennustuotannon näkökulmasta kohteita, joiden toteuttamiseen 3D-tulostusmenetelmää olisi järkevä lähteä kehittämään. Kysymyksellä haetaan vastausta myös teknisestä valmiudesta alkaa toteuttamaan rakenteita tulostamalla.

Kolmas tutkimuskysymys

Rajoittaako tuotantoympäristö menetelmän käyttöönottamista?

Kolmannen kysymyksen avulla oli tavoitteena selvittää mahdollisia haasteita, joita tuotantoympäristö aiheuttaa menetelmän käyttämiselle. Millaisia rajoitteita suunnittelutyön ja tuotannon osalta on havaittavissa menetelmän käyttöönottamisessa. Kysymyksellä haluttiin myös selvittää, vaatiiko menetelmän laajempi käyttöönottaminen yhteistyötä eri toimijoiden kesken vai onko kehitystyötä mielekkäämpi tehdä toimialakohtaisesti.

Tutkimuskysymysten pohjalta aihe kiteytettiin lauseeseen ”3D-tulostusmenetelmän soveltuvuus betonirakentamisessa”. Tutkimuskysymykset käytännössä etsivät ratkaisua siihen, minkälaiseen rakentamiseen menetelmä voidaan alkaa soveltamaan ja nähdäänkö betonirakenteiden tulostamisessa ylipäättään mitään järkeä.

2.3 Tutkimuksen rajaukset

Opinnäytetyön toimeksiantona oli alun perin selvittää betonin 3D-tulostusmenetelmän käyttöönottovalmiutta rakentamisessa. Aiheena toimeksianto oli erittäin laaja ja

edellytti työn rajaamista selkeämmäksi kokonaisuudeksi. Opinnäytetyöhön käytettävissä oleva aika rajoitti myös osaltaan työn laajuutta ja rajoja. Toimeksiantajalla oli betonin 3D-tulostamiseen liittyen myös muita tutkimuksia, joten tämän työn rajaus muodostui myös näiden perusteella. Toimeksiantaja tutki betonin 3D-tulostamisen robotiikkaa ja tulostettavaa betonimassaa, joten nämä aiheet rajautuivat tämän työn ulkopuolelle.

Rajauksia pohdittaessa mietittiin, pitäisikö työn keskittyä tutkimaan betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta jonkin tietyn toimijan, esimerkiksi betonielementti-tuotannon, näkökulmasta. Tällöin aihe olisi ollut selkeästi rajautunut koskemaan tiettyä valmistusmuotoa sekä tuotantoympäristöä. Toimeksiantajaa kuitenkin kiinnosti tutkia menetelmän soveltuvuutta ja mahdollisuuksia kaikkien betonirakentamisen osapuolien näkökulmasta. Ajatuksena oli, että tutkitaan menetelmän soveltuvuutta usean toimijan näkökulmasta, jotta saadaan laajempi käsitys menetelmän potentiaalista.

Menetelmä on kuitenkin uusi, eikä sitä käytännössä hyödynnetä betonirakentamisessa tällä hetkellä. Tästä syystä opinnäytetyö rajautui tutkimaan menetelmää suunnittelijoiden ja rakennustuotannon näkökulmista, eikä tutkimukseen otettu mukaan tilaaja tai rakennuttajatahoja. Kohderyhmäksi tutkimukselle rajautui arkkitehdit, rakennesuunnittelijat, betonielementtitehdas- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt sekä betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa työskentelevät henkilöt. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin rakennuttajat ja tilaajat, koska tutkimuksen aiheen kannalta näiden ei katsottu olevan tarpeellinen kohderyhmä. Myös tulostettavan betonimassan ja tulostusrobotiikan tutkimus- ja kehitystyö jätettiin työn ulkopuolelle. Opinnäytetyö sivuaa hieman robotiikkaa sekä tulostuksessa käytettävän massan ominaisuuksia, mutta vain sen verran, että betonin 3D-tulostusmenetelmistä saa käsityksen. Työssä ei myöskään käsitellä 3D- ja tulostusmalleja tai niihin liittyviä ohjelmistoja. Alun perin mukana oli betonipumppausyritykset, mutta ne jätettiin myös työn ulkopuolelle, koska katsottiin aiheen olevan jo muutenkin laaja. Kirjallisuustutkimuksen osalta tutkimus kattaa kansainvälisiä tutkimuksia, mutta kyselytutkimus rajautuu tutkimaan betonin 3D-tulostamista Suomen rakennusteollisuuden näkökulmasta.

Kirjallisuustutkimuksen tavoitteena oli selvittää 3D-tulostamisen tuomia hyötyjä ja sen sovellettavuutta betonirakentamiseen. Tutkimuksella pyrittiin selvittämään, minkälaisia rakenteita betonista voidaan tulostaa ja minkälaisia eri menetelmiä betonin tulostamiseen on kehitetty. Toimintaympäristöä tulostamiselle ei rajattu, vaan tutkimuksessa haluttiin tuoda esille 3D-tulostusmenetelmän hyödyntämismahdollisuuksia elementtiteollisuudessa sekä rakennustuotannossa. Olennainen osa kirjallisuustutkimusta oli saada vastauksia, minkä tyyppisiä betonirakenteita menetelmällä on realistista valmistaa nykyisellä tulostusteknologialla. Betonin 3D-tulostamista on käsitelty kappaleessa 4.

Kyselytutkimuksen osalta opinnäytetyö rajattiin tutkimaan betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta betonirakentamiseen. Tutkimuksella selvitettiin myös alan kiinnostusta menetelmää kohtaan sekä yhteistyöinnokkuutta. Kyselytutkimuksen avulla pyrittiin myös saamaan tietoa ja näkemyksiä menetelmän soveltuvuudesta avoimien kysymysten avulla. Työ rajattiin tutkimaan menetelmän tuomiin mahdollisuuksiin arkkitehti- ja rakennesuunnittelun, betonielementti- ja rakennustuotannon sekä betonimassan kehitys- ja tutkimustyöhön. Vaikka betonielementtitehtaissa on omaa massantuotantoa, haluttiin kyselytutkimukseen ottaa mukaan myös erilliset betonimassan kehittäjätahot tavoitteena saada tietoa betonin kehitystyöstä 3D-tulostamista ajatellen. Kyselytutkimuksen toteutusta käsitellään kappaleessa 5.

2.4 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Jyväskylän ammattikorkeakoulun SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hanke. SOMA-hanke tutki betonin ja geopolymeerin 3D-tulostamista, tulostuksen robotiikkaa sekä tulostusmenetelmän käyttöönottovalmiutta rakennusteollisuudessa. Hanke tarjosi mahdollisuuden tehdä opinnäytetyön osana hankkeen toimintaa betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämiseksi.

Betonin 3D-tulostamiseen soveltuvien materiaalien testaamisen lisäksi hankkeen tarkoituksena on tuoda esille menetelmän tarjoamia mahdollisuuksia rakennusteollisuudessa. Hankkeen tavoitteena on lisätä komposiittimateriaalin laajamittaista hyödyn-

tämistä uutta valmistusmenetelmää käyttämällä. Lisäksi hankkeen tavoitteena on lisätä rakentamisessa resurssiviisasta tapaa geopolymeerin avulla, jonka raaka-aineita saadaan teollisuuden sivuvirroista. Hanke tuottaa tietoa yrityksille betonin 3D-tulostamisesta sekä geopolymeeribetonista. (JAMK, hanke-esittely).

Toimeksiantajan edustajana toimi hankkeen projektipäällikkö Leena Turunen ja opinäytetyön 1. ohjaajana toimi lehtori Jukka Konttinen.

3 Tutkimus, tiedonkeruu ja analysointi

3.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmät ovat keinoja, joilla saadaan aikaiseksi ratkaisu esitettyyn tutkimusongelmaan. Koska työn tavoitteena on luotettavan tiedon tuottaminen, on käytettävien menetelmien oltava oikeaksi todettuja ja hyväksytyjä. Tutkimusongelma tulee tuntea hyvin, jotta tutkimusmenetelmä voidaan valita oikein. Tutkimusongelmaan ja -kysymyksiin saadaan ratkaisu jalostamalla kerättyä aineistoa. Se millä tavalla aineistoa kerätään, riippuu tutkimusotteesta. Laadullisen työn aineistoina ovat erilaiset haastattelut, dokumentit ja havainnoinnit. Määrällisen työn aineistoina ovat tilastot ja kyselylomakkeet. (Kananen 2015, 65)

Tutkimuskysymykset jakautuvat avoimiin sekä strukturoituihin kysymyksiin. Avoimet kysymykset ovat yleisluontoisia, joiden avulla on tarkoitus saada selville käsitys tutkittavasta ilmiöstä. Avoimien kysymysten avulla vastauksiksi saadaan tekstiä ja tarinoita. Avoimet kysymykset ovat tyypillisiä laadulliselle tutkimukselle. Laadullisessa tutkimuksessa tutkija toimii aineistonkeruuvälineenä, eli tutkija päättää keneltä kysyy, kuinka paljon ja mitä. Laadullisen työn haasteena onkin subjektiivisuus, koska tutkimus on paljolti tutkijan päätöksenteon varassa. (Kananen 2015, 68)

Kun ilmiö tunnetaan hyvin, käytetään strukturoituja kysymyksiä. Strukturoituja kysymyksiä esitettäessä tiedetään tarkasti mitä kysytään ja tiedetään oletetut vastausvaihtoehdot. Strukturoituihin kysymyksiin vastaukset saadaan lukuina. Strukturoidut kysymykset ovat tyypillistä määrälliselle tutkimukselle. Määrällisessä tutkimuksessa aineistonkeruumenetelmät ovat tutkijasta riippumattomia. Aineisto voidaan kerätä muun muassa kyselylomakkeella tai tutkimusalasta riippuen esimerkiksi jollain mittalaitteella. Määrällisen tutkimuksen tuloksia pidetään objektiivisinä, koska tutkimusta ohjaa tutkijan oman päätöksen sijaan tarkat säännöt. Tämä ei kuitenkaan poista tutkijan tekemiä virheitä. (Kananen 2015, 68-69)

Tutkimustyö on laadullinen, eli kvalitatiivinen silloin, kun ilmiötä ei tunneta tai siitä tiedetään hyvin vähän eikä ilmiötä selittäviä teorioita ole olemassa. Tutkimusotteena kvalitatiivinen menetelmä on joustava ja mahdollistaa tutkijalle monia mahdollisuuksia työn toteuttamiselle. Kananen määrittää kvalitatiivisen tutkimustyön soveltuvan käytettäväksi seuraavissa tilanteissa;

1. Ilmiöstä ei ole tietoa, teorioita, tutkimusta tai ilmiötä ei tunneta
2. Ilmiöstä halutaan saada syvälinen näkemys
3. Käytetään triangulaatiota
4. Ilmiöstä halutaan saada hyvä kuvaus.

(Kananen 2015, 70-71)

Tutkimustyö on määrällinen, eli kvantitatiivinen silloin, kun ilmiö ja siihen liittyvät teoriat tunnetaan hyvin. Kvantitatiivisessa tutkimustyössä aineisto kerätään kyselyn avulla. Kyselyn kysymykset ovat apukysymyksiä, joiden avulla saadaan vastaus tutkimuskysymyksiin. Kysymykset voivat olla tyyliltään mielipidekysymyksiä tai faktakysymyksiä. Kyselytutkimusta laatiessa tarvitaan vahvaa ilmiön tuntemusta, jotta kysymyksistä ja vastausvaihtoehdoista saadaan täsmällisiä ja relevantteja. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa voidaan käyttää myös olemassa olevia tutkimusaineistoja, kuten tilastoja tai rekisterejä. Haaste näissä kuitenkin on se, että ne ovat kerätty jotain tiettyä muuta tutkimusta varten, eivätkä tulokset välttämättä sovellu omaan tutkimustyöhön sellaisenaan. (Kananen 2015, 73-74)

Tutkimusmenetelmiä voidaan myös yhdistellä tarpeen mukaan. Työssä voi olla laadullinen sekä määrällinen osio. Laadullisessa osiossa selvitetään tutkimusilmiötä ja tämän jälkeen toteutetaan määrällisen tutkimusmenetelmän mukainen kyselytutkimus. Myös kyselytutkimuksessa voi olla avoimia vastausosioita, jolloin kvantitatiivisesta tutkimuksesta saadaan myös kvalitatiivisia vastauksia. Kyselytutkimuksen avoimien kysymysten vastaukset voidaan muuttaa luokittelemalla kvalitatiivisiksi, jolloin vastauksia voidaan arvioida tilastollisin menetelmin. (Kananen 2010, 133) Tutkimustyö voi olla lähtökohtaisesti myös kvantitatiivinen työ. Jos tutkimuksessa tulee esille seikkoja, joihin ei ole osattu varautua kyselyä suunniteltaessa, voidaan vastauksia ilmiöön saada kvalitatiivisen tutkimuksen keinoin avoimien kysymysten kautta. Toisin sanoen kvantitatiivinen tutkimus selvittää ilmiön määrällisen esiintyvyyden ja kvalitatiivinen syytä ilmiön taustalla. (Kananen 2010, 134)

Tässä opinnäytetyössä on piirteitä sekä kvalitatiivisesta että kvantitatiivisesta tutkimuksesta. Opinnäytetyössä tehdyssä kyselytutkimuksessa on strukturoituja ja avoimia kysymyksiä. Strukturoidut kysymykset ovat kvantitatiivista tutkimusta ja avoimet kysymykset kvalitatiivista työtä. Tutkittavasta ilmiöstä, eli betonin 3D-tulostuksesta on olemassa teorioita ja tutkimustuloksia, mutta silti aihe on uusi ja tietyiltä osin tietoa on niukasti saatavissa. Niukka tieto oletettavasti johtuu osaltaan menetelmän kehitysvaiheesta ja siitä, että tutkimuksen tulokset halutaan pitää enimmäkseen tutkijoiden omana tietona.

Tutkimusosuus päätettiin toteuttaa kyselytutkimuksena. Aiheen laaja-alaisuuden takia kyselytutkimukseen päätettiin kuitenkin laittaa strukturoitujen, eli monivalintakysymysten lisäksi avoimia kysymyksiä analyyttisempien vastausten toivossa. Opinnäytetyön tutkimusmenetelmä on kyselyn toteutuksen perusteella monimenetelmäinen työ. Kyselytutkimuksen monivalintakysymykset ovat käytännössä kvantitatiivista tutkimusta ja avoimien kysymysten vastaukset kvalitatiivista tutkimusta. Kyselytutkimuksen valinta tutkimusmenetelmäksi valikoitui myös sen takia, että kyselytutkimuksella oletettiin saatavan laajempi näkemys valitulta kohderyhmältä betonin 3D-tulostamisesta. Näiden vastausten perusteella on toimeksiantajalla mahdollisuus toteuttaa jatkotutkimuksia esimerkiksi haastattelemalla. Kyselytutkimus antaa siis aiheita

mahdollisille jatkotutkimukselle. Haastattelun toteuttaminen kyselytutkimuksen lisäksi jätettiin yhä mahdollisuudeksi liittää opinnäytetyöhön resurssien salliessa. Haastattelut jäivät kuitenkin toteutumatta tämän opinnäytetyön osalta.

3.2 Tiedonkeruumenetelmät

3.2.1 Dokumentit

Tutkimustyön teoriaosa sisältää tutkimusongelmaan liittyvää teoriaa sekä aiempia tutkimustöitä. Teoriaosassa käytetään dokumentteja, jotka ovat kirjoitetussa, kuvallisessa tai äänitetyssä muodossa olevaa aineistoa. Kvalitatiivisen työn dokumenteiksi kelpaavat kaikki tutkimusilmiöön liittyvä aineisto, jotka lisäävät tutkijan näkemystä tutkittavasta ilmiöstä ja sen ajallisesta kehityksestä. Tieteellisessä tutkimuksessa käytettäviin dokumentteihin on suhtauduttava kriittisesti ja pyrittävä varmistamaan tiedon oikeellisuus muiden lähteiden perusteella. Työssä käytettävien dokumenttien luotettavuuden takia kannattaa arvioida muun muassa seuraavia asioita. Kuka on kirjoittanut, miksi ja milloin dokumentti on tehty, kenelle dokumentti on suunnattu, mitkä ovat olleet dokumentin tavoitteet ja mitä dokumentista mahdollisesti on jäänyt uupumaan. (Kananen 2015, 158)

Opinnäytetyön lähteinä on käytetty pääasiassa tekniikanalan graduja, katsauksia sekä erityyppisiä konferenssiesityksiä. Tulostusmenetelmien kuvauksissa on hyödynnetty tulostusmenetelmän kehittäjien internetsivuja. Lähteistä on pyritty valitsemaan mahdollisimman uusia, koska menetelmän kehittyessä osa lähteistä vanhenee nopeasti. Menetelmän kehittäjien sivustoilta saatavasta tiedosta on pyritty suodattamaan mainosarvo ja keskitytty tulostustekniikan saavutuksiin ja realistisiin tulevaisuuden visioihin. Osa menetelmiä kuvaavista lähteistä on tekstimuotoista ja osa menetelmäkuvauksista on ollut videomuodossa. Käytettyjen lähteiden valintaan on vaikuttanut myös saatavuus sekä opinnäytetyön kirjoittamiseen käytettävissä olevat ajalliset resurssit.

3.2.2 Kyselytutkimus

Tilanteet, joissa tutkittavat ovat hajallaan, on perusteltua käyttää kyselyä tutkimuskeinona. Kysely voidaan toteuttaa perinteisen paperikyselyn lisäksi verkko- tai puhelinkyselyinä. Tavanomaiseen paperikyselyyn verrattuna verkkokysely helpottaa aineiston keruuta sekä analysointia. Verkkokysely soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa muun muassa tutkimusalue on laaja tai hajanainen, vastaajia tarvitaan määrällisesti paljon, tutkimustuloksilla on kiire. Verkkokysely on myös järkevä tutkimustapa, jos kyselyssä tarvitaan esimerkiksi kuvia, kaavioita tai liikkuvaa kuvaa tai jos tutkimus toistuu usein. (Kananen 2015, 202-211)

Verkkokyselyllä on etuja ja haittoja. Etuina voidaan pitää muun muassa kustannustehokkuutta, nopeutta, joustavuutta, helppoutta, seurantamahdollisuuksia sekä kattavuutta. Haasteina verkkotutkimuksella on muun muassa roskapostivaara, vastaajien osaamistaso, tekniset ongelmat ja alhainen vastausprosentti. (Kananen 2015, 213-215)

Haastattelun ja kyselytutkimuksen hyviä ja huonoja puolia arvioidessa päädyttiin toteuttamaan työ kyselytutkimuksella. Haastatteleminen olisi melko todennäköisesti saatu vastauksia jokaisesta kohderyhmän osapuolelta, mutta haastattelujen järjestäminen olisi ollut työlästä ja tulosten analysointi hidasta. Lisäksi aiheeseen perehtyneitä haastateltavia olisi voinut olla hankala löytää rajatun aikataulun puitteissa. Tutkimusta suunniteltaessa oletettiin myös, että yritykset, jotka mahdollisesti kehittävät betonin 3D-tulostusmenetelmää eivät välttämättä kertoisi siitä avoimesti haastattelusta. Kyselytutkimuksen järjestämistä ja monivalintatyyppeistä kysymysten analysointia pidettiin verrattain helppona. Kyselytutkimuksella oli mahdollista saavuttaa suuri otos verrattain helposti. Lisäksi oletuksena oli, että anonyymillä kyselyllä olisi mahdollista saada helpommin vastauksia esitettyihin kysymyksiin. Kyselytutkimuksen haasteina arvioitiin myös aiheen tuntemuksen puute sekä heikkoa osallistumista kyselytutkimuksiin vastaamisessa. On myös mahdollista, että kyselytutkimuksen sähköpostiviesti menee suoraan roskapostiin tai hukkuu sähköpostivirtaan.

3.3 Analyysimenetelmät

Kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena oli koota tietoa 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuudesta ja käytettävyydestä betonirakentamisessa sekä tuoda esille olemassa olevia menetelmiä sekä niiden mahdollisesti tuomaa lisäarvoa betonirakentamiselle. Kirjallisuuslähteistä löydetyt olennaiset havainnot menetelmän soveltuvuudesta betonirakentamiseen on koottu luvussa 4.7.

Kyselytutkimuksen tulokset muodostuvat laadullisista sekä määrällisistä tuloksista, joita analysoidaan eri menetelmillä. Avoimiin kysymyksiin annettuja vastauksia analysoidaan aineistosta toistuvien aiheiden mukaan. Avoimia vastauksia analysoidaan myös kyselyyn vastanneiden kohderyhmien välillä mahdollisuuksien mukaan. Monivalintakysymyksiä analysoidaan numeerisesti kuvioiden ja taulukoiden avulla. Monivalintakysymysten avulla on tarkoitus kartoittaa betonin 3D-tulostamista kysymysten teemojen mukaisesti ja löytää yhteyksiä avoimien kysymysten vastauksiin.

Teoriaosuuden kirjallisuustutkimuksen sekä kyselytutkimuksen vastauksia tarkastellaan ristiin ja johtopäätöksissä pyrittiin löytämään yhtenäisiä linjoja menetelmän soveltuvuuteen, käytettävyyteen, odotuksiin ja näkemyksiin työn tavoitteiden mukaisesti.

4 Betonin 3D-tulostus

4.1 3D-tulostuksen määritelmä

Materiaalia lisäävä valmistus on menetelmä, jolla tuotetaan fyysisiä kolmiulotteisia kappaleita 3D-mallitiedon avulla materiaalia yhteen liittämällä. Materiaalin liittämisen tapahtuu pääsääntöisesti kerros kerrokselta -periaatteen mukaisesti ja on näin ollen vastakohta perinteisille valmistusmenetelmille, joissa kappale tuotetaan materiaalia muovaamalla tai poistamalla. 3D-tulostus on synonyymi materiaalia lisäävälle valmistukselle. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017)

Kansainvälinen ISO/ASTM standardi määrittää materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät seitsemään luokkaan; sideaineen suihkutusta, suorakerrostusta, pursotusta, materiaalin suihkutusta, jauhepetisulatus, kerroslaminointi sekä valokovetus altaassa. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017)

Opinnäytetyössä käytetään materiaalia lisäävästä valmistuksesta puhekielessä yleisempää käsitettä 3D-tulostaminen. Betonin 3D-tulostamista voidaan tehdä sideaine-suihkutus- ja pursotusmenetelmillä. Pursotusmenetelmä vastaa enemmän tavantomaista valua, joten tutkimuksessa perehdytään pääasiassa tähän menetelmään. Seuraavissa kappaleissa käsitellään menetelmien erityispiirteitä sekä niiden käyttömahdollisuuksia.

4.2 Betonin 3D-tulostamisen historiaa

Materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä on kehitetty 1980-luvulla, ja siitä on kehittynyt ajan myötä olennainen osa modernia materiaalinvalmistusta. Menetelmällä voidaan tulostaa muun muassa muovia, metallia sekä betonia ja materiaali voi olla tulostettaessa jauhamaista, kiinteää tai nestemäistä. Menetelmä on kehityksen myötä vakiintunut käytettäväksi muun muassa ilmailu- ja autoteollisuudessa sekä lääketieteen sovellutuksissa, mutta betonin tulostaminen on vielä kehitysvaiheessa. (Nematollahi ym. 2017; Nadarajah 2018).

Rakennusten 3D-tulostustekniikan kehitys alkoi 1990-luvulla, kun vuosikymmenen puolivälin tienoilla kehitettiin kaksi menetelmää betonirakenteiden tulostamiseksi. Ensimmäinen tekniikoista perustui sementin ja hiekan kerrostamiseen ja niiden kovettamiseen halutun rakenteen valmistamiseksi. Menetelmä oli kokeellinen eikä sitä kehitetty pidemmälle. Toisen menetelmistä kehitti Etelä-Kalifornian yliopistossa tohtori Behrokh Khoshnevis. Menetelmä perustui betonin pursottamiseen ja sai nimekseen Contour Crafting. Menetelmä on vanhin edelleen kehitystyössä oleva teknologia betonin tulostamiseen. Khoshnevisin innovaation myötä menetelmää on ryhdytty kehittämään ympäri maailmaa eri tutkijaryhmien ja -instituutioiden toimesta. 2000-luvun aikana tulostustekniikoita on kehitetty lisää, joista osa perustuu betonin pursottamiselle ja osa jauheen sekä sideaineen levittämiseksi. (Gardiner 2011, 80-82; Wolfs

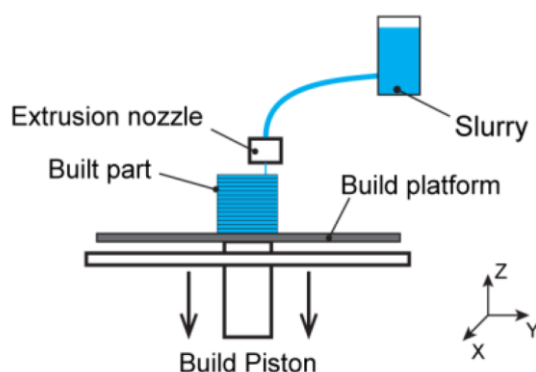
2015; Nematollahi ym. 2017; Nadarajah 2018). Eri tulostusratkaisuja käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.7.

4.3 Betonin 3D-tulostamisessa käytetyt menetelmät

Tulostamalla valmistettavia betonirakenteita varten ei tarvitse tehdä erillisiä valumuotteja kuten tavanomaisilla menetelmillä valmistettaviin. Betonin 3D-tulostaminen perustuu teknologian sekä valettavan massan ominaisuuksien yhdistämiseen. Yleisimmät betonin 3D-tulostusmenetelmät perustuvat pursotus- ja sideainesuihkutusmenetelmiin. (Nematollahi ym. 2017, 2) Betoninrakentamiseen on kehitetty myös 3D-tulostamiseen rinnastettavia menetelmiä. Menetelmät perustuvat ruiskubetonointiin sekä liukuvaluun. (BFT 2021)

4.3.1 Pursotus

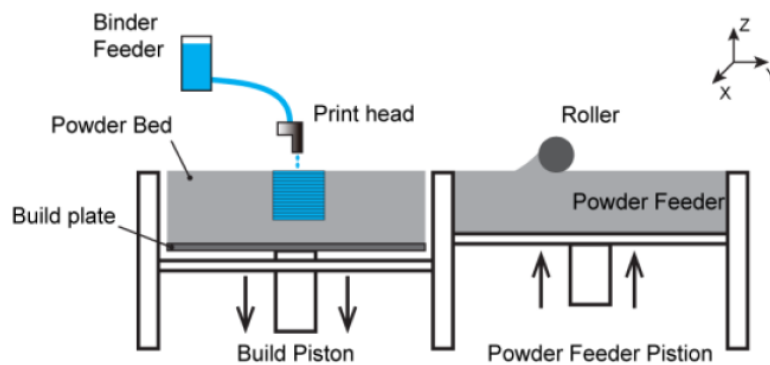
Pursotusmenetelmässä tulostettava rakenne muodostetaan pursottamalla betonia tai betoninkaltaista materiaalia kerroksittain. Pursotuksessa tulostuspäänä olevaa suutinta liikutetaan erityyppisten nosturien tai robottikäsiarven avulla. Menetelmän periaate on kuvattu kuviossa 1. Menetelmällä on mahdollista toteuttaa suuria yksittäisiä rakennusosia tai kokonaisia rakennuksia. (Nematollahi ym. 2017, 2).



Kuvio 1. Periaatekuva pursotusmenetelmästä (Nematollahi 2017)

4.3.2 Sideainesuihkutus

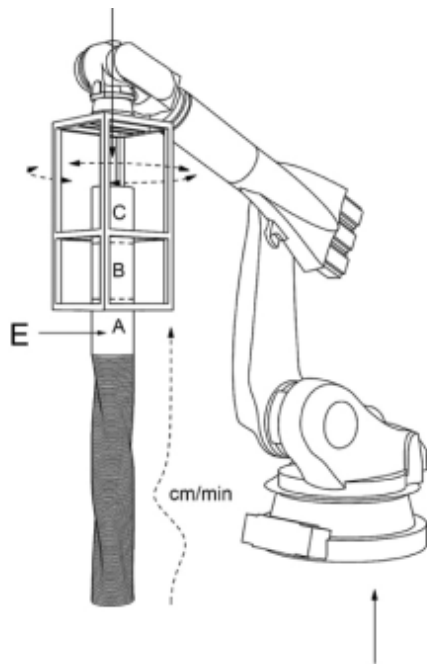
Sideainesuihkutusmenetelmässä rakenne tulostetaan kerroksittain levittämällä vuoron perään jauhetta ja sideainetta. Menetelmässä tulostin levittää ensin jauhetta pedille, jonka jälkeen tulostuspää suihkuttaa sidosainetta määrätylle alueelle jauhekerroksen päälle. Sidosaine sitoo jauhepartikkelit toisiinsa muodostaen tulostettavan rakenteen. Kuviossa 2. on kuvattu menetelmän periaate. Menetelmä soveltuu käytettäväksi pienen mittakaavan ja geometrialtaan monimutkaisten rakenneosien valmistukseen. (Nematollahi ym. 2017, 5).



Kuvio 2. Periaatekuva sideainesuihkutusmenetelmästä (Nematollahi 2017, 6)

4.3.3 Dynaaminen liukuvalu

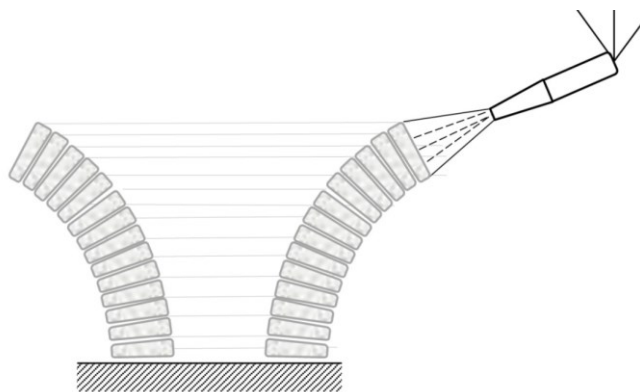
Smart Dynamic Casting (SDC), eli dynaaminen liukuvalu mahdollistaa monimuotoisten ja geometrialtaan optimoitujen pystysuuntaisten betonirakenteiden valmistamisen ilman tavanomaista muottityötä. Liukuvalussa tulostuspää on joko muokkautuva tai jäykkä. Tulostuspää on asennettu robottikäsiin, joka liikuttaa muottia tulostaen halutun rakenteen. Kuviossa 3. on kuvattu menetelmän periaate. Muottia täytetään betonilla samaan aikaan, kun se liikkuu pystysuunnassa. Menetelmä poikkeaa työnjäljeltään pursottamisesta siten, että siitä ei jää kerroksellista rakennetta. Menetelmää käytetään poikkileikkaukseltaan suhteellisen hoikkien betonipilarien valmistamiseen. Tekniikkaa kehitetään edelleen kaarevien, kulmikkaiden ja hoikkien seinien valmistamiseen. (Perrot & Amaziane 2019, 25-27; BFT 2021).



Kuvio 3. Periaatekuva 3D-liukuvalusta (muokattu, Perrot 2019)

4.3.4 3D-ruiskubetonointi

Ruiskubetonitulostus poikkeaa pursotustekniikasta siten, että materiaalia lisätään pursotuksen sijaan ruiskuttamalla sitä kerroksittain. Kuviossa 4. on esitetty menetelmän tulostusperiaate. Ruiskuttaminen tapahtuu robottikäsi- varten lisätyn tulostuspään avulla. Betonoitavan rakenteen geometriaa voidaan muuttaa tulostuksen yhteydessä. Menetelmällä soveltuu muun muassa raudoitettujen seinärakenteiden betonointiin. (BFT 2020)



Kuvio 4. Periaatekuva 3D-ruiskubetoninnista (muokattu, BFT 2021)

4.4 Betonitulostimet

Betonirakenteiden tulostamiseen on kehitetty useita erityyppisiä tulostimia. Tulostintyytit vaihtelevat tulostettavan rakenteen koon ja tulostussijainnin mukaan. Betonirakenteet voidaan tulostaa elementeiksi tai suoraan lopulliseen sijaintiinsa työmaalla. Työmaalla voidaan tulostaa joko koko rakennus kerralla tai osissa tai vain joi-tain tiettyjä pienempiä rakenneosia. Tulostin voi olla erillinen siirrettävä tulostinyk-sikkö, joka asennetaan rakennuksen sisä- tai ulkopuolella tai tulostin voi olla kehikko-mainen rakenne, joka kasataan tulostettavan rakenteen ympärille. Riippumatta tu-lostintyyppistä tulostimien täytyy kuitenkin kyetä liikuttamaan tulostuspäätä hallitusti olosuhteista riippumatta. (Nadarajah ym. 2018; Perrot ym. 2019)

4.4.1 Elementtitehtaot

Tehdasympäristöissä tehtävään tulostamiseen on kehitetty kahden tyyppisiä tulosti-mia. Tehtaissa voidaan hyödyntää robottikäsiavarteen liitettyä tulostinpäätä tai tulos-tinpää voi olla kiinnitettynä siltanosturiin. Robottikäsiavarteen liitetty tulostin ei voi tulostaa kovin suuria kappaleita, kun taas siltanosturiin perustuvalla tulostimella voi-daan tulostaa suuriakin kappaleita. Siltanosturiperiaatteella toimiva tulostin vaatii kiinteästi asennetun teräskehikon toimiakseen. Kuviossa 5. on havainnoitu tehdas-ympäristöön asennettu siltanosturiperiaatteella toimiva tulostin. Tulostettavan kap-paleen koko määräytyy kehikon koon mukaan. (Perrot ym. 2019).



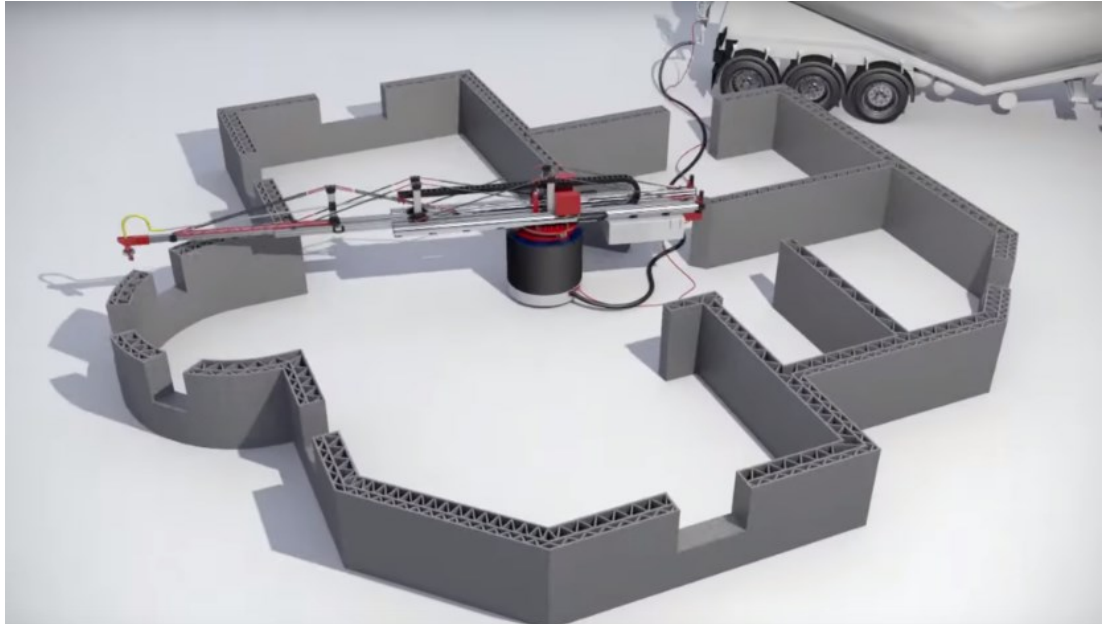
Kuvio 5. Periaatekuva tehtaaseen asennetusta tulostimesta (Nadarajah ym. 2018)

4.4.2 Paikallarakentaminen

Työmaaolosuhteissa tehtävään tulostamiseen on kehitetty erityyppisiä variaatioita, jotka perustuvat muun muassa siltanostureihin, robottikäsiin ja olemassa oleviin betonipumppuautoihin. Näiden lisäksi on kehitysvaiheensa alkumetreillä myös vaijeilla ja torninosturilla liikuteltava tulostinpää. Tulostin voidaan sijoittaa joko rakennuksen sisälle tai sen ulkopuolelle. (Perrot ym. 2019; Nadarajah ym. 2018)

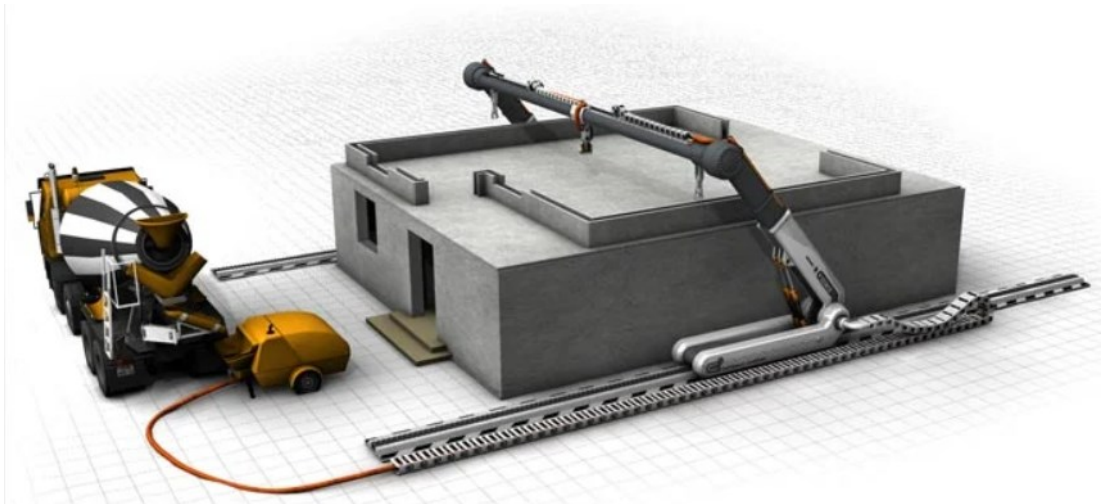
Sisälle sijoitettavat tulostimet ovat pieniä siirrettäviä tulostimia, jotka voivat tulostaa pienen rakennuksen kokonaan tai tulostinta siirrettäessä ison rakennuksen tai tulostaa pelkästään jonkin pienemmän rakennusosan. Tulostin voi olla joko tela-alustalle asennettu robottikäsi tai pieni puominosturi -tyyppinen tulostin. Puominosturissa tulostuskorkeutta säädetään nostamalla ja laskemalla tulostimen runkoa. Kuviossa 6. on havainnekuva rakennuksen sisäpuolelle asennettavasta puomitulosti-

mesta. Tulostinpää liikkuu puomia pitkin ja puomi voi pyöriä akselinsa ympäri. Robottikäsivarsitulostimen ulottuvuus on puominosturiin perustuvaa tulostinta pienempi. (Perrot 2019; Nadarajah 2018)



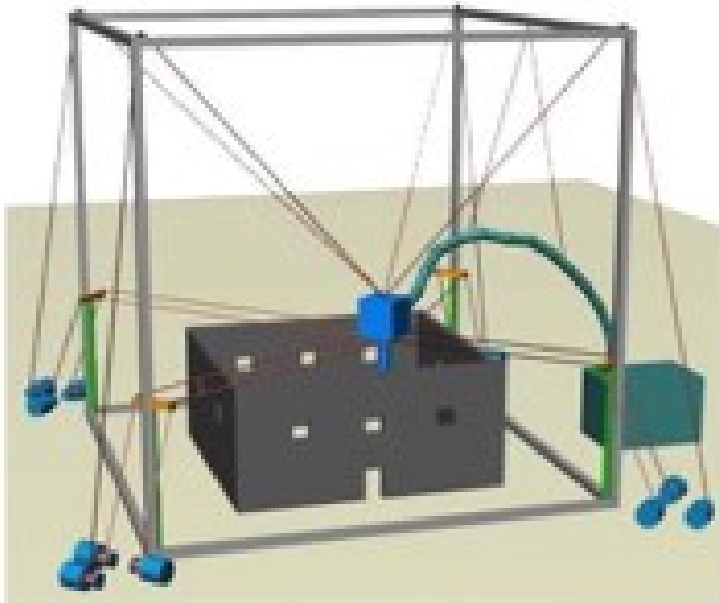
Kuvio 6. Periaatekuva rakennuksen sisälle sijoitettavasta tulostimesta (Apis Cor 2021)

Rakennuksen ulkopuolelle sijoitettava tulostin perustuu rakennuksen ympärille kasattavan kehikon varassa liikkuvaan tulostuspäähän, olemassa olevaan betonipumppuautoon tai puominosturiin. Rakennuksen ympärillä kulkeva siltanosturi vaatii kehikolleen tasaisen alustan toimiakseen. Tulostin tulostaa koko rakennuksen kerralla samasta sijainnista, eikä tulostinta siirretä kesken tulostustyön. Tulostimen kehikko määrää tulostettavan rakennuksen maksimikoon. Kehikkotyyppisiä tulostimia on myös pienempiä, joita voidaan siirtää tai niistä voidaan kasata modulaarisia tulostimia tulostaakseen suurempia kokonaisuuksia. Kuviossa 7. on havainnekuva rakennuksen ulkopuolelle asennettavasta siltanosturiin perustavasta tulostimesta. (Perrot ym. 2019)



Kuvio 7. Periaate rakennuksen ulkopuolella toimivasta tulostimesta (3D Printing.com 2021)

Erityisen suurien tulostettavien rakennusten tulostamiseen on kehitetty myös muita tulostusmahdollisuuksia. Rakennuksen ympärille voidaan kasata teräskehikko, jonka varassa vaijereilla liikuteltava tulostinpää tulostaa rakennuksen. Myös ristikkopuominosturilla liikuteltava tulostinpää on yksi mahdollinen tapa tulostaa suuria rakennuksia. Kuvioissa 8. ja 9. on havainnoitu vaijerilla liikutettava sekä torninosturiin kytkettävän tulostimen toimintaperiaatteet. Kehitteillä on myös tekniikka, jossa tavanomaiseen betonipumppuautoon on liitetty tulostuspää. Tällöin erillistä rakennetta tulostimelle ei tarvita, vaan tulostimena hyödynnetään olemassa olevaa kalustoa. Kuviossa 10. on kuvattu menetelmä, jossa betonipumppuautoon on kytketty tulostuspää. (Perrot ym. 2019)



Kuvio 8. Periaatekuva vaijereilla liikutettavasta tulostimesta (Perrot ym. 2019)



Kuvio 9. Periaatekuva ristikkopuominosturilla liikutettavasta tulostimesta (Perrot ym. 2019)



Kuvio 10. Periaatekuva betonipumppuauto -3D-tulostimesta (Perrot ym. 2019)

4.5 Tulostuskelpoisen betonin olennaiset ominaisuudet

Tulostettavan betonin ominaisuuksilla on suuri merkitys tulostettujen rakenteiden onnistumisessa. Tavanomainen betoni ei sellaisenaan kelpaa, vaan se täytyy optimoida reseptiikalla 3D-tulostukseen soveltuvaksi. Reseptiikassa on otettava huomioon tuoreen sekä kovettuneen massan ominaisuudet. Tulostettavan betonin tärkeimmät ominaisuudet ovat; pursotettavuus, notkeus, rakennettavuus, avoin aika sekä tulostuspintojen välinen kontakti. Pursotettavuus, notkeus ja avoin aika liittyvät olennaisesti massan koostumukseen ja valuaikaan. Kovettuneen betonin ominaisuuksia ovat muun muassa puristuslujuus, taivutuslujuus ja sidoslujuus. (Nadarajah ym. 2018, 23; Valente, Sibai & Sambucci 2019, 6-7)

Pursotettavuudella tarkoitetaan massan kykyä säilyttää fysikaaliset ja kemialliset ominaisuutensa tasalaatuisena massan valmistushetkestä tulostamiseen asti. Massan ominaisuuksia säädettäessä on otettava huomioon koko tulostusprosessi, johon liittyy massan lisäksi muun muassa, suuttimen geometria, pursottimen ominaisuudet sekä pumppausjärjestelmä. Betonin ominaisuuksia säädettäessä tulee ottaa huomioon myös tulostusnopeus sekä aika, joka kuluu betonimassan valmistamisesta ja kuljettamisesta tulostimelle. Betonin tulee virrata pumpussa tasaisesti ja sen tulee pysyä valettaessa edellisten kerrosten päällä. Keskeytymätön tulostustapahtuma ja muotonsa säilyttävä massa ovat merkki hyvästä massan pursotettavuudesta. Tulostuksen

nopeuteen vaikuttaa myös rakenteen arkkitehtuuri. Jos rakenteet ovat muodoltaan monimutkaisia, on tulostusnopeuden myös oltava hitaampi paremman tulostusjäljen aikaansaamiseksi. (Nadarajah ym. 2018, 23-24; Valente ym. 2019, 7)

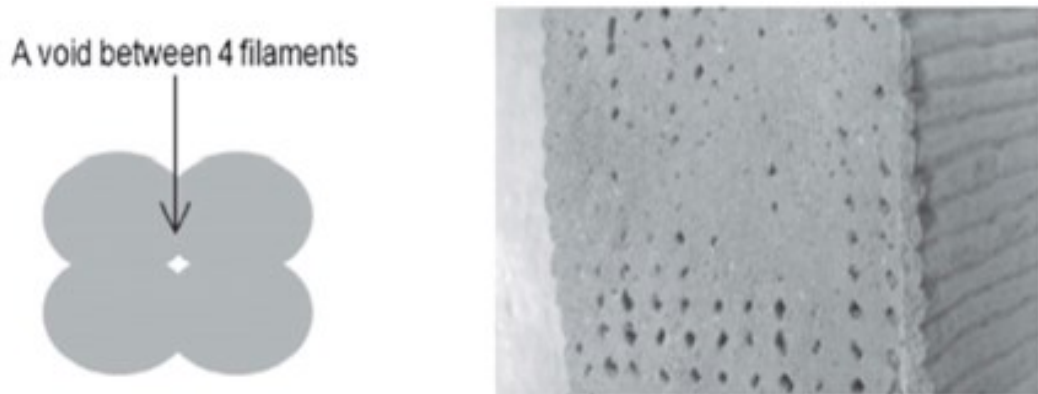
Rakennettavuudella tarkoitetaan betonin kykyä kantaa tulostettavat kerrokset ilman rakenteen muodonmuutoksia. Betonikerroksen kovettuminen ennen seuraavaa kerrosta on olennainen tekijä tulostuksen onnistumisen kannalta. Massan niin sanottu avoin aika täytyy olla oikeassa suhteessa tulostukseen nähden. Tulostetun massan tulee pysyä kasassa, mutta kuitenkin kyetä muodostamaan saumaton liitos seuraavan tulostettavan kerroksen kanssa. (Valente ym. 2019, 7; Nadarajah ym. 2018, 25)

Myös runkoaineen koko vaikuttaa betonin rakennettavuuteen olennaisesti. Suositeltu maksimiraekoko massalla on 4 – 16 mm. Karkea runkoaine vaikuttaa kuitenkin tulostusjälkeen jättäen betonipinnan karkeaksi. Maksimiraekokoa rajoittaa yleensä myös tulostimen tulostuspää, mutta tyypillinen tulostuskerroksen paksuus sallii hyvin 16 mm runkoaineen käytön. Siistimmän tulostusjäljen takia useimmat tutkijat suosivat pienen maksimiraekoon käyttöä. Tyypillisesti käytetty maksimiraekoko on neljästä kuuteen millimetriä. (Nadarajah ym. 2018, 25)

Tulostuksessa käytettävän betonin rakennettavuuteen voidaan vaikuttaa myös lisäaineilla, muuttamalla massan lämpötilaa tai optimoimalla kipsin määrää betonimassassa. Lisäaineilla, kuten kiihdyttimillä, hidastimilla ja notkistimilla voidaan vaikuttaa massan sitoutumisnopeuteen ja notkuteen. Lämpötilaa lisäämällä saadaan nopeutettua betonin hydrataatioaika. Suuri kipsimäärä betonissa hidastaa sitoutumisaikaa, joten sen määrä betonissa tulisi olla alle kolme prosenttia sementin määrästä. (Nadarajah ym. 2018, 26-27; Valente ym. 2019, 7)

Tulostettavien kerrosten välille täytyy muodostua hyvä kontakti, jotta rakenteesta tulee yhtenäinen. Tulostetun betonimassan tulee olla vielä sitoutumisvaiheessa ennen kuin sen päälle lisätään seuraava kerros. Jos betoni on alkanut jo kovettumaan, ei kerroksista muodostu yhtenäistä rakennetta. Liian jäykkä massa heikentää kerrosten välistä sitoutumista ja heikentää lopullista rakennetta. Kuviossa 11. on kuvattuna

epätäydellinen valukerrosten sitoutuminen. Betonikerrosten välisen sidoksen aikaansaamiseksi sekä tulostettavan rakenteen vakauden saavuttamiseksi myös tulostuspään muodolla on merkitystä. Poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen tulostuskerros on osoittautunut kaikista vakaimmaksi rakenteeksi, joka mahdollistaa myös parhaimman kontaktipinnan eri kerrosten välille. Pyöreä tulostuspää tekee epävakaimman tulostuskerroksen, joka saattaa aiheuttaa pahimmillaan rakenteen sortumisen tulostuksen aikana. Tulostuspään koko vaihtelee 20 millimetristä 80 millimetriin. (Nadarajah ym. 2018, 27; Valente ym. 2019, 7)



Kuvio 11. Epätäydellisesti sitoutuneiden valukerrosten poikkileikkaus (Valente ym. 2019)

4.6 Tulostusratkaisuja

4.6.1 Apis Cor

Apis Cor on kehittänyt betonin 3D-tulostamiseen menetelmän, jolla voidaan tulostaa betonirakenteita rakennustyömaaolosuhteissa. Menetelmässä käytetään siirrettävää kevytrakenteista tulostusrobottia, joka liikuttaa tulostuspäätä puomin varassa. Puomi pyörii tulostimen akselin ympäri 360-astetta. Menetelmä perustuu betonin pursottamiseen. (Apis Cor 2021)

Tulostusmenetelmässä seinärakenteista tulostetaan sisä- ja ulkokuori ja niiden väliin vahvikerakenne. Seinän onteloihin voidaan asentaa harjateräksiä, jonka jälkeen ontelot valetaan täyteteeen tavanomaisella betonilla. Seinän onteloihin voidaan myös ruis-

kuttaa eristeeksi polyuretaania. Menetelmässä etuna on tulostimen keveys ja liikuteltavuus. Isompi rakennus voidaan tulostaa useammalla tulostimella tai saman tulostimen sijaintia muuttamalla. Menetelmällä on tulostettu pieni yksikerroksinen toimistorakennus sekä 640 neliömetrin kokoinen kaksikerroksinen rakennus. Kuviossa 12 on kuvattuna rakennuksen tulostusprosessi sääsuojassa. Kuviossa 13 on kuvattu rakennuksen tulostusta avoimessa ulkoilmassa. (Apis Cor 2021)

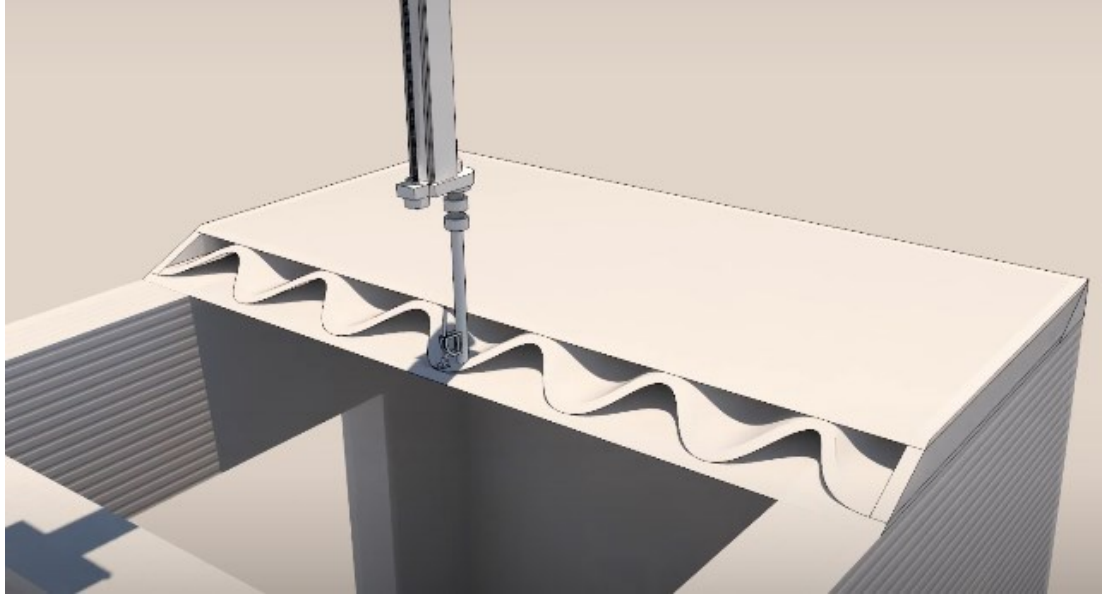


Kuvio 12. Havainnekuva tulostusprosessista (Apis Cor 2021)



Kuvio 13. Havainnekuva rakennustyömaalta (Apis Cor 2021)

Apis Cor kehittää myös välipohjan tulostamista, jolloin erillisiä laattaelementtejä ei tarvita ollenkaan. Menetelmässä edellinen tulostuskerros tukee seuraavaa kerrosta, jolloin rakennetta ei tarvitse tukea erikseen tulostuksen ajaksi. Tulostus etenee viis-tosti kennomaisena rakenteena, jossa ylä- ja alapinnan väliin tulostuu tukirakenne. Menetelmässä tulostettu rakenneosa kantaa seuraavan valukerroksen. Kuviossa 14 on havainnoitu yläpohjalaatan tulostustapa. (Apis Cor 2021)



Kuvio 14. Havainnekuva laatan tulostusprosessista (Apis Cor 2021)

4.6.2 Contour Crafting Corporation

Contour Crafting Corporation on Etelä-Kalifornian yliopiston tohtorin Behrokh Khosh-nevisin perustama yritys, joka tutkii ja kehittää betonin 3D-tulostusteknologiaa. Con-tour Crafting Corporation tulostusmenetelmä perustuu betonin pursotukseen. Yritys kehittää teknologiaa ja menetelmän mahdollisuuksia, mutta on tulostanut ainoas-taan prototyyppinomaisia rakenteita. Yrityksen tulostuskonsepteihin kuuluu pien- ja kerrostalojen tulostusmenetelmä sekä siilomaisten rakenteiden tulostusmenetelmä. (Contour Crafting 2021a)

Rakennusten tulostuskonsepti perustuu siltanosturyyppiseen tulostimeen. Konseptissa tulostin pystytetään tulostettavan rakennuksen ympärille ja rakennus tulostetaan kerralla kokonaisuudessaan. Tulostimesta on kehitetty konseptitasolla kolme erilaista tulostinta tulostettavan rakennuksen koon mukaan; pientalon tulostus, kerrostalontulostus sekä laajarunkoisen kerrostalon tulostus. Kuviossa 15 on kuvattu pientalotulostimen periaate, kuviossa 16 kerrostalotulostimen periaate sekä kuviossa 17 kuvattu laajarunkoisen kerrostalon tulostinperiaate. (Contour Crafting 2021a)



Kuvio 15. Konsepti pientalon tulostamiseen (Contour Crafting 2021b)



Kuvio 16. Konsepti kerrostalon tulostamiseen (Contour Crafting 2021b)



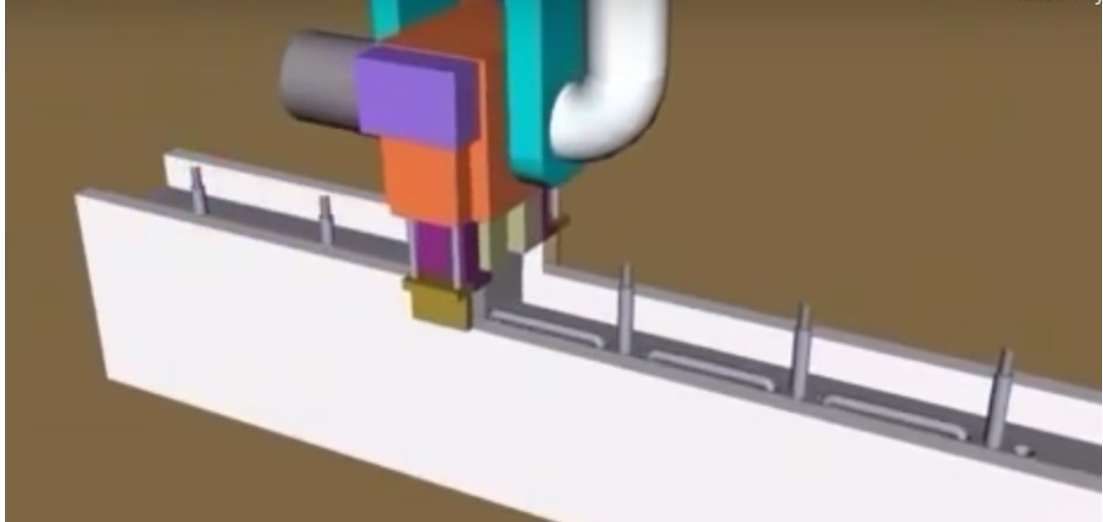
Kuvio 17. Konsepti laajarunkoisen kerrostalon tulostamiseen (Contour Crafting 2021b)

Tulostettavissa seinärakenteista on kaksi eri konseptiversiota. Onttorakenteinen seinä muodostuu sisä- ja ulkokuoresta sekä niiden välissä olevasta tukirakenteesta. Kuviossa 18 on havainnoitu seinän rakenne. (Contour Crafting 2021a)



Kuvio 18. Onttorunkoisen seinärakenteen tulostus (Contour Crafting 2021b)

Toisessa tavassa seinärakenteesta tulostetaan ensin sisä- ja ulkokuori ja keskiosan valu vuoron perään. Tässä menetelmässä seinään asennetaan myös rauditus, mahdolliset vesi- ja viemäriputket sekä sähkökalusteet. Kuviossa 19 on havainnoitu raudoitettavan seinän rakenne ja tulostus. (Contour Crafting 2021a)



Kuvio 19. Raudoitettujen seinärakenteiden periaate (Contour Crafting 2021b)

Raudoitusta ei toteuteta perinteisillä harjateräksillä, vaan konseptissa käytetään omaa ratkaisua. Tulostimessa on robottikäsivarsi, joka asentaa putket ja raudotteet rakenteisiin, aukkojenylityspalkit sekä betonivälipohjaa kannattelevat levyrakenteet. (Contour Crafting 2021a)

Contour Crafting on kehittänyt myös menetelmää, jolla voidaan tulostaa betonista korkeita tornimaisia rakenteita. Näitä rakenteita voivat olla muun muassa tuulivoimaloiden rungot, vesitornit, siltojen pylonit, siilot, piiput jne. Menetelmän ajatus on, että esimerkiksi suuria teräsrakenteita ei tarvitse kuljettaa tehtaalta rakennuspaikalle. Suurien elementtien kuljettaminen vaatii usein myös kalliin erikoiskuljetuksen. Tulostusmenetelmässä tulostinpää liikkuu kehikossa, joka kiipeää tulostuksen edessä tulostettua rakennetta pitkin ylöspäin. Kuviossa 20 on havainnoitu menetelmän periaate. (Contour Crafting 2021a)



Kuvio 20. Havainne tuulivoimalan rungon tulostamisesta (Contour Crafting 2021c)

Konseptissa tulostettava betoni sijaitsee säiliössä tulostimen keskiosassa rakenteen sisällä. Betonisäiliö täytetään maassa ja nostetaan täytenä tulostimelle. Tulostamisen jälkeen kiipeävä tulostin laskeutuu maanpinnalle. (Contour Crafting 2021a)

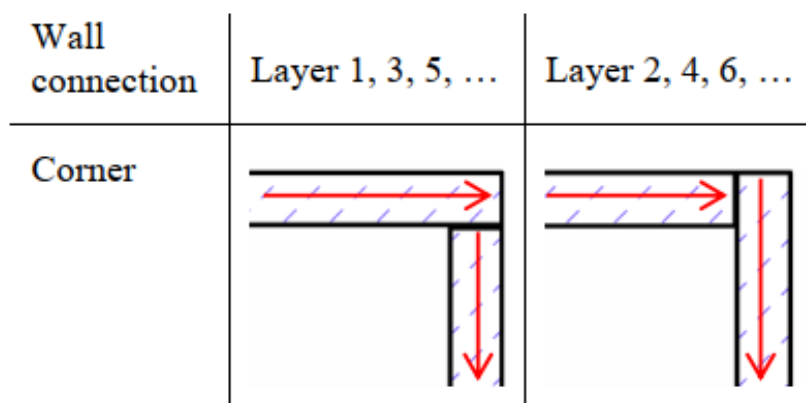
4.6.3 CONPrint3D

Dresdenin tekninen yliopisto, Technische Universität Dresden, on tehnyt kehitystyötä vuodesta 2014 alkaen betonirakenteiden tulostamismenetelmään, joka perustuu betonipumppuauton hyödyntämiseen tulostamisessa. Betonin pursotusmenetelmään perustuva tekniikka on nimeltään Concrete on-site printing (CONPrint3D). Menetelmän olennainen periaate on hyödyntää tulostamisessa betonipumppuautoa sen sijaan, että menetelmää varten tehtäisiin erillistä tulostinta. Betonipumppuauton puomin päähän asennetaan tulostuspää ja autoon liitetään tulostamiseen tarvittava teknologia. Tulostusmenetelmän toiminta on havainnoitu kuviossa 21. Näin ollen suurien rakennusten tulostamiseen ei tarvitse tehdä erillisiä kehiikorakenteita, vaan tulostaminen saadaan toteutettua olemassa olevan kaluston avulla. (Krause, M., Bulgakov, A. 2018, 3)



Kuvio 21. CONPrint3D tulostusmenetelmän toimintaperiaate (Krause 2018, 3)

Menetelmä on suunnattu asuinrakennusten tuotantoon korvaamaan perinteisen tiili- ja harkkorakentamisen. Tulostettava rakenne tulostuu massiivisena raudoittamattomana rakenteena. Maksimirunkoaine tulostettavassa betonissa voi olla 16 millimetriä. Tulostuspää tulostaa suorakaiteenmuotoista betonirakennetta, jonka maksimi paksuus on 50 millimetriä. Rakenteen vakauttamiseksi nurkat tulostetaan limittäin eri kerrosten suhteen. Nurkkien tulostusperiaate on esitetty kuviossa 22. (Nematollahi ym. 2017, 3-4, Krause ym. 2018)



Kuvio 22. CONPrint3D tulostusmenetelmän toimintaperiaate (Krause ym. 2018, 4)

Menetelmän on arvioitu säästävän rakennuskustannuksista 25 prosenttia tavanomaisiin menetelmiin verrattuna sekä säästävän merkittävästi rakennusaikaa. Menetelmä on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa. (Krause ym. 2018)

4.6.4 Emerging Objects

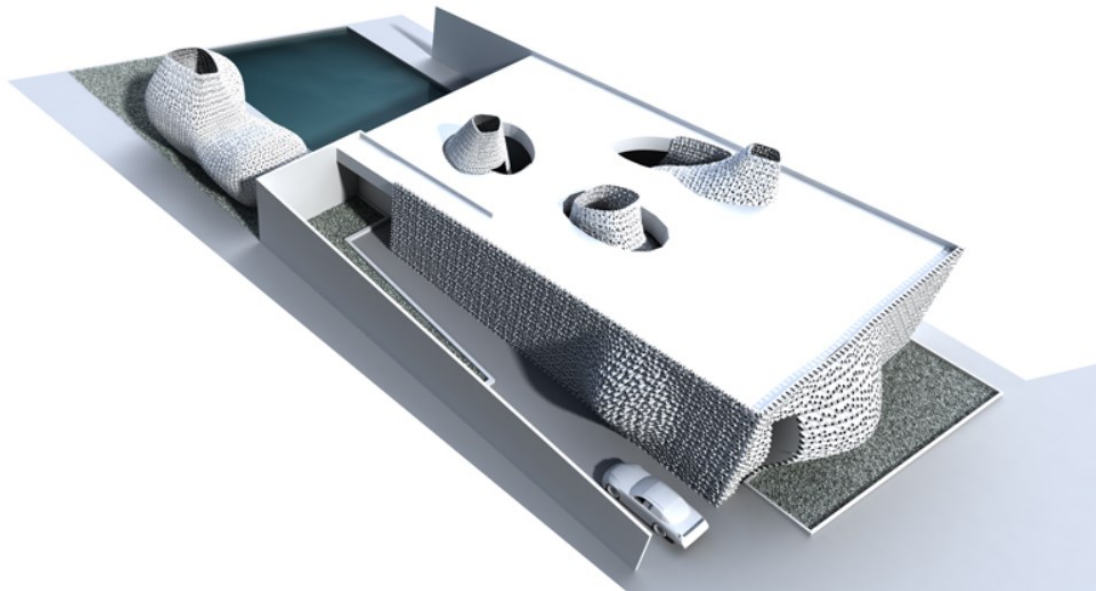
Emerging Objects on yhdysvaltalainen yritys, joka tuottaa 3D-tulostettuja elementtejä sideainesuihkutusmenetelmällä. Menetelmän perusajatus on tulostaa rakennusosia sen sijaan, että tulostettaisiin kokonaisia rakennuksia kerralla. Materiaalivalikoima on laaja, mutta menetelmässä hyödynnetään muun muassa hienon runkoaineen omaavia kuituvahvistettuja sementtipohjaisia materiaaleja. Menetelmällä on tehty rakentamiseen liittyen erilaisia paviljonkiratkaisuja sekä suunniteltu suurempaa rakennuskokonaisuutta. Kuvioissa 23 ja 24 on Emerging Objectsin toteuttamia paviljonkeja ja kuviossa 25 on havainnekuva erillisistä komponenteista tulostetusta rakennuksesta. (Nematollahi ym. 2017; Wolfs 2015; Emerging Objets 2021)



Kuvio 23. 3D-uloitetuista elementeistä koostuva paviljonki, BLOOM (Emerging Objects 2021)



Kuvio 24. 3D-tulostetuista elementeistä koostuva paviljonki, SHED (Emerging Objects 2021)



Kuvio 25. 3D-tulostetuista elementeistä koostuva rakennus (Emerging Objects 2021)

4.7 Betonin 3D-tulostuksen potentiaali ja haasteet

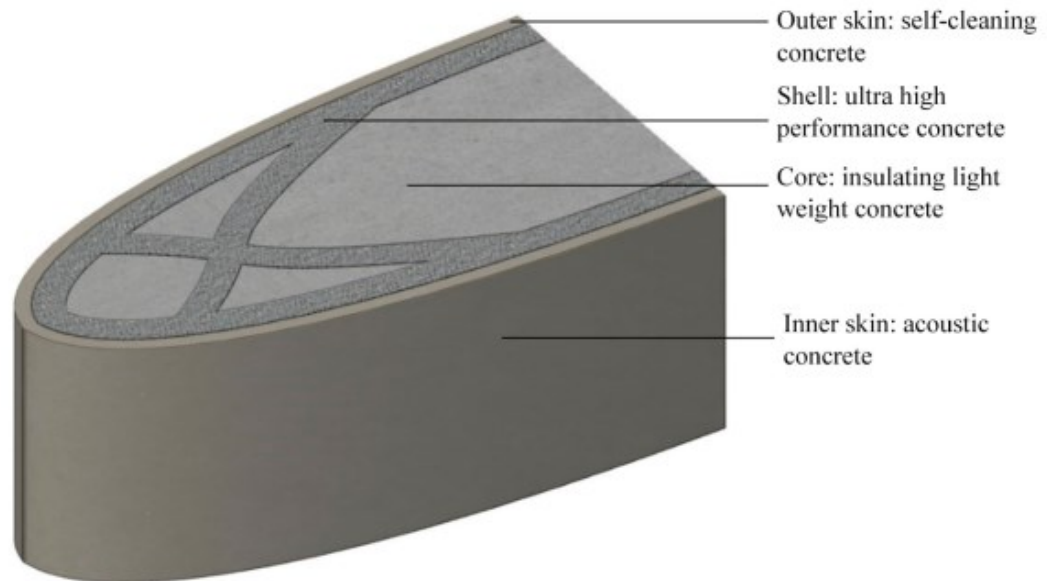
Betonin 3D-tulostusmenetelmällä on useita potentiaalisia mahdollisuuksia tavanomaiseen betonirakentamiseen verrattuna. Betonin 3D-tulostamisen arvioidaan tuovan vapauksia betonirakenteiden suunnitteluun, lisää tehokkuutta rakennustyön toteutukseen sekä vähentää rakennusjätteen syntymistä. (Nematollahi ym. 2017, 1)

Betonin 3D-tulostaminen tarjoaa suunnittelulle arkkitehtonisia vapauksia. Monimutkaisten rakenteiden toteuttaminen onnistuu helpommin 3D-tulostamalla kuin perinteisellä muottitekniikalla. Suunnittelussa on näin ollen enemmän mahdollisuuksia yhdistää rakenteiden arkkitehtuuria sekä rakenteellista toiminnallisuutta. (Nematollahi ym. 2017, 1-2; Valente 2019, 9)

Rakennusvaiheessa 3D-tulostaminen lisää työn tehokkuutta ja lisää kustannussäästöjä, lyhentää rakentamisaikaa sekä pienentää rakennusvirheiden mahdollisuuksia. Kustannussäästöjä saavutetaan muottityön poisjäämisestä sekä rakentamisajan pienemmästä työntekijätarpeesta. Tavanomaisessa rakentamisessa muottien asentaminen sekä valutyö ovat korvattavissa 3D-tulostamalla. Tulostin ei myöskään tarvitse samanlaisia taukoja kuin ihmiset, joka lisää osaltaan työn tuottavuutta. Menetelmällä voidaan parantaa rakentamisen laatua, jotka johtuvat työvoimapulasta ja rakennusajaisista virheistä. Betonirakenteiden 3D-tulostamisella voidaan myös vähentää työturvallisuusriskejä. Betonirakentaminen voi aiheuttaa muun muassa silmä-, iho- ja hengitystie vaivoja. Myös erilaiset liukastumiset, kaatumiset ja putoamiset ovat betonointityössä mahdollisia työtaturmia. (Nematollahi ym. 2017, 2; Valente ym. 2019, 9; Bos, F., Wolfs, R., Zeeshan, A. & Theo, S. 2016, 2)

Betonirakenteita tulostamalla saavutetaan myös ympäristöarvoja. Tulostaminen vähentää muottityön tarvetta ja näin ollen myös materiaalihävikkiä muottityön osalta. Tavanomaisessa betonirakentamisessa muotteja voidaan tosin käyttää useampaan otteeseen, mutta ei aina. Tulostaminen myös vähentää osaltaan materiaalihukkaa betonoinnissa. (Nematollahi ym. 2017, 2; Valente ym. 2019, 9; Bos ym. 2016, 1)

3D-tulostustekniikka mahdollistaa myös perinteisestä tavasta poikkeavan lähestymistavan rakenteiden valmistamiseen. Betonirakenne voidaan tulostaa eri materiaalilla riippuen rakenteen vaatimuksista. Kuviossa 26 on havainnoitu betonirakenne, joka on tulostettu eri materiaaleilla. Ulkopinta rakenteesta voidaan tulostaa tietyllä massalla ja sisäosa toisella massalla rakenteiden ja materiaalin käytön optimoimiseksi. (Bos ym. 2016, 1)



Kuvio 26. Eri betonilaaduilla tulostettu rakenne (Bos ym. 2016)

Betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittäminen vie eteenpäin myös materiaalinkehitystä. Pursotettavalta betonimassalta edellytetään mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia sekä soveltuvuutta. Tulostettavan massan kehittämisessä keskitytään myös teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämiseen, joiden avulla on tarkoitus vähentää luonnonvarojen kuluttamista, energiankulutusta sekä saastuttamista. Geopolymeeripohjainen betonimassa vähentää myös osaltaan hiilidioksidipäästöjä. (Valente ym. 2019 s. 14-15)

Vaikka betonin tulostamisella on useita hyötyjä, on standardien ja määräysten yhtenäistäminen 3D-tulostettavien betonirakenteiden testaamiseksi ja valmistamiseksi olennaista. Lisäksi tulostettavan betonin kehitykseen sekä tulostusprosessin kehittämiseen on panostettava. (Valente 2019 s. 17)

5 Kyselytutkimus

5.1 Kyselylomake tiedonkeruuvälineenä

Kyselytutkimuksen onnistuminen riippuu pääosin kyselylomakkeen onnistumisesta. Koska lomakkeeseen ei voi jälkikäteen tehdä muutoksia, on lomakkeen laatiminen tehtävä huolella. Kyselylomakkeessa tulee ottaa huomioon sekä tilastolliset että laadulliset näkökulmat, jotta lomakkeesta tulee onnistunut. Merkillepantavaa kyselytutkimuksessa on myös se, että kysytään tutkimuksen kannalta merkityksellisiä asioita. (Vehkalahti 2010, 20)

Mittauksen luotettavuuden arvioimiseen liittyy peruskäsitteet validiteetti sekä reliabiliteetti. Käsitteet voidaan kääntää suomen kielellä termeiksi pätevyys ja tarkkuus. Toisinaanottuna validiteetti kertoo, onko mitattu sitä mitä piti ja reliabiliteetti kertoo, kuinka tarkasti on mitattu. Kyselytutkimuksen kannalta validiteetti on keskeisessä osassa sillä, jos oikeaa asiaa ei mitata, niin mittauksen reliabiliteetillakaan ei ole merkitystä. Mittauksen reliabiliteettitaso on kuitenkin syytä nostaa mahdollisimman korkealle. Reliabiliteettitaso on sitä korkeampi, mitä vähemmän mittauksessa on mittausvirheitä. (Vehkalahti 2008, 40-41).

Kyselytutkimuksen toteuttaminen nettipohjaisella kyselylomakkeella valikoitui olemassa olevista vaihtoehdoista järkevimmäksi toteutustavaksi. Tutkimus olisi voitu toteuttaa esimerkiksi haastattelemalla muutamaa henkilöä kohderyhmästä ja tehdä tutkimus näiden vastausten perusteella. Haastattelu olisi vaatinut enemmän aikaa haastattelutilanteiden järjestämiseen sekä tulosten analysointiin. Opinnäytetyöhön tekemiseen käytettävissä oleva aika rajasi tämän vaihtoehdon pois.

Kyselylomake mahdollisti yleistason kysymysten tekemisen koko kohderyhmälle lyhyellä aikavälillä. Haastattelutilanteissa toki olisi voinut saada haastateltavista enemmän irti, mutta toisaalta kyselytutkimuksella oli tavoitteena hakea näkemys betonin

3D-tulostamisesta verrattain isolta kohderyhmältä. Oletuksena oli, että kyselytutkimuksen jälkeen voi hanke voi toteuttaa tarvittaessa jatkotutkimuksia esimerkiksi haastattelemalla kohderyhmän aktiivisimpia tahoja.

Tutkimusmenetelmäksi valikoitui nettipohjainen kyselylomake. Lomake toteutettiin Webropol-kyselyohjelmistolla. Tämä nopeutti lomakkeen laatimista sekä sen lähettämistä vastaajille. Myös tulosten analysointi on vaivattomampaa, kun kyselytutkimusohjelmistolla voidaan tehdä tutkimuksesta yhteenvetoja.

5.2 Tutkimuksen kohderyhmän määrittäminen

Tutkimukseen valitun osan tulee olla sellainen, joka vastaa ominaisuuksiltaan edustamaansa kohderyhmää. Otoksen tulee siis olla riittävän kattava, jotta se on kohderyhmäänsä edustava. Tutkimuksen kohderyhmää kutsutaan populaatioksi ja siitä valittua ryhmää otokseksi. (Kananen 2010, 96)

Otantamenetelmä täytyy valita tapauskohtaisesti. Jotta oikea menetelmä voidaan valita, tulee tutkijan tuntea tutkittava ryhmä sekä otantamenetelmät. Otantamenetelmät jakautuvat kahteen pääryhmään; todennäköisyysotantaan sekä ei-todennäköisyysotantaan. Todennäköisyysotanta jakautuu yksinkertaiseen satunnaisotantaan, systemaattiseen- ja ositettuun otantaan sekä ryväotantaan. Ei-todennäköisyysotanta jakautuu harkinnanvaraiseen otantaan, kiintiöpoimintaan sekä mukavuusotantaan. (Kananen 2010, 97-101).

Kohderyhmä kyselytutkimukseen määräytyi harkinnanvaraisen otannan perusteella. Kanasen mukaan harkinnanvaraisessa otannassa otoksen valittujen havaintoyksiköiden oletetaan edustavan kohderyhmäänsä kattavasti. Otoksen valinta ei siis perustu tilastoihin tai tilastollisiin menetelmiin. Kun jostain ilmiöstä halutaan saada ideoita, käytetään harkinnanvaraista otantaa. Harkinnanvarainen otanta on muun muassa esitutkimukseen soveltuva otanta. (Kananen 2010, 98).

Kyselytutkimuksen kohderyhmä tavoitettiin ensisijaisesti suoralla sähköpostikyselyllä, mutta kyselytutkimus jaettiin myös LinkedIn sivustolla. LinkedIn sivuston kautta mainostettu kyselytutkimus ei kuitenkaan muuttanut otantaa, vaan oli yksi väylä tavoittaa kohderyhmän mukainen otos.

Tutkimuksessa haluttiin selvittää betonin 3D-tulostamisen käyttöönottomahdollisuudet koko betonirakentamisen tuotantoketjussa. Kyselytutkimuksen kohderyhmään valikoitui arkkitehti- ja rakennesuunnittelijat, betonimassan kehitys- ja tutkimustehtävissä toimivat henkilöt sekä betonielementti- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt. Kohderyhmien edustajiin ei tässä tutkimuksessa laskettu perustyötätekeviä henkilöitä. Kohderyhmän ja otoksen valinnalla haluttiin saada kattava näkemys 3D-tulostamisen soveltuvuudesta betonirakentamisessa.

Tutkimuksen kohderyhmään kuuluvista yrityksistä kyselytutkimuksen valittiin mukaan otos, jonka edustajien oletettiin tuovan kyselyyn parhaiten vastauksia. Otokseen valittiin toimialallaan Suomen suurimpia toimijoita tai toimijoita, joilla arvioitiin olevan tutkimuksen kannalta olennaista erikoisosaamista betonitekniikasta. Oletuksena kohderyhmää rajatessa oli, että suurimmilla toimijoilla saattaa olla betonin 3D-tulostamisesta tietoa suuremmalla todennäköisyydellä kuin pienemmillä toimijoilla. Otokseen valikoidut suunnittelutoimistot ja elementtitehtaat ovat käytännössä Suomen suurimpia toimijoita. Osa rakennusliikkeistä toimii kansallisella tasolla, mutta mukana on myös pienempiä toimijoita. Pienemmät rakennusliikkeet valikoituivat kyselyyn mukaan oman erikoisalansa eli betonirakentamisen takia. Suurimpien yritysten valinta kyselytutkimuksen kohderyhmään vaikutti olettaen, että niillä saattaa olla betonin 3D-tulostusmenetelmästä organisaatiossa enemmän tietoa kuin yksittäisillä pienemmillä toimijoilla.

Jokaisesta edellä mainituista kohderyhmään kuuluvasta toimialasta valittiin neljästä kuuteen yritystä kyselytutkimukseen. Yrityksen sisällä valittiin kolmesta kuuteen henkilöä, joille kysely ensisijaisesti kohdennettiin. Kyselytutkimukseen valittuja yrityksiä oli kaikkiaan 21. Kyselytutkimuksen toteutusta käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.

Kyselytutkimuksen nettilinkki saatekirjeineen lähetettiin yritysten internetsivuilla olevien yhteystietojen perusteella. Osalla yrityksistä on yhteystiedot helposti saatavilla, kun taas toisilla yhteystietojen saamiseksi joutuu tekemään hieman selvitystyötä. Esimerkiksi rakennusliikkeiden työnjohtajien yhteystiedot löytyvät usein työmaiden selaamisen kautta, eikä yrityksen yhteystietovälilehdiltä. Yhteystiedot, joihin kyselypyyntö lähetettiin, löytyi pääasiassa internetistä yritysten nettisivujen kautta. Jotkin henkilöt olivat entuudestaan tuttuja ja osalle kysely lähetettiin hankkeen kautta. Kysely lähetettiin kolmesta kuuteen eri osoitteeseen yritystä kohti. Määrään vaikutti paljon yhteystietojen saatavuus. Kyselyn linkki oli myös vapaasti jaettavissa organisaatioissa, joten tämän mahdollisuuden toivottiin myös tuovan lisää vastauksia kyselyyn.

5.3 Otoksen suuruus ja kato

Otoksen suuruuteen vaikuttaa muun muassa populaation rakenne, haluttu tieto ja tiedon tarkkuus. Havaintojen määrän jäädessä pieneksi ei tilastollisia testejä voida toteuttaa luotettavalla tarkkuudella. Toisaalta jos havaintoyksiköt ovat samanlaisia, otokseksi riittää jopa yksi havainto. (Kananen 2010, 102-103)

Kyselytutkimuksen laatimista alkuvaiheessa oli jo selvää, että vastausprosentti saattaa jäädä pieneksi, koska betonin 3D-tulostaminen ei ole yleisesti käytössä oleva rakennusmenetelmä. Kyselytutkimuksen onnistumisen yhtenä mittarina voidaan pitää Kanasen mainitsemaa 30 prosentin vastausmäärää. Vastausprosenttia arvioidessa vertailuarvona pidettiin lähetettyjen kyselyiden määrää, joka oli 90 kappaletta. Kyselytutkimuksen nettilinkki oli avoin ja saatteessa mainittiin, että sitä voi kukin vapaasti jakaa organisaatiossaan. Näin ollen varmuutta sille kuinka moneen osoitteeseen kysely on lähetetty ei ole saatavilla.

Tutkimuksessa on huomioitava myös kato, koska se vaikuttaa tuloksen luotettavuuteen, eli validiteettiin. Kato tarkoittaa vajetta, joka syntyy, kun tutkimuskohdetta ei tavoiteta. Tämä voi johtua muun muassa siitä, että kaikkia otoksen kohdehenkilöitä ei tavoiteta, heillä ei ole tarvittavaa tietoa ilmiön käsittelemiseksi tai kaikki eivät vain

halua osallistua tutkimukseen. Posti- ja internetkyselyissä saavutetaan noin 30 prosentin vastausprosentti niin yritys-, kuin kuluttajatutkimuksissakin. Toisellakaan kyselykierroksella vastausprosenttia ei saada nostettua yleensä kuin noin 50 prosenttiin. Jos vastausprosentti jää vain muutamaankin prosenttiin, niin analyysimenetelmien käyttö on tällöin mahdotonta. Opinnäytetyössä kato pitää dokumentoida ja tuoda esiin. (Kananen 2010, 95-102)

Kadon pienentämiseksi kysely suunniteltiin kaksivaiheiseksi. Ensimmäisessä vaiheessa kysely pidettiin avoimena noin viikon, jonka jälkeen kyselystä laitettiin muistutusviesti. Lisäksi kysely laitettiin myös LinkedIn -sivuston kautta jakoon. LinkedIn:ssä kyselyn linkki oli henkilökohtaisen sekä JAMKin profiilin kautta. Syy, miksi kyselyä ei laitettu heti LinkedInin kautta oli, että haluttiin tietää ensin kuinka aktiivisesti ensisijainen otanta vastaa kyselyyn. Katoa pyrittiin pienentämään myös palkkion avulla. Palkkio kyselyyn vastaamisesta oli, että kaikki halukkaat saavat mahdollisuuden käydä tutustumassa JAMKille hankittavaan betonin 3D-tulostimeen hankkeen toteutusajan puitteissa.

5.4 Kyselylomakkeen laatiminen

Lomakkeella toteutettavan tutkimuskyselyn rakenteeseen kuuluu saatekirje ja kyselylomake. Kyselylomake jakautuu vielä kysymys- ja taustatieto-osioon. Saatekirjeen tarkoitus on esitellä kyselyn tarkoitus, tekijä ja yhteystiedot. Lomakkeen kysymysosion avulla saadaan vastaus tutkimusongelmiin ja taustatiedoilla kartoitetaan vastaajat. Taustatietojen avulla vastaajat voidaan luokitella tutkimustuloksia. Taustakysymyksiä ovat tavanomaisessa kyselytutkimuksessa muun muassa ikä, sukupuoli ja ammatti. Tutkimuslomakkeen looginen rakenne on saatekirje, kysely ja taustatiedot. (Kananen 2010, 92)

Kuten aiemmin mainittu, niin kysely toteutettiin nettikyselyllä Webropol-sovelluksen kautta. Linkki kyselyyn lähetettiin sähköpostilla, jossa oli myös saateteksti. Saateteksti on liitteessä 1. LinkedIn:n kautta haettiin myös lisää potentiaalisia vastaajia suuremman otoksen toivossa. Liitteessä 2. on LinkedIn -sivustolle tehty saateviesti. Sen lisäksi, että kyselyssä oli saateteksti, tehtiin varsinaiseen kyselylomakkeeseen

vielä oma saateosio. Tämä tehtiin sen takia, että jos kyselyn linkkiä jaetaan ilman alkuperäistä sähköpostiviestiä, niin kyselyyn vastaaja saa vielä selville mistä on kyse. Liitteissä 6–15. on esitetty kyselytutkimuksen kysymykset.

Lomakkeen kysymysten laatimisessa hyödynnettiin tietoperustaa betonin 3D-tulostamisesta. Kyselyssä kysyttiin tietoperustassa esille tulleita asioita sekä kartoitettiin vastaajien taustatietoja. Lisäksi kyselyllä pyrittiin selvittämään suhtautumista betonin 3D-tulostusteknologiaa kohtaan.

Kysymyksiä ja vastastausvaihtoehtoja testattiin ja korjattiin kyselylomakkeen laatimisen aikana muutamia kertoja. Lomakkeesta testattiin kysymysten ja vastausvaihtoehtojen tekninen toimivuus sekä se, vastaako esitetyt kysymykset hankkeen tarvitsemiin tietoihin. Kyselyn saatekirje, muistutusviesti sekä LinkedIn -päivityksen viesti käytiin myös läpi ennen julkistamista, jotta viestien sisältö vastaa toimeksiantajan tavoitteita.

Jotta kysymyksiin vastaaminen olisi helppoa, on jokaisen aihealueen kysymysten syytä edettävä yleisluontoisista kysymyksistä yksityiskohtaisempiin kysymyksiin. Kun kysymykset etenevät yleisistä yksityiskohtaisempiin, muodostuu vastaajalle kyselyn edetessä luottamuksellinen vuorovaikutus kyselijään, tai tässä tapauksessa lomakkeeseen. Tämä mahdollistaa myös hankalienkin kysymysten esittämisen. (Kananen 2010, 92-93)

Kyselyssä ei ollut varsinaisia väliotsikoita, mutta kyselyn rakenne muodostui seuraavista osa-alueista;

1. Kyselyyn vastaajan taustatiedot
2. Menetelmän tunnettuus
3. Toimintaympäristön vaikutus menetelmän käytettävyyteen
4. Menetelmän käytettävyyden, hyödyllisyyden ja tulevaisuuden arviointi
5. Avoimet kysymykset menetelmän potentiaalista ja yleistymisestä
6. Vapaa sana betonin 3D-tulostusmenetelmästä

Kyselyn rakenteessa huomioitiin Kanasen edellä mainitsema periaate, eli ensin kysytään helpompia kysymyksiä ja lopussa vaikeampia tai ainakin enemmän pohdintaa edellyttäviä kysymyksiä. Kun vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty kysymykset muotoiltiin siten, että samat kysymykset soveltuvat kaikille kohderyhmän henkilöille. Kyselyn lopussa olevat avoimet kysymykset vaativat hieman enemmän menetelmän tuntemusta tai ainakin antaa vastaajalle vapaudet kertoa näkemyksensä omin sanoin.

Lomakkeen ulkoasun on oltava selkeä sekä helppolukuinen ja kysymysten on oltava helposti ymmärrettäviä sekä yksinkertaisia. Jos teksti on vaikeaselkoista, on mahdollista, että vastaajat eivät jaksa tehdä kyselyä kunnolla loppuun tai tekstin monimutkaisuus voi johtaa virheellisiin tulkintoihin kysymyksistä. (Kananen 2010, 94)

Kyselylomakkeen ulkoasu tuli Webropol-sovelluksen automaattimuotoilusta, johon en tehnyt omia muokkauksia. Kysymykset jaoteltiin edellä luetellun listauksen mukaisiin kokonaisuuksiin siten, että yhdellä sivulla oli tietyntyyppiset kysymykset. Liitteessä olevan kyselytutkimuksen rakenne poikkeaa todellisesta, koska kysymykset tulivat pdf -tulosteeseen peräkkäin ilman kyselyssä ollutta sivujakoa. Liitteissä olevan kyselyn rakenne ei näin ollen vastaa todellista kuvaa, jollainen kyselyn asettelu todellisuudessa oli. Lomakkeen ulkoasuna käytettiin JAMKin vakiopohjaa.

Kanasen mukaan kysymysten toimivuuteen vaikuttaa kolme seikkaa. Ensimmäinen seikka on, että vastaaja ymmärtää kysymykset. Toinen seikka on, että vastaajalla on riittävä tieto kysymysten vastaamiseen. Kolmanneksi vastaajalla täytyy olla halua antaa tieto esitettyyn kysymykseen. Tutkimuksen onnistumisen edellytyksenä on, että kaikki kysymykset täyttävät edellä mainitut kriteerit. Tutkimuksen laatu ja luotettavuus riippuu kysymyksistä. (Kananen 2010, 94)

Ennen varsinaisia kysymyksiä kyselylomakkeella oli kerrottu taustatietoja betonin 3D-tulostamisesta. Tähän päädyttiin siksi, että ei ollut varmuutta onko menetelmä kaikille tuttu. Kohderyhmään kuului kuitenkin rakennusalan ammattilaisia, joten siinä

mielessä tästä osasta ei tehty erityisen mittavaa. Tarkoitus oli tuoda menetelmän periaatteita esille, jotta vastaaminen kyselyyn olisi helpompaa myös niille, joilla ei ole aiheesta aiempaa tietoa.

6 Kyselytutkimuksen tulokset

6.1 Kyselytutkimuksen toteutus ja vastausmäärät

Kyselytutkimus toteutettiin sähköisellä lomakkeella 25.3.-18.4.2021 välisenä aikana. Kyselylomakkeen linkki saatekirjeineen lähetettiin 88 sähköpostiosoitteeseen. Näistä yhteystiedoista kahdeksan oli hankkeen omia kontakteja. Vastauksia kyselyyn tuli 23 kappaletta, joten vastausaktiivisuus jäi melko alhaiseksi ollen 26,1 prosenttia. Vastausprosentti on laskettu lähetettyjen kyselylinkkien perusteella, joten se on karkeasti suuntaa antava. Kyselylinkin jakamista on mahdoton arvioida, kun sitä ei kyselylomakkeella erikseen selvitetty. Tiedossa on kuitenkin, että kyselylinkkiä on jossain määrin jaettu eteenpäin.

Varsinaisen kyselyn jälkeen vastaajilla oli mahdollisuus jättää erillisellä kyselylomakkeella yhteystietonsa 3D-tulostuksen tutustumiskäyntiä varten. Tutustumiskäynti JAMK:n 3D-tulostimeen oli porkkana kyselyyn vastaajille. Tutustumiskäynnin yhteystietojen keräys oli hankkeen vastuulla, joten vastaajien yhteystiedot eivät ole yhdistettävissä tähän tutkimukseen. Tällä järjestelyllä kyselystä saatiin tehtyä anonyymi. Yhteystietoja tutustumiskäyntiä varten annettiin kaikkiaan 16 kappaletta. Vastaajilla oli myös mahdollisuus ottaa itse yhteyttä hankkeeseen mahdollista tutustumiskäyntiä varten, joten asiasta kiinnostuneita voi olla enemmänkin vastaajien joukossa. Tulosten perusteella 69,6 prosenttia kyselytutkimukseen vastaajista oli kiinnostuneita mahdollisuudesta päästä tutustumaan JAMK:n betonin 3D-tulostimeen.

Kyselylomakkeen linkki lähetettiin aluksi pelkästään harkinnan varaisen otannan perusteella sähköpostilla suoraan potentiaalisille vastaajille. Tällä haluttiin saada selville, kuinka aktiivisesti otantaan valitut henkilöt vastaavat kyselyyn. Kyselyn ollessa

aktiivisena 11 vuorokautta julkaistiin linkki myös LinkedIn -sivustolla. Ennen LinkedIn julkaisua kyselyyn oli tullut 10 vastausta. Kyselylinkki jaettiin henkilökohtaisessa sekä JAMK:n LinkedIn -sivuston kautta. Lisäksi alkuperäiselle otokselle lähetettiin muistutusviesti 6.4. kyselyyn osallistumisesta. Näiden lisäksi kysely osoitettiin lisäksi muutamalle henkilökohtaiselle kontaktille LinkedIn:n kautta. Myös osa kyselyyn osallistuneista kertoi jakaneensa kyselylinkkiä sähköpostilla eteenpäin. Kyselylinkki suljettiin 18.4. vaikka alkuperäinen suunnitelma oli lopettaa kysely 11.4. Koska kyselyyn oli hakukkaita osallistujia vielä tämänkin jälkeen, päätettiin kysely pitää auki vielä viikon pidempään. Vastaukset olivat tarpeellisia, joten kyselyn jatkoaika oli järkevä toteuttaa. LinkedIn postista oli katsottu 127 kertaa ja jaettu eteenpäin kerran. Taulukossa 1. on havainnoitu vastausten ajoittuminen tutkimusjaksolle.

Taulukko 1. Vastausmäärien jakautuminen tutkimusjaksolle

vko	ma	ti	ke	to	pe	la	su	yht.
12				1	2		1	4
13	2	1	1	2				6
14		3	3	2				8
15	2				3			5
								23

Kaiken kaikkiaan vastausprosentti jäi vaatimattomaksi, eikä LinkedIn -sivustolla jaettu linkki ja muistutusviesti tuntunut vaikuttaneen vastausaktiivisuuteen. Kyselytutkimuksen vastausprosentille ei asetettu tarkkarajaista tavoitetta, mutta ajateltiin, että 30 prosentin vastaus prosentti olisi ollut melko realistista saavuttaa. Tutkimuksella tavoitettiin kuitenkin siinä määrin riittävästi vastauksia, jotta tuloksia pystyttiin edes jossain määrin analysoida. Positiivisena seikkana oli vastaajien aktiivisuus avoimiin kysymyksiin vastaamisessa. Osassa monivalintakysymyksissä oli jätetty vastaamatta, mutta vain yksittäisissä kysymyksissä. Vastausaktiivisuus avoimissa kysymyksissä oli kysymyksestä riippuen 56,5 – 73,9 prosenttia.

6.2 Tulosten analysointimenetelmät

Kyselytutkimuksen tuloksia analysoitiin Webropol -ohjelmiston tuottamilla taulukoilla. Webropol-ohjelmiston suodatustoiminnot tekivät myös ristiintaulukoinnista

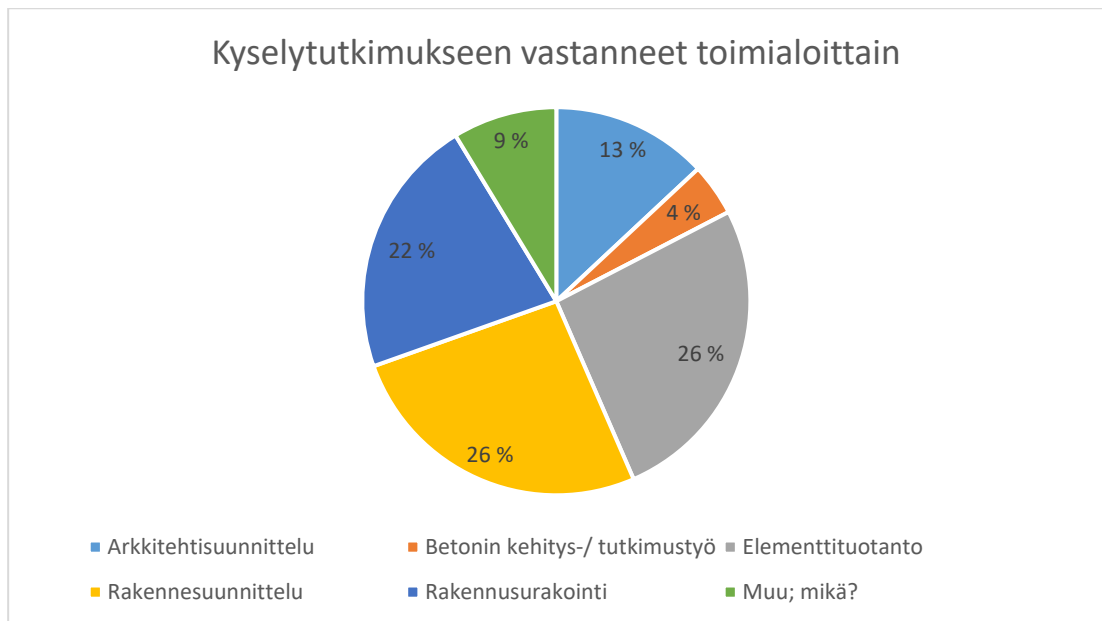
helppoa. Tuloksista kootut kuvaajat on toteutettu Excel-taulukkolaskentaohjelmalla Webropol -sovelluksen luomista taulukoista.

Avoimien kysymysten vastauksia analysoitiin etsimällä vastauksista yhtenäisiä toistuvia teemoja ja vertailemalla niitä monivalintakysymysten vastauksiin. Otos on suhteellisen pieni, joten erityisen syvää analyysiä vastausten osalta ei voi tehdä, mutta päälinjat olivat selvästi havaittavissa ja taulukoitavissa. Koska avoimiin kysymyksiin jätettyihin vastauksiin ei voi tehdä jatkokysymyksiä, jää osa vastauksista hieman tulkinnan varaisiksi. Osassa vastauksissa oli kuitenkin avattu ajatuksia hieman laajemmin, joka edesauttoi tulosten analysointia ja tulkintaa.

Tuloksia tarkastellaan suoran jakauman ja ristiintaulukoinnin avulla. Suorassa jakaumassa tarkastellaan yhtä kysymystä kaikkien vastausten perusteella. Ristiintaulukoidulla vastauksia tarkastellaan ristiin kahden eri vastaajan näkökulmasta. (Kananen 2010, 106). Pienen vastausmäärän takia ristiintaulukointia ei kuitenkaan koettu mielekkääksi tehdä kaikkien kyselyyn osallistuneiden ryhmien välillä. Työssä ristiintaulukointi on toteutettu suunnittelijoiden ja tuotannon kesken. Suunnittelijoilla tarkoitetaan arkkitehdit ja rakennesuunnittelijat ja tuotanto käsittää elementtitehdastyön sekä rakennusurakoinnin. Muiden osapuolien vastauksia oli tullut sen verran vähän, että niiden osalta ristiintaulukointia ei ole tehty vaan heidän vastauksensa ovat mukana ainoastaan suorassa jakaumassa.

6.3 Kyselyyn vastanneiden taustatiedot

Kyselyyn vastasi yhteensä 23 henkilöä ja vastauksia tuli kaikilta tutkimuksen otantaan kuuluvilta toimialoilta. Vastauksia tuli melko tasavertaisesti elementtituotannosta, rakennesuunnittelusta ja rakennusurakoinnista. Jokaisen osuus kaikista vastauksista on noin neljäsosa. Loppu neljäsosa tuli arkkitehdeiltä, betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa työskenteleviltä ja muista vastaajista. Kuviossa 27 on havainnoitu toimialoittain.



Kuvio 27. Kyselytutkimukseen vastanneet toimialoittain

Kyselyyn vastanneista 26 prosenttia työskentelee työnjohtotehtävissä rakennusurakoinnissa tai elementtiteollisuudessa. 30 prosenttia vastaajista kertoo työskentelevän päällikötason tehtävissä toimialasta riippumatta. Suunnittelutehtävissä arkkitehteista työskentelee kaksi kolmasosaa ja rakennesuunnittelijoista reilu 80 prosenttia. Loput vastanneista kertoo työskentelevän muissa toimialansa tehtävissä, kuten esimerkiksi betonielementtien myynnissä, tuotantoinsinöörinä ja tietomallikoordinaattorina.

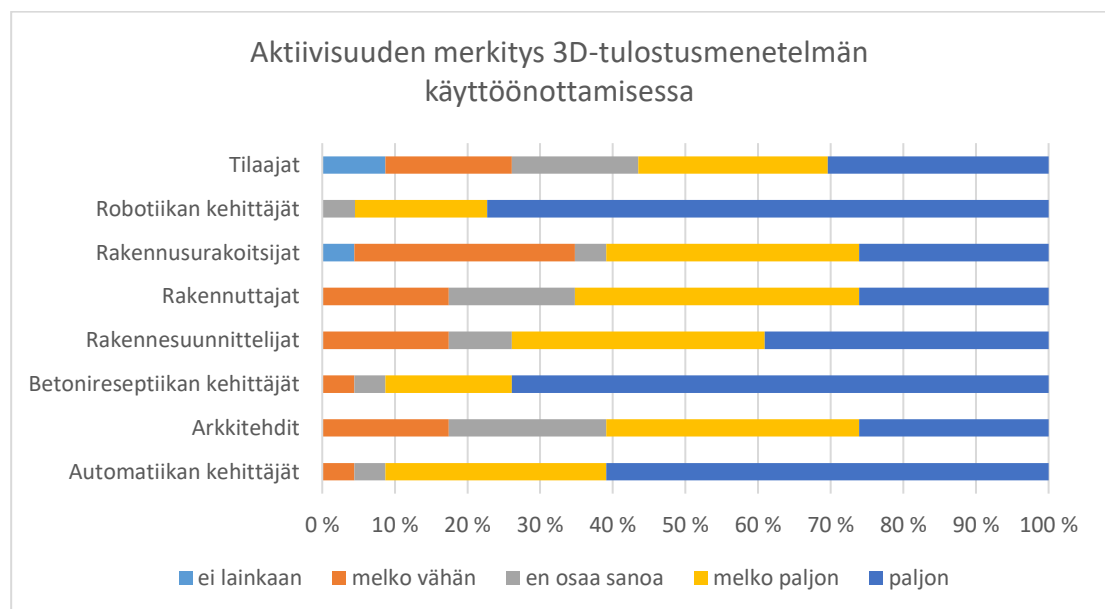
Vastaajien työnantajayritysten toiminta-alue kattaa käytännössä koko Suomen, mutta painottuu Keski- ja Etelä-Suomeen. Vastanneista 61 prosenttia kertoo tuntevansa betonin 3D-tulostusmenetelmän vähintään yleisellä tasolla ja 35 prosenttia on ollut kuullut menetelmästä joskus. Betonin 3D-tulostaminen voidaan otannan perusteella olettaa olevan tunnettu betonirakentamisessa, vaikka kukaan vastaajista ei kuitenkaan kerro työskentelevänsä menetelmän parissa.

Betonin 3D-tulostuksen kehitystä seurataan melko aktiivisesti. Vain noin viidesosa ei seuraa menetelmän kehitystä, mutta keskimäärin 77,8 prosenttia kertoo seuraavansa menetelmää vähintään jonkin verran ja menetelmää kertoo seuraavansa paljon 9 prosenttia.

6.4 Tulosten analysointi

6.4.1 Tuotantoympäristön vaikutus

Betonin 3D-tulostusmenetelmän käyttöönottamiseksi automatiikan, betonireseptiikan sekä robotiikan kehittäjien aktiivisuudella katsotaan olevan vastaajien mielestä suurin merkitys. Vastaajista vähintään 90 prosenttia katsoi edellä mainittujen osapuolien aktiivisuudella olevan vähintään melko paljon vaikutusta. Muiden toimijoiden aktiivisuus menetelmän käyttöönottamiseksi rakennustoiminnassa katsottiin olevan melko lailla tasavertainen. Kuviossa 28 on havainnoitu osapuolien aktiivisuuden merkitys. Menetelmän käyttöönottamiseksi vähiten arvioitiin olevan merkitystä tilaajilla ja rakennusurakoitsijoilla.

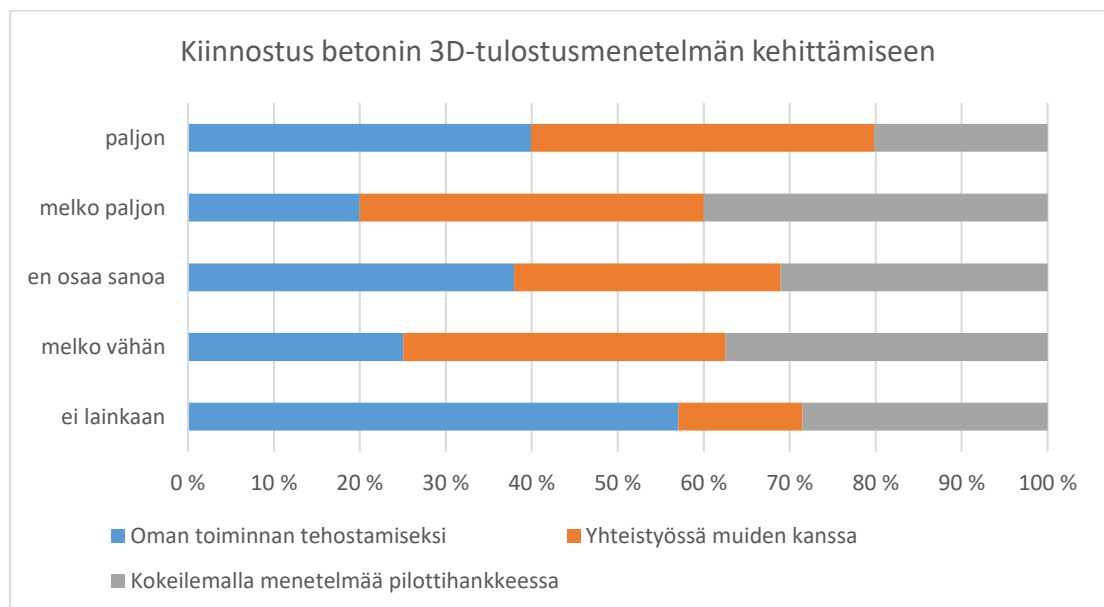


Kuvio 28. Aktiivisuuden merkitys tulostusmenetelmän käyttöönottamisessa

Eri toimijoiden välillä katsottiin olevan kuitenkin tarvetta yhteistyölle menetelmän kehittämiseksi. Vastaajista 91 prosenttia on sitä mieltä, että eri toimijoiden välillä tarvitaan yhteistyötä. Yhteistyön betonin 3D-tulostamisen kehittämiseksi katsottiin olevan tarpeellinen kaikkien toimijoiden kesken suunnittelusta betonirakenteiden toteutukseen sekä tulostusteknologian kehittäjiin. Kukaan vastaajista ei ollut sitä mieltä, etteikö yhteistyötä tarvittaisi betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämiseksi.

Vaikka yhteistyön tarve menetelmän kehittämiseksi on tunnistettavissa, niin halukkaita toimijoita tekemään yhteistyötä menetelmän kehittämiseksi oli alle puolella vastaajista. 43,5 prosenttia kertoo olevansa halukas tekemään yhteistyötä muiden kanssa melko paljon tai paljon.

Vastaajista noin 10 prosenttia kertoo, että työnantajayrityksellä ei ole kiinnostusta kehittää menetelmää osaksi omaa liiketoimintaa, yhteistyössä muiden kanssa tai kokeilemaan menetelmää pilottihankkeissa. Kuviossa 29 on havainnoitu vastaajien näkemys työnantajensa kiinnostuksesta betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämiseen.



Kuvio 29. Betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämisen kiinnostus

Arkkitehdeistä 66,6 prosenttia on kiinnostuneita tekemään yhteistyötä muiden tahojen kanssa tai kokeilemaan menetelmää pilottihankkeessa. Rakennesuunnittelijoilla vastaava kiinnostus oli 33,3 prosentilla vastaajista. Betonielementtituotannon näkökulmasta 50 prosenttia vastaajista on kiinnostuneita kehittämään menetelmää oman toiminnan kehittämiseksi ja kokeilemaan menetelmää pilottihankkeessa. Betonielementtituotannon näkökulmasta 66,6 prosenttia vastaajista on kiinnostuneita tekemään yhteistyötä muiden kanssa melko paljon tai paljon. Rakennusurakoitsijoista 40 prosenttia sanoo, että on kiinnostunut melko vähän kehittämään menetelmää yhteistyössä muiden kanssa tai kokeilemaan menetelmää pilottihankkeessa.

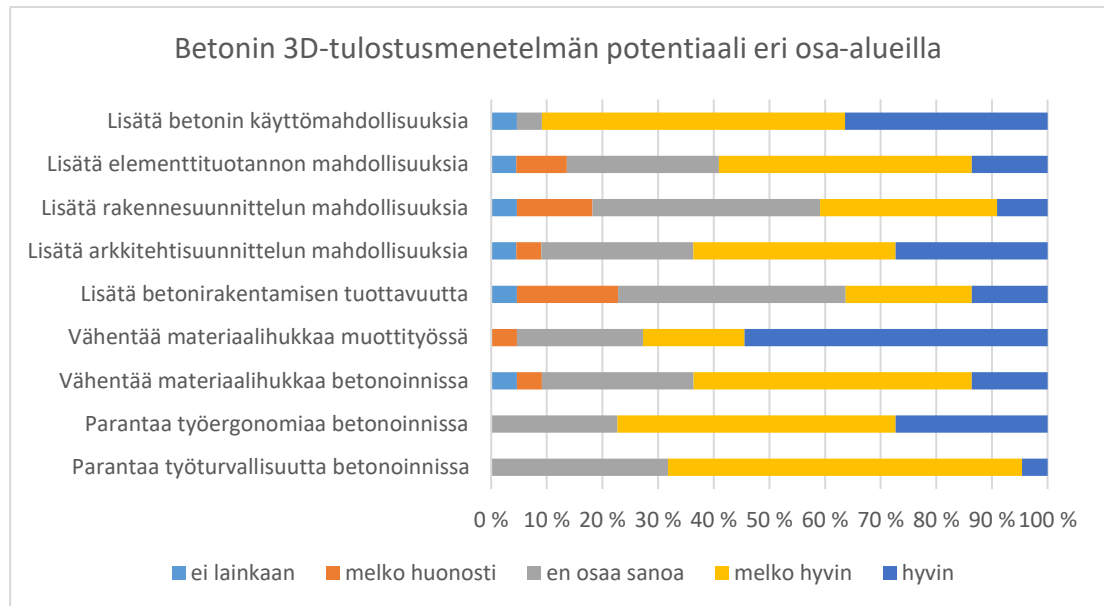
Avoimien vastausten perusteella yhteistyötä toivotaan kaikkien betonin 3D-tulostamiseen liittyvien osapuolien kesken. Yhteistyötä toivotaan laitevalmistajien sekä teknologian kehittäjien lisäksi suunnittelijoilta, elementtivalmistajilta sekä urakoitsijoilta. Käytännössä kaikki vastaajat eri toimialoilta vastasivat samankaltaisesti yhteistyön tarpeesta ja joidenka yhteistyötä tulisi tehdä. Suunnittelijoilla ja laitetoimittajilla katsotaan olevan tarve tehdä yhteistyötä, jotta osapuolet tiedostavat tekniikan rajoitteet sekä laskentaperusteet menetelmän kehittämiseksi. Yhteistyötä tulisi tehdä myös urakoitsijoiden sekä suunnittelijoiden kesken rakennusmenetelmän erityisvaatimusten osalta kuten muun muassa ottaa huomioon rakenteiden kantavuudet tulos-tinlaitteistoille.

Yhteistyön tekemisen tarpeellisuudessa korostuu käytännössä kaikki osapuolet, mutta yhteistyöhön halutaan mukaan myös viranomaiset. Vastauksista ei ilmene tarkemmin, että mihin asioihin toivotaan viranomaisten ottavan kantaa. Teknologian kehittämiseksi yhteistyö prosessiteollisuuden osaajien kanssa katsotaan eduksi.

6.4.2 Betonin 3D-tulostusmenetelmän potentiaali

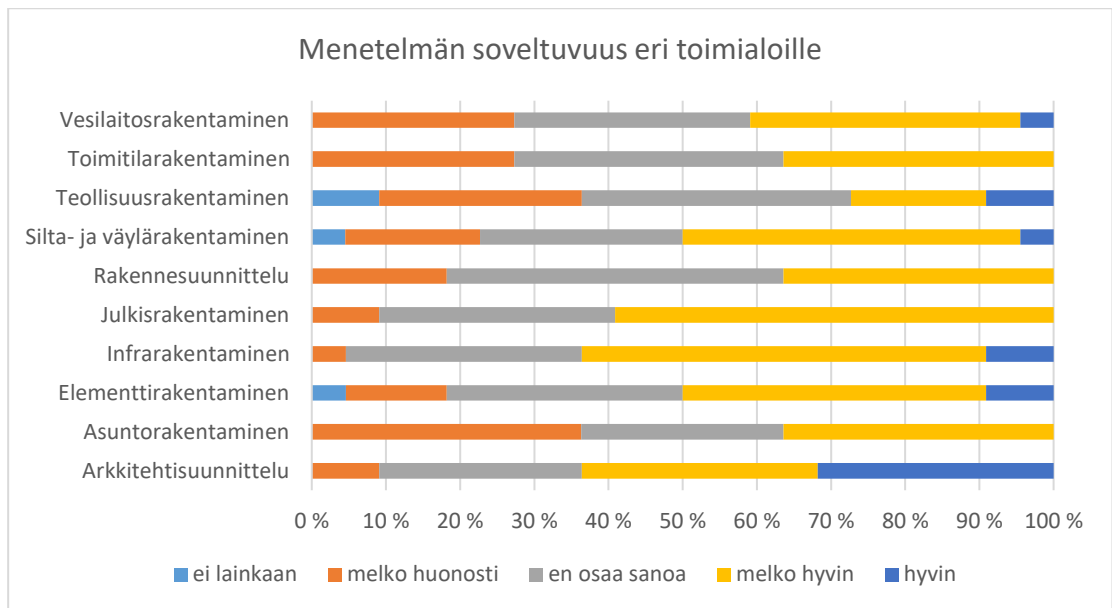
Betonin 3D-tulostusmenetelmän nähdään tuovan positiivista lisäarvoa betonirakentamiseen. 90 prosenttia vastaajista arvioi menetelmän lisäävän betonin käyttömahdollisuuksia rakentamisessa. 68,2 prosenttia arvioi menetelmän käyttämisen parantavan betonoinnin työturvallisuutta vähintään melko hyvin ja 77,3 prosenttia arvioi

menetelmän parantavan työergonomiaa vähintään melko hyvin. 72,7 prosenttia arvioi menetelmän käytön vähentävän muottityön materiaalihukkaa vähintään melko hyvin. Vähiten menetelmän arvioitiin tuovan lisäarvoa betonirakentamisen tuottavuuteen ja rakennesuunnittelun. Kuviossa 30 on havainnoitu menetelmän potentiaalia eri rakentamisenosa-alueilla.



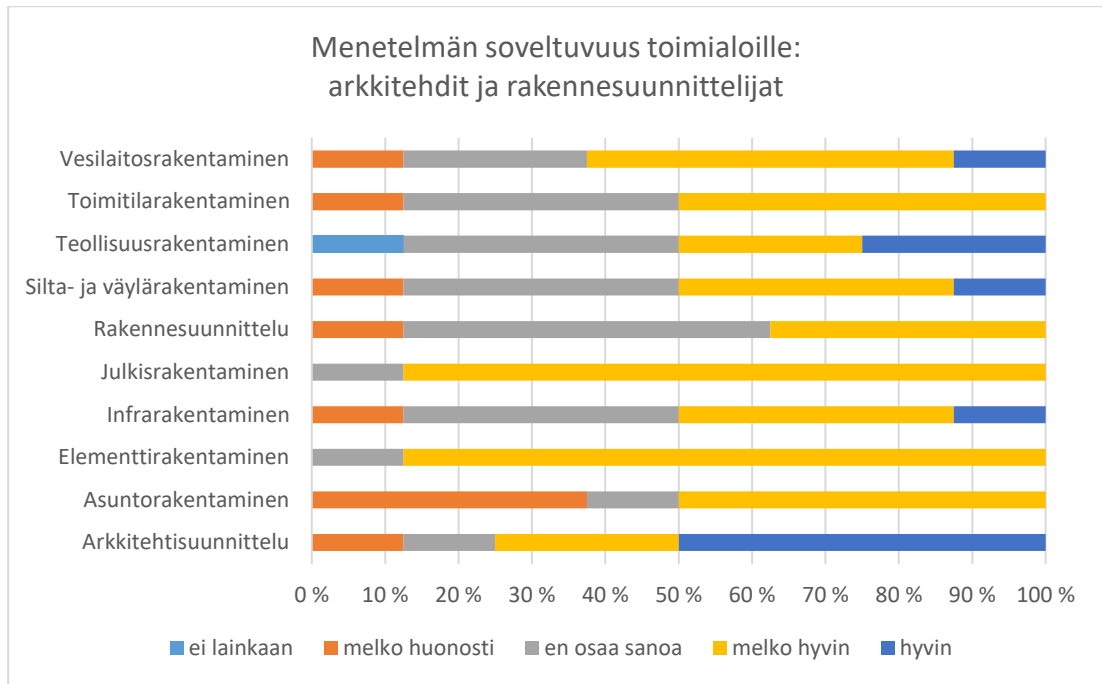
Kuvio 30. Betonin 3D-tulostusmenetelmän arvioitu potentiaali

Menetelmän arvioidaan soveltuvan parhaiten arkkitehtisuunnitteluun, julkisrakentamiseen sekä infrarakentamiseen. Vähiten menetelmän arvioidaan soveltuvan asunto-, teollisuus-, toimitila- ja vesilaitosrakentamiseen. Erot ovat melko pieniä, mutta yleistäen 63,6 prosenttia on sitä mieltä, että 3D-tulostaminen soveltuu melko hyvin tai hyvin arkkitehtisuunnitteluun ja infrarakentamiseen. Reilu 36 prosenttia arvioi, että menetelmä soveltuu melko huonosti tai ei lainkaan silta- ja väylärakentamiseen ja asuntorakentamiseen. Menetelmän soveltumattomuutta siltarakentamiseen perusteltiin vaatimuksilla, jotka eivät suosi elementtirakenteita. Kuviossa 31 on kuvattu menetelmän soveltuvuus eri toimialoille.

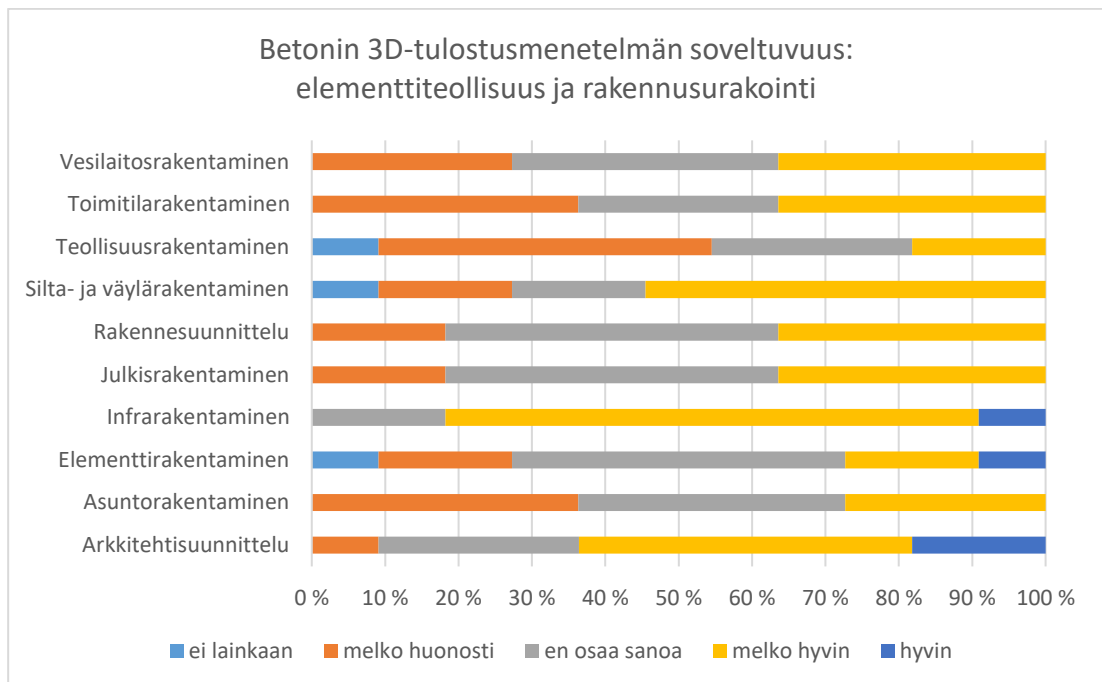


Kuvio 31. Betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuus eri toimialoille

Suunnittelijoiden ja urakointipuolen edustajilla on jokseenkin eri näkemys, mille toimialalle menetelmä parhaiten soveltuisi. Kuviossa 32 on kuvattu suunnittelijoiden näkemys menetelmän soveltuvuudesta ja kuviossa 33 elementtiteollisuuden ja rakennusurakoinnin näkemys asiasta. Suunnittelijoista 87,5 prosenttia arvioi menetelmän soveltuvan melko hyvin elementtirakentamiseen ja julkisrakentamiseen. Elementtiteollisuudessa ja rakennusurakoinnissa työskentelevistä vastaavat luvut ovat 18,2 ja 36,4 prosenttia. Sen sijaan 81,8 prosenttia elementtiteollisuuden ja rakennusurakoinnin parissa työskentelevät arvioi menetelmän soveltuvan infrarakentamiseen melko hyvin tai hyvin. Suunnittelijoista 50 prosenttia uskoo menetelmän soveltuvan melko hyvin tai hyvin infrarakentamiseen. Menetelmän soveltuvuuden asuntorakentamiseen arvioi noin kolmasosa molemmista soveltuvan melko huonosti.

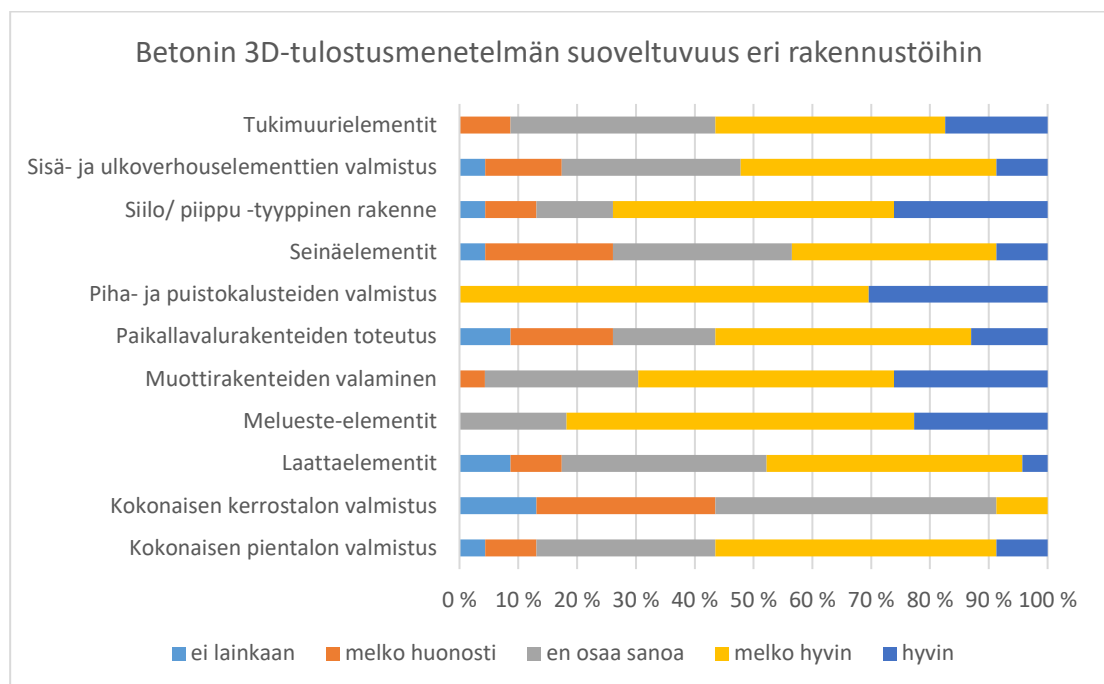


Kuvio 32. Menetelmän soveltuvuus suunnittelijoiden näkökulmasta



Kuvio 33. Menetelmän soveltuvuus tuotannon näkökulmasta

Betonin 3D-tulostusmenetelmän arvioidaan soveltuvan parhaiten piha- ja puistokalusteiden valmistamiseen ja huonoiten kokonaisten kerrostalojen toteuttamiseen. Kuviossa 34 on kuvattu menetelmän soveltuvuutta eri rakennustöihin. Vastaajista 100 prosenttia arvioi menetelmän soveltuvan piha- ja puistokalusteiden valmistamiseen vähintään melko hyvin, kun taas kokonaisten kerrostalojen valmistamiseen 8,7 prosenttia. Meluuste-elementtien, siilo/ piippu -tyyppisten rakenteiden ja muottirakenteiden valamisen arvioidaan soveltuvan valmistettavaksi tulostusmenetelmällä. 81,8 prosenttia arvioi menetelmän soveltuvan vähintään melko hyvin meluuste-elementtien valmistamiseen ja 69,6 prosenttia muottirakenteiden valamiseen.



Kuvio 34. Betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuus

Avoimissa vastauksissa menetelmän potentiaalisiksi käyttökohteiksi nousee esille pienenä elementit, meluusteet, tukimuurit, siilot, piiput, pienet rakennukset ja tuoteosat. Menetelmässä nähdään potentiaalia monimuotoisten rakenteiden sekä haasteellisten julkisivupintojen toteutuksella. Menetelmän potentiaali nähdään sellaisten rakenteiden toteutuksessa, joiden valmistaminen nykytekniikoilla on kallista. Menetelmän kehittämisessä katsotaan luontevaksi edetä pienemmistä rakenteista isompiin ja

vaativampiin. Menetelmälle soveltuvana rakenteena pidetään esimerkiksi väliseinien valmistusta.

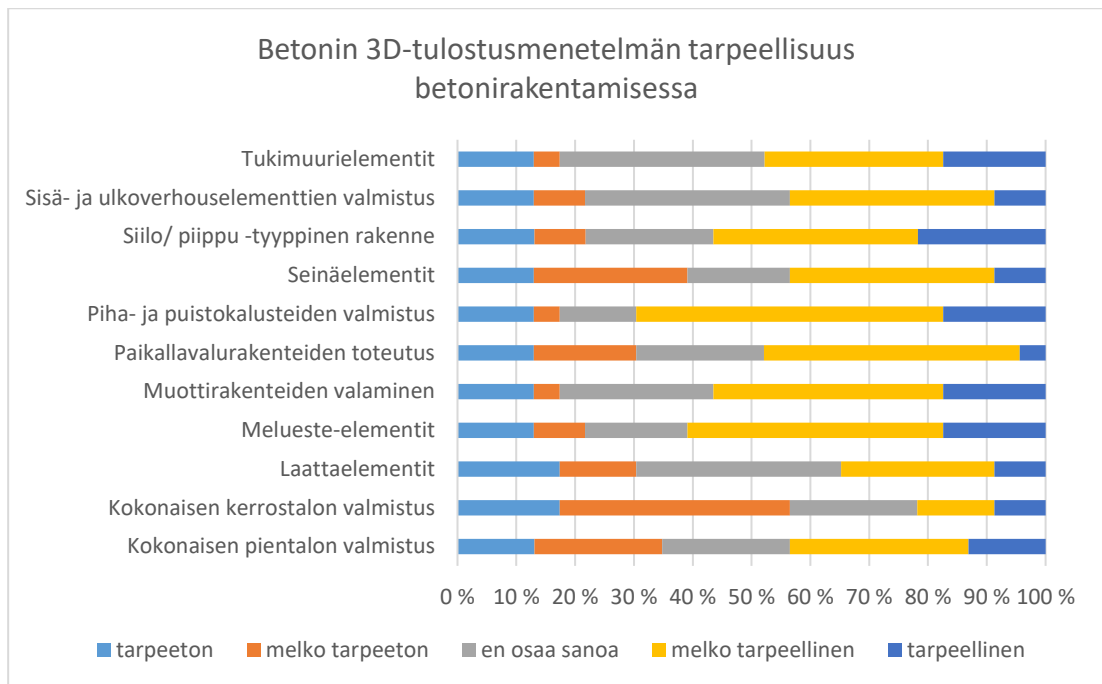
Menetelmää ei katsota järkeväksi tavaksi käyttää geometrialtaan yksinkertaisten rakenteiden valmistamiseen. Tulostusmenetelmää ei nähdä järkeväksi sellaisten rakenteiden toteuttamisessa, joiden muottityö ja valu on helppo toteuttaa nykyisillä menetelmillä. Menetelmän haasteena yksinkertaisten rakenteiden toteutuksessa pidetään kustannustehokkuutta, jossa menetelmän ei uskota olevan kilpailukykyinen olemassa olevien valmistusmenetelmien kanssa.

Tulostusmenetelmän ei katsota myöskään soveltuvan järeiden kantavien betonirakenteiden valmistamiseen. Ylipäättään raudoitettujen rakenteiden valmistamista tulostamalla pidetään suurena haasteena. Raudoitteiden korvaamista kuiduilla pidetään menetelmän käytettävyyden kannalta olennaisena tekijänä. Raudoitusten lisäksi valuihin täytyisi saada asennettua myös muita valmisosia sekä eristeitä, jonka ei katsota olevan vielä mahdollista.

Pursotusmenetelmällä toteutettujen betonirakenteiden pinnanlaatua pidetään haittana muun muassa sementtiliiman poistamisen kannalta sekä tasoitetyön määrän lisääntymisenä.

6.4.3 Betonin 3D-tulostusmenetelmän tarpeellisuus ja tulevaisuus

Menetelmän tarpeellisuus nähdään pääasiassa pienten rakenteiden valmistuksessa. Noin kolmasosa vastaajista pitää menetelmää vähintään melko tarpeellisena melle-lementtien ja piha- ja puistokalusteiden valmistuksessa. 56,5 prosenttia pitää menetelmää vähintään melko tarpeellisena muottirakenteiden sekä siilo/ piippu - tyyppisten rakenteiden valmistuksessa. Tarpeettomimmaksi menetelmä nähdään kokonaisten rakennusten valmistamisessa. Kaikista vastaajista 56,5 prosenttia arvioi menetelmän olevan melko tarpeeton tai tarpeeton kokonaisen kerrostalon valmistuksessa. Muutoin menetelmän tarpeellisuutta arvioitaessa tulokset ovat samansuuntaisia. Kuviossa 35 on kuvattu tulostusmenetelmän tarpeellisuutta erityyppisten betonirakenteiden valmistuksessa kaikkien vastanneiden näkökulmasta.

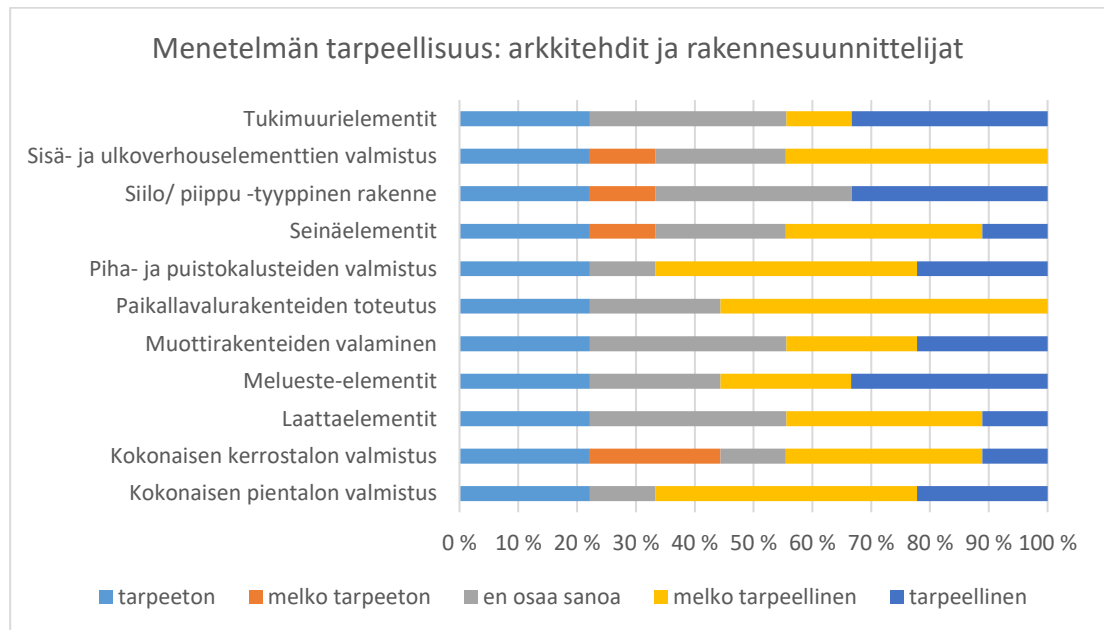


Kuvio 35. Betonin 3D-tulostusmenetelmän tarpeellisuus

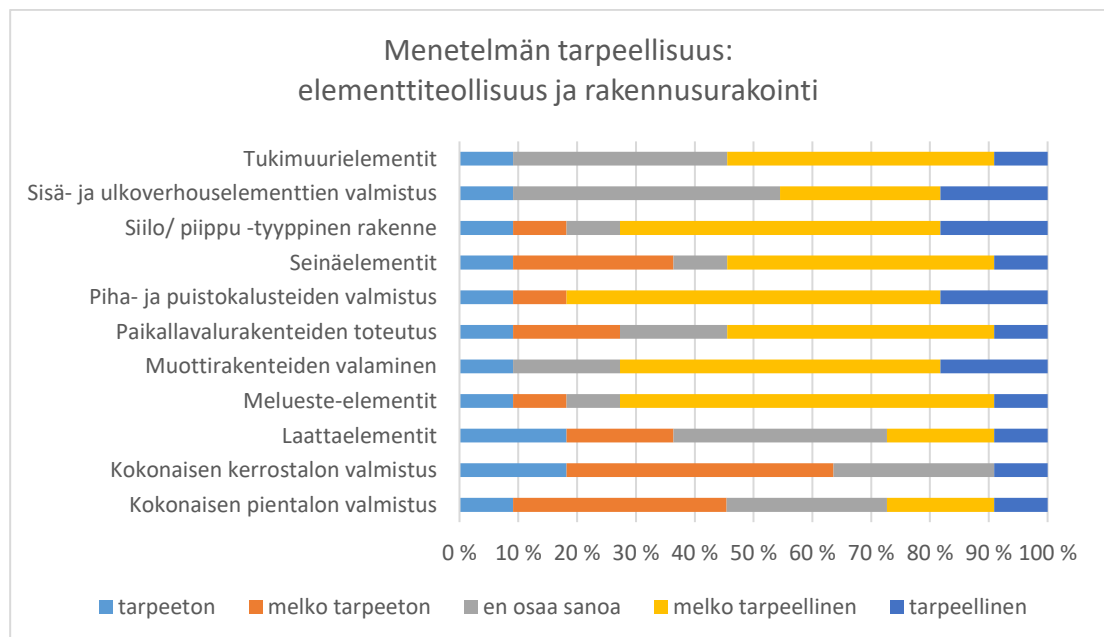
Tarkasteltaessa kuinka tarpeelliseksi eri toimialat arvioivat menetelmän erityyppisten betonirakenteiden valmistuksessa on havaittavissa pieniä eroja. Arkkitehtien ja rakennesuunnittelijoiden näkemykset menetelmän tarpeellisuudesta on kuvattu kuviossa 36 ja elementtiteollisuuden ja rakennusurakoinnin näkemykset kuviossa 37. Arkkitehdeistä ja rakennesuunnittelijoista 66,7 prosenttia arvioi menetelmän tarpeellisuuden kokonaisten pientalojen valmistamisen melko tarpeelliseksi tai tarpeelliseksi. Suunnittelijoista 44,5 prosenttia arvioi, että menetelmä on melko tarpeellinen tai tarpeellinen kokonaisten kerrostalojen valmistuksessa. Elementtiteollisuudessa ja rakennusurakoinnissa työskentelevistä 27,3 prosenttia arvioi menetelmän melko tarpeelliseksi tai tarpeelliseksi kokonaisten pientalon valmistamisessa. Elementtiteollisuudessa ja rakennusurakoinnissa työskentelevistä 9,1 prosenttia arvioi menetelmän melko tarpeelliseksi tai tarpeelliseksi kokonaisten kerrostalojen valmistamisessa.

Elementtiteollisuudessa ja rakennusurakoinnissa työskentelevät arvioivat menetelmän tarpeellisuutta eniten piha- ja puistokalusteiden valmistamiseen. Näistä 81,8 prosenttia arvioi menetelmän olevan melko tarpeellinen tai tarpeellinen tämän tyypp-

piseen rakentamiseen. Suunnittelijoilla vastaava luku on 66,7 prosenttia. Elementtiteollisuudessa ja rakennusurakoinnissa työskentelevistä 72,7 prosenttia arvioivat menetelmän olevan melko tarpeellinen tai tarpeellinen meluste-elementtien, muottirakenteiden sekä siilo/ piippu -tyyppisten rakenteiden valmistamiseen. Suunnittelijat arvioivat menetelmän tarpeellisuuden kyseisessä rakentamisessa selvästi pienemmäksi.

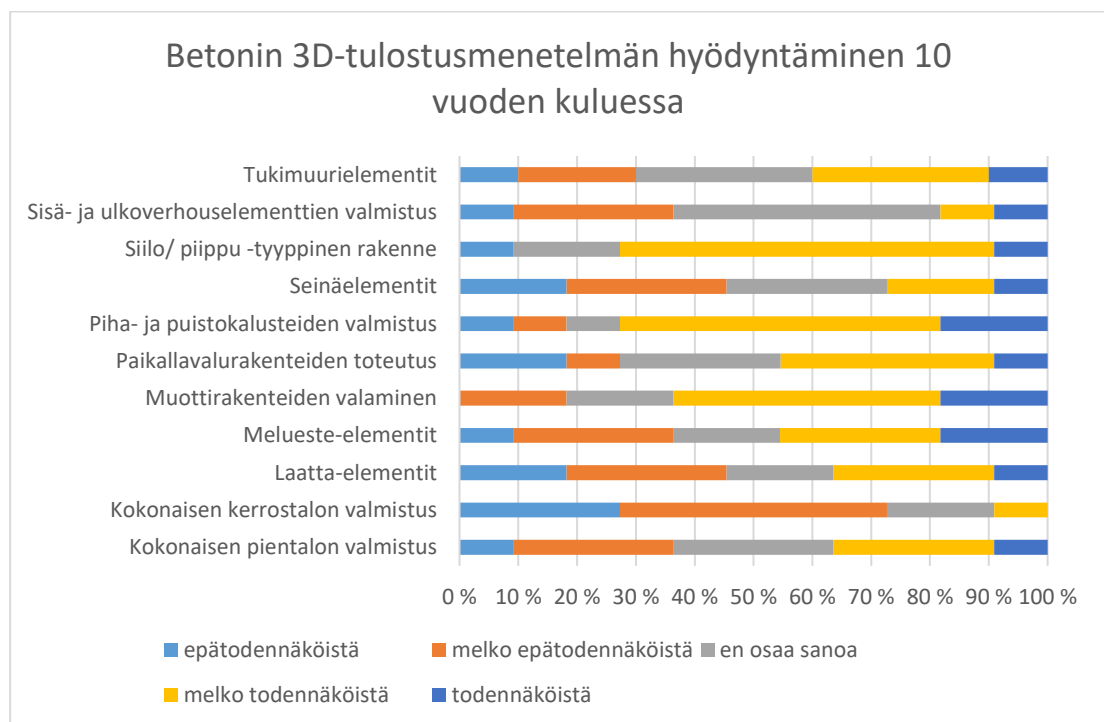


Kuvio 36. Menetelmän tarpeellisuus, arkkitehdit ja rakennesuunnittelijat



Kuvio 37. Menetelmän tarpeellisuus, elementtituotanto ja rakennusurakointi

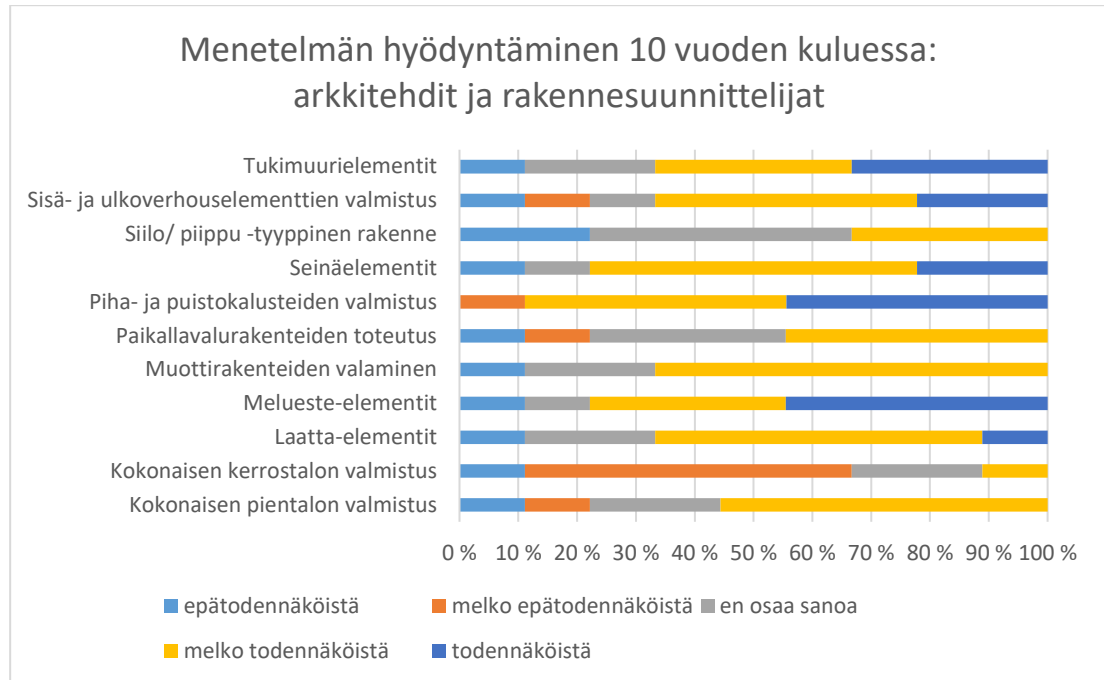
Menetelmän hyödyntämistä betonirakentamisessa seuraavan 10 vuoden kuluessa ei nähdä erityisen todennäköisenä. Todennäköisimmin menetelmän nähdään tulevaisuudessa hyödynnettävän piha- ja puistokalusteiden valmistamisessa. Myös siilo tai piipputyyppisten rakenteiden toteuttamisessa menetelmää pidetään mahdollisena seuraavan 10 vuoden kuluessa. Kuitenkin yleistettäessä noin kolmasosa vastaajista näkee 3D-tulostamisen melko epätodennäköisenä tai epätodennäköisenä betonirakentamisessa. Kaikista epätodennäköisimpänä nähdään kokonaisen kerrostalon rakentaminen. Kuviossa 38 on havainnoitu 3D-tulostusmenetelmän hyödyntämisen todennäköisyyttä.



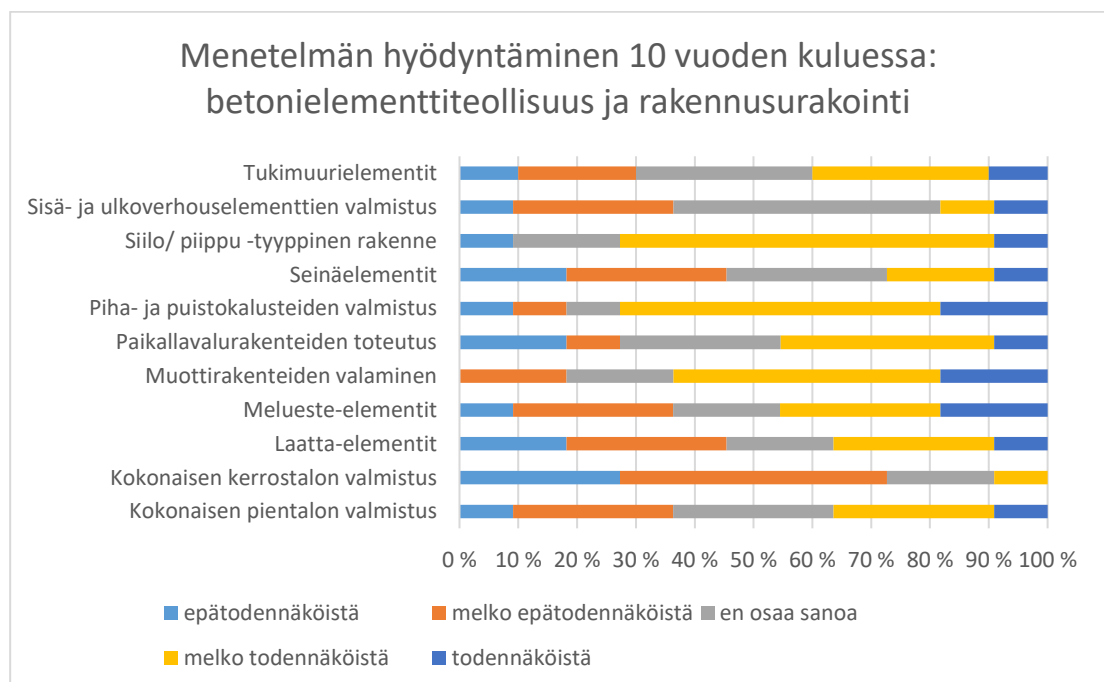
Kuvio 38. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa

Suunnittelijoista 77,8 prosenttia pitää melko todennäköisenä tai todennäköisenä sitä, että menetelmää hyödynnetään 10 vuoden kuluessa seinä- ja meluste-elementtien valmistuksessa. Betonituotannon edustajien näkökulmasta vastaavat prosentit ovat 45,5 ja 27,3. Betonielementti- ja rakennustuotannon parissa työskentelevistä 72,7 prosenttia näkee menetelmän olevan käytössä melko todennäköisesti tai todennäköisesti piha- ja puutarhakalusteiden ja siilotyyppisten rakenteiden valmistuksessa.

Toimialakohtaisia eroja menetelmän käytöstä tulevaisuudessa on havainnointu kuvioissa 39 ja 40.



Kuvio 39. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa (ARK ja RAK)



Kuvio 40. Menetelmän hyödyntäminen 10 vuoden kuluessa (elementti ja RU)

Menetelmän yleistymistä edesauttavina tekijöinä pidetään teknologian kehittämistä ja yhteistyötä eri osapuolten välillä. Muutaman vastaajan mielestä yhteistyöhön tulisi ottaa mukaan myös viranomaistahot. Raskaiden raudoitettujen betonirakenteiden toteuttamista pidetään mahdottomana, mutta kuitujen salliminen harjaterästen sijaan nähdään olevan suuri kynnyks menettelyn yleistymisen kannalta. 3D suunnittelun katsotaan edesauttavan menetelmän yleistymistä, mutta toisaalta suunnittelunohjaus puuttuu.

Betonin 3D-tulostusmenetelmän yleistymistä rajoittavina tekijöinä pidetään tiedonpuutetta, konservatiivisen alan muutosvastarintaa sekä kalliina pidettävää teknologiaa. Menetelmän yleistymisen esteenä pidetään myös tulostettujen betonirakenteiden pinnanlaatua. Pursotusmenetelmän pinnanlaatu nähdään haasteena muun muassa sementtiliiman poistolle sekä lisäävän tasoitetyötä. Tulostettaviin betonirakenteisiin pidetään tällä hetkellä mahdottomana asentaa harjateräksiä, muita valmisosia ja esimerkiksi lämmöneristeitä.

Yleinen ajatus on kuitenkin, että 3D-tulostamisella katsotaan tarjoavan uusia mahdollisuuksia tulevaisuuden betonirakentamisessa. Menetelmää pidetään kehityskaarensa alkumetreillä, mutta tutkimus- ja kehitystyötä kannatetaan ja menetelmän nähdään olevan osa tulevaisuuden betonirakentamista. Betonin 3D-tulostamisen mahdollisuuksien ja kustannuksien tuomista yleiseen tietoisuuteen katsotaan poistavan muun muassa muutosvastarintaa uutta valmistusmenetelmää kohtaan.

7 Johtopäätökset

Betonin 3D-tulostamisen tutkimus- ja kehitystyö on lisääntynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana. Betonirakenteiden 3D-tulostaminen ei ole enää pelkkä suunnitelma paperilla, vaan erityyppisiä betonirakenteita, ja jopa kokonaisia rakennuksiakin, on jo valmistettu tulostamalla. Yleinen tietoisuus menetelmästä on laaja ja vaikka menetelmä on kehityskaarensa alkupäässä, on sen mahdolliset hyödyt tunnistettu. Taloudellisia hyötyjä, joita 3D-tulostamalla voidaan saavuttaa, on vaikeasti mitattavissa menetelmän vähäisen käytön takia. On ilmeistä, että tällä hetkellä tulostusteknologia

vie enemmän aikaa ja rahaa tavanomaisiin menetelmiin verrattuna, mutta toisaalta se kuuluu osana uuden menetelmän kehitystyötä. 3D-tulostamista pidetään realistisena tapana rakentaa betonista, vaikka menetelmä herättääkin paljon kysymyksiä.

Se, kenen osapuolen pitäisi olla aktiivinen menetelmän kehittämiseksi, ei ole yksiselitteinen. Jotta menetelmä voitaisiin ottaa laajamittaiseen käyttöön, tulee sen eteen kaikkien betonirakentamisen osapuolien tehdä yhteistyötä. Tulostusrobottien tulee kyetä toteuttamaan normit ja säädökset täyttäviä rakenteita, joten menetelmän kehittäminen ei voi olla vain yhden osapuolen asia. Massiivisten kantavien betonirakenteiden valmistus edellyttää harjateräksiä ja harjaterästen korvaamista kuiduilla pidetään kantavien ja raskaiden betonirakenteiden valmistamisessa olennaisena seikkana. Kuitubetonin käyttö kantavissa rakenteissa voi vaatia suunnitteluperusteiden muuttamista ja mahdollisesti kuitubetonista valmistettujen rakenteiden lisätutkimista.

Vaatimukset täyttävien betonirakenteiden valmistamiseksi tulostamalla tarvitaan laajasti yhteistyötä. Yhteistyötä tarvitaan suunnittelijoiden sekä laitekehittäjien välillä siksi, että tekniikka ei tule suunnittelun esteeksi, vaan tuo suunnittelulle vaihtoehtoisia toimintatapoja. Tekniikan täytyy kyetä toteuttamaan vaatimukset täyttäviä rakenteita ja toisaalta suunnittelijoiden tulee tuntea tekniikan rajallisuudet. 3D-tulostamisen mahdollistamat monimutkaiset muodot rakenteissa eivät välttämättä ole itseisarvo, mutta 3D-tulostaminen voi avata uudenlaista arkkitehtuuria rakenteiden toiminnallisuuden ja esteettisyyden yhdistämiselle. Tuotantoympäristö tuo myös omat haasteensa. Elementtitehtaalla saadaan tulostettua hallituissa olosuhteissa ja tarvittaessa lisättyä robotiikkaa lisäämään elementteihin harjateräksiä, muita tuoteosia ja eristettä. Mutta kilpaileeko tulostusmenetelmä tavanomaisen hyvänä pidetyn menetelmän kanssa, vai voiko tulostusteknologia tuoda elementtitehtaille mahdollisuuksia lisätä tehokkuutta tai tavanomaisista poikkeavia betonielementtejä. Työmaaolosuhteissa tulostimien täytyy toimia ongelmitta vallitsevissa olosuhteissa ja muiden rakenteiden tulee kestää tulostimien paino. Jos rakennetaan tulostamalla, on tulostusjärjestys myös pohdittava jo suunnittelupöydällä. Usein tiililetka mahtuu kapeasta ovesta paremmin, kuin tela-alustan päälle asennettu robottikäsi.

Betonirakenteiden valmistaminen 3D-tulostamalla käsittää kaksi pääasiallista tapaa; pursotus- sekä sideainesuihkutusmenetelmät. Menetelmästä riippuen voidaan valmistaa joko pieniä monimuotoisia arkkitehtonisia rakenneosia tai massiivisia betonirakenteita. Teknologian kehittyessä 3D-tulostamista voidaan soveltaa myös tavanomaisiin valmistustapoihin, jotka voivat mahdollistaa uudenlaisen tavan valmistaa betonirakenteita. Näitä menetelmiä ovat 3D-ruiskuvalu sekä dynaaminen liukuvalu tekniikka. Kaikissa näissä menetelmissä yhteistä on teknologian kehitys. Kehitystä tarvitaan niin robotiikan, automatiikan sekä betonimassankin osalta. Tulostusmenetelmät kun eivät ole tavanomaista muottiin valamista, täytyy menetelmien rajallisuudet huomioida tekniikan sekä suunnittelun näkökulmasta ja kehittää siten, että menetelmä palvelee betonirakentamista.

Kansainväliset tutkimukset osoittavat, että betonirakenteita voidaan valmistaa tulostamalla ilman perinteistä muottitekniikkaa. Tulostusjäljessä on haasteita kuitenkin pursotusmenetelmän osalta, joka jättää kerroksittaisen rakenteen. Kerroksittain valedun rakenteen pinta jää karkeaksi ja esimerkiksi sementtiliiman poiston arvioidaan tutkimuksen mukaan olevan haasteellista. Karkea pintarakenne lisää myös tasoitus-työntarvetta ja näin ollen lisää tulostettujen rakenteiden jälkityötä. Tavanomaisessa kantavien rakenteiden betonoinnissa käytetään tyypillisesti karkeaa runkoaineen maksimiraekokoa ja tulostettaessa suositetaan hienompaa maksimiraekokoa. Pieni maksimiraekoko mahdollistaa tasaisemman pinnan, mutta tyypillisesti betonirakentamisessa suositetaan karkeaa. Jotta betonirakenteita voidaan valmistaa tulostamalla laajassa mittakaavassa, tulee tulostuspinnanlaatuun kiinnittää huomiota. Betonimassan kehitys onkin robotiikan ja automatiikan lisäksi olennainen kehitystyön kohde. Jotta 3D-tulostus soveltuisi järeiden rakenteiden valmistamiseen, tulisi tutkimus- ja kehitystyö skaalata pienien rakenteiden valmistamisesta suureen mittaluokkaan sekä tutkia kuitumassan mahdollisuuksia harjaterästen korvaajana.

Myös toimintaympäristö tuo haasteita menetelmän käyttöönottamiselle. Uusi menetelmä herättää epäilyksiä ja ennakkoluuloja toimivuudestaan ja teknologiaa pidetään kalliina ja kömpelönä. Vaikka menetelmä tunnetaankin yleisellä tasolla, ei sen potentiaalista ole kuitenkaan riittävästi tietoa saatavilla. Epätietoisuus menetelmästä, sen

mahdollisuuksista sekä kustannuksista pidetään osaltaan esteenä menetelmän kehittämiselle ja yleistymiselle. Tutkimustulosten julkaiseminen ja menetelmän potentiaalinen tuominen yleiseen tietoisuuteen edesauttaa betonin 3D-tulostamisen yleistymistä.

Menetelmän käyttöönottamista helpottavana asiana pidetään 3D-mallintamisen kehitystä ja hyödyntämistä jo tämän päivän rakentamisessa. Kun rakennuksista tuotetaan nykyään paljon tietomalleja, nähdään että tulostusmallien tekeminen on tämän takia helpompaa. Tulostusmalli täytyy kuitenkin tehdä aina erikseen ja jos tietomalli tähän käy melko lailla suoraan, niin ainakin yksi haaste on pois yhtälöstä.

Betonin 3D-tulostamisen kehitys on vielä varhaisessa vaiheessa, joten konkreettisia saavutuksia menetelmän käytöstä on vaikea listata. Työn tuottavuus, työturvallisuus ja materiaalisäästöt pystyy varmuudella toteamaan vasta, kun menetelmä on laajemmin käytössä. Se on jo sinänsä saavutus, että menetelmää kohtaan on mielenkiintoa, eikä sen kehittämistä nähdä turhana. Käytännössä menetelmällä on potentiaalia tuoda uusia mahdollisuuksia betonirakentamiseen, mutta mukaan tarvitaan rohkeita tekijöitä menetelmän kehittämiseksi.

Tulostustekniikan nähdään soveltuvan parhaiten pienenä elementtien, siilomaisten rakenteiden, tukimuurien ja tämän kaltaisten rakenteiden valmistamiseen. Tulostuksen pinnanlaatu ei tällä hetkellä rohkaise tekemään näkyviä rakenteita ainakaan julkis- tai asuntokohteisiin. Mielestäni pursotusmenetelmällä voisi olla mahdollista toteuttaa betonirakenteita teolliseen ympäristöön. Teollisessa ympäristössä ulkonäkövaatimuksista voidaan tinkiä helpommin ja toisaalta menetelmä voi osoittaa kykynsä massiivisten rakenteiden valmistuksessa. Järeissä ja raudoitetuissa rakenteissa kuitubetonin käyttäminen voisi avata menetelmälle lisää käyttömahdollisuuksia. Raudoitteiden ja muiden valmisosien asentaminen tulostettaviin betonirakenteisiin on haasteellista, joka edellyttää teknologian kehittämistä tai uusien ratkaisujen löytämistä.

Jotta ennakkoluulot tuotantoympäristöstä saadaan pois, pitää menetelmällä pystyä tekemään todellisia suuren mittaluokan betonirakenteita. Menetelmän yleiseen tietoon tuominen ja onnistuneet hankkeet vahvistavat menetelmän positiivista kuvaa.

Menetelmän tutkimiseksi olisi syytä kasata ryhmä, jossa on suunnittelualueiden, teknologian, massan sekä betonituotannon osaajia. Jokaisella on hieman eri näkemys menetelmän heikkouksista ja mahdollisuuksista. Jos jollain osa-alueella on haasteita menetelmän käytettävyyden suhteen, poistaa se helposti tulostamisen mahdollisuuden betonirakentamisesta kokonaan.

Tulostusrobotiikkaa ja tulostettavaa betonimassaa voidaan tutkia ja kehittää verrattain pienellä kalustolla, mutta kaluston koko ja runkoaineeltaan hienojakoinen betonimassa ei kuitenkaan mielestäni vastaa todellisen betonirakentamisen mittaluokkaa. Tutkimustyö tulee skaalata todelliseen betonirakentamisen mittaluokkaan menetelmän käytön edistämiseksi. Tämä iso mittaluokka voisi olla esimerkiksi teollisessa ympäristössä olevien rakenteiden toteuttamista ja jopa pientalon tulostamista.

Betonirakenteiden tulostamisessa tulee tehdä yhteistyötä suunnittelijoiden, laitekehittäjien sekä betonimassan kehittäjien kanssa. Laitteiden täytyy pystyä tulostamaan laatuvaatimukset täyttäviä rakenteita isossa mittakaavassa. Rakennesuunnittelijat ymmärtävät betonirakenteiden suunnitteluperusteet, joten heidän pitäisi olla mukana kehitystyössä. Näin myös mahdolliset esteet suunnitteluohjeistuksissa tulisi huomioitua ja vietyä mahdollisia muutoksia eteenpäin, jotta suuria betonirakenteita olisi mahdollista toteuttaa tulostamalla.

Betonirakenteiden 3D-tulostamista voidaan tutkia ja soveltaa käytännössä kaikkeen betonirakentamiseen, mutta mielestäni olennaista olisi viedä menetelmän kehitys lähemmäksi ison mittakaavan betonirakentamista. Menetelmän tutkimiseksi 3D-tulostaminen tulisi viedä todelliseen ympäristöön, jossa menetelmän eri osa-alueiden kehittäjillä olisi omat vastualueensa mutta kaikilla yhteinen tavoite. Pilottihanke tulisi toteuttaa todelliseen kohteeseen, jossa tavanomaiset paikallavalurakenteet korvataan tulostettavilla rakenteilla. Tällainen kohde voisi olla esimerkiksi jokin isompi teollisuuden kohde ja toteutettavat rakenneosat sellaisia, joiden osalta voidaan testata esimerkiksi kuitubetonin käyttämistä ilman riskiä suurille rakenteellisille vaurioille. Alla on esimerkki mahdollisesta yhteistyöhankeesta, johon osalliseksi voi tulla käytännössä kaikki suunnittelu-, teknologian kehitys-, betoniurakointi- ja viranomais- tahot yhdessä tilaajan kanssa.

Betonin 3D-tulostamisen kehityskohde

- Teollisuus tai infraympäristöön toteutettava betonirakenne, jolla ei ole erityisiä ulkokenäkövaatimuksia. Esimerkiksi tukimuuri, meluste, suojarakenne, varoaltan seinä tms. Toteutus paikallavaluna sekä tehdasolosuhteissa.
- Erilaisten tuoteosien, kuten kiinnityslevyjen, peruspulttien, läpivientikappaleiden ym. lisääminen valun aikana joko manuaalisesti tai robotiikalla.
- Tulostettavassa betonirakenteessa tutkitaan tulostusrobotiikkaa ja automatiikkaa todellisissa tuotanto-olosuhteissa.
- Kuidun käyttö harjaterästen korvaajana.
- Hankkeeseen mukaan mahdollisimman laajasti betonirakentamisen toimijoita suunnittelijoista toteutukseen.
- Hankkeen toteutuksesta ja lopputuloksesta tiedottaminen ja kokemusten jakaminen yleiseen tietoon.

8 Pohdinta

8.1 Opinnäytetyön tavoitteista

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta ja potentiaalia betonirakentamisessa, kartoittaa menetelmän käyttöönottamisen mahdollisia haasteita sekä tuottaa tietoa betonin 3D-tulostamisesta toimeksiantajahankkeelle jatkotutkimuksia varten. Aiheen rajaus ja kohderyhmä tutkimuksella oli laaja, mutta toisaalta toimeksiantajan tavoitteiden mukainen.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käytiin läpi betonin pursotus- ja sideainesuihkutusmenetelmän periaatteita sekä joitain näillä menetelmillä toteutuneita tulostusratkaisuja. Betonin 3D-tulostamista tutkittaessa ilmeni myös kaksi tulostamiseen verrattavissa olevaa menetelmää, joiden periaate on myös esitetty tietoperustassa. Teoriaosalla ei ollut tarkoituksena olla kaiken kattava kirjallisuuskatsaus betonin 3D-tulostamisesta, vaan olla kompakti selvitys betonin 3D-tulostusmenetelmistä, mahdollisuuksista sekä tulevaisuuden näkymistä. Teoriaosa toimi myös tietoperustana opinnäytetyössä tehdyille kyselytutkimukselle kysymystenasettelun osalla.

Kyselytutkimuksen avulla selvitettiin 3D-tulostamisen mahdollisuuksia suomalaisessa betonirakentamisessa. Tutkimus ei selvittänyt tarkkarajaisesti mitään tiettyä yksityiskohtaa menetelmän soveltuvuudesta, käytettävyydestä tai ominaisuuksista vaan

tutki aihetta laaja-alaisesti. Tutkimuksella kartoitettiin menetelmän tuntemusta, selvitettiin menetelmän potentiaalia ja tarpeellisuutta betonirakentamisessa sekä arvioitiin toimintaympäristön suhtautumista ja mahdollisia rajoitteita menetelmän laajamittaisessa käyttöönotossa.

8.2 Tutkimuksen tulokset

Betonin 3D-tulostaminen ei välttämättä ole enää lähtökuopissaan, mutta on silti vahvasti kehityskaarensa alkupäässä. Betonirakenteiden tulostamista pursotus- ja sideainesuihkutusmenetelmällä tutkitaan maailmalla laajasti yksityisten toimijoiden sekä eri instituutioiden toimesta. Pursotusmenetelmä on eniten käytetty tulostusmenetelmä betonin tulostamisessa ja sillä onkin mahdollista toteuttaa raskaita betonirakenteita. Pursotusmenetelmällä voidaan toteuttaa elementti- ja paikallavalurakenteita pienistä rakenneosista kokonaiisiin rakennuksiin. Sideainesuihkutusmenetelmä soveltuu arkkitehtonisten penelementtien toteuttamiseen kuten verhouselementtien valmistukseen tai erityyppisten paviljonkien ja taidarakenteiden valmistamiseen.

Tutkimus osoitti, että rakennusalalta löytyy kiinnostusta uutta valmistusmenetelmää ja teknologiaa kohtaan. Betonirakenteiden 3D-tulostaminen on yleisellä tasolla tunnettu, vaikka sitä ei vielä käytännön rakentamisessa ja -suunnittelussa hyödynnetäkään. 3D-tulostamisella uskotaan pääsääntöisesti olevan potentiaalia betonirakentamisessa, mutta myös sen rajallisuudet ja teknologian keskeneräisyys tunnistetaan. Vaikka alalla on ennakkoluuloja uutta menetelmää kohtaan, on ne mahdollista poistaa onnistuneiden yhteistyöhankkeiden avulla.

8.3 Tutkimuksen onnistumiset ja epäonnistumiset

Kyselytutkimuksen vastausprosentti jäi odotettua pienemmäksi, vaikka varsinaista tarkkaa tavoitetta tutkimuksen vastausprosentille ei ollut määritetty. Pienen vastausmäärän takia vahvoja yleistyksiä kyselytutkimuksen vastauksista ei ollut mahdollista tehdä. Annetut vastaukset olivat kuitenkin keskenään samansuuntaisia, joten varoista tulkintaa ja yleistystä tulosten perusteella pystyi kuitenkin tekemään.

Kyselytutkimuksen otos oli suhteellisen suuri, mutta jälkikäteen ajateltuna se olisi voinut suurempikin vastausprosenttiin perustuen. Kyselytutkimus toteutettiin yrityksille, jotka ovat toimialallaan Suomen suurimpia tai joiden erikoisosaaminen liittyy vahvasti betonirakentamiseen. Suurimpien yritysten oletettiin omaavan tietoa betonin 3D-tulostamisesta ja olevan asiassa aktiivisia, mutta toisin kävi. Kyselytutkimus valikoitui tutkimusmenetelmäksi myös sen takia, että oletettiin henkilöiden vastaavan kyselyyn paremmin mitä haastattelussa. Menetelmä on uusi ja arvioitiin, että kaikki eivät halua mahdollisista omista innovaatioistaan avoimesti kertoa, mutta kyselyyn vastaaminen anonyymisti olisi voinut sen mahdollistaa. Ilmeisesti menetelmää ei kuitenkaan kehitetä yleisesti tai sitä ei vain haluttu tuoda esille vastauksissa. Tai sitten tahot, jotka kehittävät menetelmää haluavat pitää tietonsa itsellään. Sähköpostin kautta tehty kyselytutkimus saattaa jäädä myös muun työsähköpostin jalkoihin, joten tämä saattoi myös osaltaan vaikuttaa vastausprosenttiin.

Kyselytutkimuksella saavutettiin kuitenkin pääasiassa sille asetetut odotusarvot. Kyselytutkimuksen onnistumisena voidaan pitää aktiivisuutta avoimiin kysymyksiin vastaamisessa. Avoimet kysymykset antoivat mahdollisuuden vastata analyttisemmin esitettyihin kysymyksiin ja nämä korvasivat näin ollen osittain haastattelutilanteen. Tutkimuksen tekeminen haastattelemalla olisi voinut kuitenkin antaa laajempaa analyttisempää tietoa menetelmästä. Haastateltaviksi olisi voinut ottaa esimerkiksi kaksi henkilöä kohderyhmään kuuluvaa osapuolta kohden. Tutkimus kuitenkin päätettiin tehdä kyselytutkimuksena, koska sillä oletettiin saavan laajemmin vastauksia. Haastattelu vaatii myös enemmän aikaa toteutuksen ja analysoinnin osalta, joten katsottiin, että tämän työn osalta sitä ei ollut mahdollista toteuttaa.

8.4 Työn luotettavuus ja eettinen arviointi

Kyselytutkimuksen vastausprosentin jäädessä pieneksi, ei kyselytutkimuksen tuloksista voida tehdä yleistyksiä koskien koko Suomen rakennusteollisuutta. Vastauksista on haettu päälinjoja, joiden pohjalta yleistyksiä on voitu harkiten tehdä. Kyselytutkimuksen vastaukset olivat kaikki asiallisia eikä niissä ollut suuria poikkeamia, joten siltä osin tutkimuksen voidaan katsoa olleen riittävän tarkka ja laaja tulosten varovai-

selle yleistämislle. Kyselytutkimuksen otos lähtökohtaisesti vastaa hyvin rakennusteollisuutta kokonaisuudessaan ja annettuja vastauksia voidaan pitää relevantteina opinnäytetyön kannalta. Tutkimuksen tulokset ovat samansuuntaisia opinnäytetyössä käytettyjen kirjallisuuslähteiden kanssa, joten vastausten luotettavuus ja yleistettävyys on tässä uskottavaa. Tämän opinnäytetyön tulokset vanhenevat melko nopeasti, eivätkä ole järkevästi sovellettavissa enää muutaman vuoden kuluttua. Opinnäytetyön tarkoitus on ennen kaikkea tuoda lisäarvoa toimeksiantajalle betonin 3D-tulostamisen tutkimus- ja kehitystyölle.

Kirjallisuuslähteet ovat valikoituneet helposti saatavista ja ilmaisista lähteistä. Lähdeaineiston valinnassa katsottiin olennaiseksi, että lähteet olisivat mahdollisimman uusia ja luotettavia. Lähdeaineistona on käytetty myös laitevalmistajien ja teknologian kehittäjien internetsivuja. Näissä olen pyrkinyt suodattamaan mahdollisen mainosarvon ja keskittymään lähteissä betonin 3D-tulostamisen realismiin. Työn kannalta on ollut olennaisempaa selvittää menetelmän potentiaalia tavanomaisessa betonirakentamisessa, eikä niinkään villejä tulevaisuuden näkymiä pilvenpiirtäjien rakentamisesta tai siirtokuntien infran rakentamista planeetoille.

Tutkimus eettisyyden osalta painotettiin anonymiteettiä. Vaikka oli tiedossa, kenelle kyselytutkimuksen sähköpostiviestit lähetettiin, ei vastaajien tiedot ole silti yhdistettävissä vastauksiin. Kyselyssä ei kysytty henkilötietoja tai yrityksen nimeä. Porkkana kyselytutkimukseen osallistumisesta oli päästä tutustumaan JAMK:ille hankittavaan betonin 3D-tulostimeen. Tämän tiimoilta vastaajilla oli mahdollisuus jättää yhteystiedot yhteydenottoa varten. Nämä yhteystiedot kysyttiin toimeksiantajan omana kyselynä varsinaisen kyselyn vastaamisen jälkeen. Näitä yhteystietoja ei voi yhdistää kyselyn vastauksiin, koska ainoastaan toimeksiantajalla on pääsy näihin tietoihin. Yhteystietojen jättäminen ei myöskään ollut pakollista, vaan kyselyyn vastannut henkilö voi olla myös omatoimisesti yhteydessä hankkeeseen. Hankkeen yhteystiedot oli kerrottu kyselylomakkeessa. Jätettyjen yhteystietojen osalta opinnäytetyötä varten on ilmoitettu ainoastaan jätettyjen yhteystietojen lukumäärä betonin 3D-tulostamisen kiinnostavuuden arvioimiseksi.

Kun vastaajia ei voi yhdistää vastauksiin, lähetettiin kyselyn muistutusviesti kaikkiin osoitteisiin, joihin kysely oli myös alun perin lähetetty. Jotkut kyselyyn vastanneista ilmoitti osallistuneen kyselyyn, mutta anonyymien vastaustenkeruun takia ei ketään voi yhdistää vastauksiin tästäkään huolimatta. Kyselyn tiimoilta tuli yhteydenotto mahdollisuudesta vastata vielä varsinaisen kyselyajan jälkeen, joten periaatteessa on mahdollista arvioida vastaajien yritykset, mutta sitä tietoa ei kysytty eikä nämä ilmene kyselyn tuloksissa.

Tutkimuksen tuloksia analysoitaessa avoimien kysymysten osalta ei julkaistu sanatarkkoja tuloksia, vaan vastaukset on esitetty yhteenvetona muuttamatta vastausten sisältöä. Monivalintakysymykset on analysoitu prosentteina sekä kuvaajien avulla, eikä niissä ole näin ollen tulkinnanvaraa. Tulokset on esitetty sellaisena kuin ne olivat. Tutkimusaineistoa sekä mahdollisia sähköpostiviestejä käsiteltiin luottamuksellisesti eikä näihin aineistoihin ole pääsyä kenelläkään muulla, kuin opinnäytetyön tekijällä.

8.5 Jatkotutkimus

Opinnäytetyötä tehdessä ilmeni, että betonin 3D-tulostamiseen liittyviä artikkeleita, opinnäytetöitä, seminaariesityksiä ja muita julkaisuita on tarjolla paljon. Opinnäytetyöhön on otettu tästä aineistosta tietoperustaksi vain pieni osa. Betonin 3D-tulostaminen vaikuttaa edenneen teknologiana viime vuosien aikana huimasti ja tutkimusaineisto saattaaakin joiltain osin vanhentua myös melko nopeasti. Menetelmän potentiaaliin uskotaan pääsääntöisesti ja 3D-tulostamisen uskotaan olevan yksi betonirakentamisen menetelmä tulevaisuudessa. Menetelmän hyödyntäminen edellyttää jatkuvaa kehittämistä massan ja teknologian osalta, joten näkisin, että hankkeen tiimoilta tulisi jatkaa betonirakenteiden tulostamiseen liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä.

Toimeksiantaja tutkii hankkeessa betonin 3D-tulostamista tämän tutkimuksen lisäksi myös betonimassan ja robotiikan osalta. Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää näihin tutkimuskohteisiin. Käytännössä robotiikan soveltuvuutta eri tuotantoympäristöihin sekä kuitubetonin soveltuvuutta järeisiin betonirakenteisiin.

Menetelmästä ilmeni myös kaksi 3D-tulostamiseen rinnastettavaa menetelmää, 3D-ruiskubetonointi sekä dynaaminen liukuvalu. Myös nämä menetelmät voisi olla tutkimisen arvoisia betonointimenetelmiä. 3D-ruiskubetonointia voisi varmastikin soveltaa erilaisiin kalliorakentamisen kohteisiin.

Tämä työ osoittaa, että rakennusteollisuudessa on aiheesta kiinnostuneita tahoja, jotka olisivat kiinnostuneita menetelmän tutkimiseen ja soveltamiseen käytännössä. Menetelmästä olisikin paikallaan tehdä haastattelemalla menetelmästä kiinnostuneita tahoja tarkemmin ja yrittää löytää yhteistyömahdollisuuksia menetelmän edelleen kehittämiseksi.

Tutkimustukoksissa oli melko paljon ”en osaa sanoa” -vastauksia. Tämä johtuu varmastikin siitä, mitä tutkimuksessakin on avoimiin kysymyksiin vastattu, eli menetelmästä ja sen konkreettisista mahdollisuuksista ei ole julkaistu tietoa riittävästi. Kiinnostusta menetelmää kohtaan on, mutta silti menetelmän mahdollisuuksista halutaan enemmän tietoa. Hanke voisikin julkaista tutkimuksistaan tiedotteen, jossa menetelmän mahdollisuuksia sekä hankkeen tuloksia tuodaan esille.

Lähteet

3D Printing. 2021. Verkkosivut. Artikkel. Viitattu: 3.5.2021. <https://3dprinting.com/news/contour-crafting-expected-to-be-used-to-build-homes-by-2018/>

Apis Cor. 2021. Verkkosivut. Viitattu: 1.4.2021. <https://www.apis-cor.com/>

BFT international. 2020. Additive manufacturing in concrete construction – current trends and challenges. Artikkel. Viitattu 28.2.2021. https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Additive_manufacturing_in_concrete_construction_current_trends_and_3504754.html.

Betoni. 2021. Betoni rakennusmateriaalina. Betoniteollisuus ry. Viitattu 15.2.2021. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>.

Bos, F., Wolfs, R., Zeeshan, A. & Theo, S. 2016. Additive manufacturing of concrete on construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Artikkel. Viitattu 18.2.2021. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1209867>

Contour Crafting. 2021a. Verkkosivut. Viitattu: 2.4.2021. <https://www.contourcrafting.com/>

Contour Crafting. 2021b. Verkkosivut. Viitattu: 2.4.2021. <https://www.contourcrafting.com/building-construction>

Contour Crafting. 2021c. Verkkosivut. Viitattu: 2.4.2021. <https://www.contourcrafting.com/infrastructure>

Emerging Objects. 2021. Verkkosivut. Viitattu 6.3.2021. <http://emergingobjects.com/>.

Euroopan aluekehitysrachaston (EAKR) rahoittaman hankkeen kuvaus. Viitattu 7.2.2021. <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektkoodi=A76631>.

Gardiner, J. 2011. Exploring the emerging Design territory of construction 3D printing – Project led architectural research. Doctor thesis. School of architecture and design RMIT university.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu. 2021. JAMKin hallinto: hallitus ja johtoryhmä. Viitattu 7.2.2021. <https://www.jamk.fi/fi/Tietoa-JAMKista/JAMKin-hallinto/>.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu. 2021. Tutustu JAMKiin: strategia ja vahvuusalat. Viitattu 7.2.2021. <https://www.jamk.fi/fi/Tietoa-JAMKista/Tutustu-JAMKiin/>.

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas – Näin kirjoitan opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kakkonen-Yhtiöt Oy. 2021. Fimatec Oy lanseeraa maailman suurimman 3D-tulostimen. Viitattu 10.2.2021. <https://k2.fi/fimatec-oy-lanseeraa-maailman-suurimman-3d-tulostimen/>.

Kemia-lehti. 2020. Geopolymeerista syntyy meluete. Viitattu 10.2.2021. <https://www.kemia-lehti.fi/geopolymeerista-syntyy-meluete/>.

Krause, M., Bulgakov, A. 2018. Strategic Optimization of 3D-Concrete-Printing Using the Method of CONPrint3D. Conference: 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Viitattu 22.2021. https://www.researchgate.net/publication/328372264_Strategic_Optimization_of_3D-Concrete-Printing_Using_the_Method_of_CONPrint3DR

Nadarajah, N. 2018. Development of concrete 3D printing. Master's thesis. Aalto university. Viitattu 4.2.2021. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/34224/master_Nadarajah_Nithesh_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J. 2017. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies. 34th international symposium on automation and robotics in construction. Viitattu 30.1.2021. <https://www.iaarc.org/publications/fulltext/ISARC2017-Paper035.pdf>.

Perrot, A., Amaziane, S. 2019. 3D printing on concrete: General considerations and technologies. Viitattu: 21.2.2021. https://www.researchgate.net/publication/332282851_3D_Printing_in_Concrete_General_Considerations_and_Technologies/link/5cd17600299bf14d957d12a8/download

SFS-EN ISO/ ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 24.2.2017. Viitattu: 15.2.2021. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

Valente M, Sibai A, Sambucci M. 2019. Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: Revolutionizing and remodeling the construction industry. Review. Journal of composites science.

Vehkalahti, K. 2008. Kyselytutkimuksen mittarit ja menetelmät. Tammi.

Wolfs, R. 2015. 3D printing of concrete structures. Master's thesis. Eindhoven University of Technology. Viitattu 7.2.2021. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/3d-printing-of-concrete-structures>.

Liitteet

Liite 1. Sähköpostikyselyn saatekirje

Hei,

Vastaa kyselyyn betonin 3D-tulostamisesta ja pääset tutustumaan betonin 3D-tulostukseen!

Jyväskylän ammattikorkeakoulu tutkii SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen - hankkeessa betonin ja geopolymerin 3D-tulostamista, tulostuksen robotiikkaa sekä tulostusmenetelmän potentiaalia betonirakenteiden valmistusmenetelmänä. SOMA-hanke on Euroopan aluekehitysrahaston rahoittama. Hankkeen toteutusaika on 1.1.2021 – 31.8.2023.

Opiskelen Jyväskylän ammattikorkeakoulussa rakennustekniikan ylempää AMK-tutkintoa. Teen opinnäytetyötä betonin 3D-tulostamisesta, jossa tutkin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta ja hyödyntämismahdollisuuksia betonirakentamisessa. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja työ tehdään osana JAMKin SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen -hanketta.

Opinnäytetyöhön kuuluu kyselytutkimus, johon kutsun teidät osallistumaan. Osallistuminen tarkoittaa Webropol-kyselytutkimuslomakkeeseen vastaamista. Linkki kyselyyn on viestin lopussa. Kyselyyn vastaaminen on vapaaehtoista ja luottamuksellista. Vastaukset käsitellään nimettöminä, eikä kenenkään vastaajan tiedot paljastu tuloksissa. Linkki kyselyyn on avoin, joten voitte vapaasti jakaa tätä viestiä organisaatiossanne eteenpäin. Kyselyn kohderyhmään kuuluvat arkkitehdit, betonielementti- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt, betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa toimivat henkilöt sekä rakennesuunnittelijat.

Jos haluatte osallistua kyselyyn, toivon teidän vastaavan siihen 11.4.2021 mennessä. Kyselyyn vastaaminen vie noin 15 min.

Kyselyyn osallistuneilla on mahdollisuus käydä tutustumassa JAMKille hankittavaan betonin 3D-tulostimeen. Opinnäytetyö tullaan julkaisemaan internetissä osoitteessa www.theseus.fi.

Linkki kyselyyn: <https://link.webpolsurveys.com/S/4722452DB8F02949>

Liite 2. LinkedIn -kyselyn saatekirje

Soveltuuko 3D-tulostaminen betonirakentamiseen?

Vastaa kyselyyn, niin pääset tutustumaan betonin 3D-tulostukseen!

Kyselyn kohderyhmänä ovat arkkitehdit, betonielementti- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt, betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa toimivat henkilöt sekä rakennesuunnittelijat.

Kysely tehdään osana rakennustekniikan yamk-opinnäytetyötä, jonka toimeksiantajana on #JAMK in "SOMA - rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen" -hanke.

Linkki kyselyyn:

<https://lnkd.in/eipUQ9j>

Kysely on avoinna 11.4.2021 saakka.

Liite 3. Kyselytutkimuksen muistutusviesti

Hei,

Oletko jo ennättänyt vastaamaan kyselyyn betonin 3D-tulostamisesta?

Vastaa kyselyyn, niin pääset tutustumaan betonin 3D-tulostukseen!

Linkki kyselyyn: <https://link.webpolsurveys.com/S/4722452DB8F02949>

Kyselyn linkki on vapaasti jaettavissa organisaatiossanne.

Kysely tehdään osana rakennustekniikan yamk-opinnäytetyötä, jonka toimeksiantajana on JAMKin ”SOMA - rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen” -hanke. Kyselyn kohderyhmänä ovat arkkitehdit, betonielementti- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt, betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa toimivat henkilöt sekä rakennesuunnittelijat.

Kysely on avoinna 11.4.2021 saakka.

Kiitän ajastanne kyselyyn vastaamisesta!

Liite 4. Kyselylomake, saateosa



BETONIN 3D-TULOSTUS

Menetelmän soveltuvuus betonirakentamisessa

TUTKIMUKSEN TAVOITE JA KOHDERYHMÄ

Kyselytutkimuksen tavoitteena on selvittää betonin 3D-tulostamisen soveltuvuutta ja hyödyntämismahdollisuuksia betonirakentamisessa. Kohderymänä tutkimuksella ovat arkkitehdit, betonielementti- ja rakennustuotannossa työskentelevät henkilöt, betonimassan tutkimus- ja kehitystyön parissa toimivat henkilöt sekä rakennesuunnittelijat. Tämä kysely liittyy Euroopan aluekehitysrahaston rahoittaman "SOMA -rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen" -hankkeen teettämään opinnäytetyöhön.

KYSELYYN VASTAAMINEN

Kysely on avoinna 11.4.2021 saakka. Vastaaminen vie aikaa noin 15 min.

MAHDOLLISUUS TUTUSTUA BETONIN 3D-TULOSTIMEEN

Kyselytutkimukseen osallistuneilla on mahdollisuus käydä tutustumassa JAMKille hankittavaan betonin 3D-tulostimeen. Tutustumismahdollisuus järjestetään kevään 2022 aikana.

Kyselyyn vastaamisen jälkeen teidät ohjataan automaattisesti lomakkeelle, johon voitte halutessanne jättää yhteystietonne. Lomake aukeaa muutaman sekunnin viiveellä tähän kyselyyn vastaamisesta. Yhteystietolomakkeelle jätetyt tiedot eivät ole yhdistettävissä tähän kyselyyn ja yhteystiedot ovat vain hankkeen käytettävissä. Voitte olla yhteydessä myös suoraan hankkeen projektipäällikköön tutustumiskäyntiin liittyen.

Kiitän ajastanne kyselyyn osallistumisesta!

Lisätietoa kyselystä saat tarvittaessa opinnäytetyön tekijältä ja hankkeesta hankkeen projektipäälliköltä.

Opinnäytetyön tekijä

Toni Reinikka, m1232@student.jamk.fi

Hankkeen projektipäällikkö

Leena Turunen, JAMK, 040-6312 199, leena.turunen@jamk.fi

Opinnäytetyön ohjaaja

lehtori Jukka Konttinen, JAMK, jukka.konttinen@jamk.fi

Liite 5. Kyselylomake, infosivu

Mistä betonin 3D-tulostamisessa on kyse?

Betonin 3D-tulostaminen on menetelmä, jolla tuotetaan fyysisiä kolmiulotteisia kappaleita kolmiulotteisen mallitiedon avulla. Tulostamalla valmistettavia betonirakenteita varten ei tarvitse tehdä erillistä muottirakennetta kuten tavanomaisessa betonirakentamisessa. Tulostaminen perustuu valettavan massan ominaisuuksien sekä teknologian yhdistämiseen. Betonin 3D-tulostamista tutkitaan ja kehitetään ympäri maailmaa tutkimuslaitosten sekä yksityisten kehittäjien toimesta. Betonia 3D-tulostamalla on jo toteutettu erityyppisiä rakennuksia, siltoja sekä elementtirakenteita. Betonin tulostamiseen käytetään pääasiassa pursotus- ja sideainesuihkutusmenetelmää.

Pursotusmenetelmä on yleisin betonin tulostusmenetelmä. Pursotusmenetelmässä betonirakenne tulostetaan pursottamalla betonia suuttimen kautta kerroksittain. Periaatteena on, että alempi kerros kantaa seuraavan kerroksen, mutta tulostuskerrokset sulautuvat yhtenäiseksi rakenteeksi ennen lopullista kovettumistaan. Pursotusmenetelmässä aukkojen ja ulokkeiden tulostus vaatii erillisen tuennan. Menetelmällä voidaan tulostaa elementtejä, yksittäisiä rakennneosia esimerkiksi seiniä tai kokonaisia rakennuksia.

Sideainesuihkutusmenetelmä soveltuu monimuotoisten rakennneosien tulostamiseen. Menetelmässä rakenne tulostetaan levittämällä vuoron perään jauhetta ja sideainetta. Sideaine sitoo jauhepartikkelit yhteen muodostaen tulostettavan rakenteen. Ylimääräinen jauhe toimii tulostuksen aikana tukimateriaalina, joka mahdollistaa geometrisen vapauden tulostettavalle rakenteelle. Jauhe poistetaan tulostuksen jälkeen lopullisesta tuotteesta. Menetelmä soveltuu käytettäväksi esimerkiksi erityyppisten arkkitehtonisten rakennneosien valmistamiseen, mutta kokonaisten rakennusten tulostamiseen se ei sovellu.

Liite 6. Kyselylomake, kysymykset 1 - 2

1. Millä alalla työskentelette?

- Arkkitehtisuunnittelu
- Betonin kehitys-/ tutkimustyö
- Elementtituotanto
- Rakennesuunnittelu
- Rakennusurakointi
- Muu; mikä?

2. Missä tehtävässä työskentelette?

- Arkkitehtisuunnittelu
- Betonimylläri
- Betonilaborantti
- Tutkimus-/ kehitystyö
- Rakennesuunnittelu
- Työnjohtotehtävät
- Työpäällikkö/ Aluepäällikkö/ Projektipäällikkö/ Toimialapäällikkö
- Muu, mikä?

Liite 7. Kyselylomake, kysymykset 3 - 5

3. Millä toimialalla työskentelette?

Voitte valita useamman vaihtoehdon.

- Asuntorakentaminen
- Elementtiteollisuus
- Infrarakentaminen
- Silta- ja väylärakentaminen
- Teollisuusrakentaminen
- Toimitilarakentaminen
- Vesilaitosrakentaminen
- Muu, mikä?

4. Mikä on yrityksenne pääasiallinen toiminta-alue?

Voitte valita useamman vaihtoehdon.

- Pohjois-Suomi
- Itä-Suomi
- Etelä-Suomi
- Länsi-Suomi
- Keski-Suomi
- Muu, mikä?

5. Onko betonin 3D-tulostusmenetelmä teille entuudestaan tuttu?

- En ole aiemmin kuullut tästä
- Olen joskus kuullut tästä
- Tunnen menetelmän vähintään yleisellä tasolla

Liite 8. Kyselylomake, kysymykset 6 - 9

6. Työskentelettekö betonin 3D-tulostusmenetelmän parissa?

- En työskentele menetelmän parissa
- Kehitän työssäni menetelmään liittyvää teknologiaa tai toimintaa
- Työnantajayritykseni kehittää menetelmään liittyvää teknologiaa tai toimintaa

7. Minkälaista teknologiaa tai toimintaa kehität/ käytät työssäsi?

8. Minkälaista teknologiaa tai toimintaa työnantajayrityksesi kehittää/ käyttää?

9. Seuraatteko betonin 3D-tulostusmenetelmän kehitystä?

	en lainkaan	jonkin verran	paljon
Suomessa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Maailmalla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Liite 9. Kyselylomake, kysymykset 10 - 12

10. Arvioi, missä määrin seuraavien osapuolien aktiivisuudella on vaikutusta betonin 3D-tulostusmenetelmän käyttöönottamiseen rakennustoiminnassa.

	ei lainkaan	melko vähän	en osaa sanoa	melko paljon	paljon
Automatiikan kehittäjät	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Arkkitehdit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Betonireseptiikan kehittäjät	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rakennesuunnittelijat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rakennuttajat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rakennusurakoitsijat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Robotiikan kehittäjät	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tilaaajat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11. Onko yrityksellänne kiinnostusta betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämiseen?

	ei lainkaan	melko vähän	en osaa sanoa	melko paljon	paljon
Oman toiminnan tehostamiseksi	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Yhteistyössä muiden kanssa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokeilemalla menetelmää pilottihankkeessa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12. Tarvitaanko mielestäsi betonin 3D-tulostusmenetelmän kehittämiseksi yhteistyötä eri toimijoiden välillä?

- Tarvitaan
- Ei tarvita
- En osaa sanoa

Liite 10. Kyselylomake, kysymykset 13 - 15

13. Minkä tahojen mielestäsi täytyisi tehdä yhteistyötä?

14. Miksi mielestäsi ei tarvita yhteistyötä?

15. Arvioi, kuinka hyvin betonin 3D-tulostusmenetelmällä voidaan saavuttaa seuraavia asioita rakentamisessa

	ei lainkaan	melko huonosti	en osaa sanoa	melko hyvin	hyvin
Parantaa työturvallisuutta betonoinnissa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parantaa työergonomiaa betonoinnissa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vähentää materiaalihukkaa betonoinnissa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vähentää materiaalihukkaa muottityössä	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lisätä betonirakentamisen tuottavuutta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lisätä arkkitehtisuunnittelun mahdollisuuksia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lisätä rakennesuunnittelun mahdollisuuksia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lisätä elementtituotannon mahdollisuuksia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lisätä betonin käyttömahdollisuuksia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Liite 11. Kyselylomake, kysymykset 16 - 17

16. Arvioi betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta eri toimialoilla

	ei lainkaan	melko huonosti	en osaa sanoa	melko hyvin	hyvin
Arkkitehtisuunnittelu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Asuntorakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elementtirakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Infrarakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Julkisrakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rakennesuunnittelu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Silta- ja väylärakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Teollisuusrakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Toimitilarakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vesilaitosrakentaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

17. Arvioi betonin 3D-tulostusmenetelmän soveltuvuutta eri rakennustöissä

	ei lainkaan	melko huonosti	en osaa sanoa	melko hyvin	hyvin
Kokonaisen pientalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokonaisen kerrostalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laattaelementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Melueste-elementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Muottirakenteiden valaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Paikallavalurakenteiden toteutus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Piha- ja puistokalusteiden valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seinäelementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Siilo/ piippu -tyyppinen rakenne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sisä- ja ulkoverhouselementtien valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tukimuurielementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Liite 12. Kyselylomake, kysymykset 18

18. Arvioi betonin 3D-tulostusmenetelmän tarpeellisuutta betonirakentamisessa

	tarpeeton	melko tarpeeton	en osaa sanoa	melko tarpeellinen	tarpeellinen
Kokonaisen pientalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokonaisen kerrostalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laattaelementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Meluste-elementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Muottirakenteiden valaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Paikallavalurakenteiden toteutus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Piha- ja puistokalusteiden valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seinäelementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Siilo/ piippu -tyyppinen rakenne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sisä- ja ulkoverhouselementtien valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tukimuurielementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Liite 13. Kyselylomake, kysymykset 19 - 20

19. Kuinka todennäköisenä näette, että betonin 3D-tulostusmenetelmää hyödynnetään Suomessa seuraavan 10 vuoden kuluessa?

	epätodennäköistä	melko epätodennäköistä	en osaa sanoa	melko todennäköistä	todennäköistä
Kokonaisen pientalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokonaisen kerrostalon valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Laatta-elementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Meluste-elementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Muottirakenteiden valaminen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Paikallavalurakenteiden toteutus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Piha- ja puistokalusteiden valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Seinäelementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Siilo/ piippu -tyyppinen rakenne	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sisä- ja ulkoverhouselementtien valmistus	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tukimurielementit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Halutessasi voit kertoa näkemyksiäsi menetelmän soveltuvuudesta ja käytettävyydestä

20. Minkä betonirakenteiden toteuttamisessa/ suunnittelussa 3D-tulostusmenetelmällä voi mielestäsi olla potentiaalia ja miksi?

Liite 14. Kyselylomake, kysymykset 21 - 23

21. Minkä betonirakenteiden toteuttamisessa/ suunnittelussa 3D-tulostusmenetelmän käyttämisellä ei mielestäsi ole potentiaalia ja miksi?

22. Mitkä seikat mielestäsi edesauttavat betonin 3D-tulostusmenetelmän yleistymisessä betonirakentamisessa?

23. Mitkä seikat mielestäsi rajoittavat betonin 3D-tulostusmenetelmän yleistymistä betonirakentamisessa ja miksi?

Liite 15. Kyselylomake, kysymykset 24

24. Vapaa sana betonin 3D-tulostusmenetelmästä

Yhteystietolomake tutustumiskäyntiä varten aukeaa muutaman sekunnin kuluessa kyselyn lähettämisestä.