



# 3D-tulostettavan geopolymeerin reseptin kehitys

Kalle Jaakkola

Opinnäytetyö, AMK

Marraskuu 2023

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka (AMK)

**Jaakkola, Kalle**

## **3D-tulostettavan geopolymeerin reseptin kehitys**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Marraskuu 2023, 36 sivua.

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Tavoitteena oli löytää sementille korvaava vaihtoehto sideaineeksi 3D-tulostettavaan betoninkaltaiseen geopolymeeriin ja hyödyntää tässä muun muassa soodasakkaa. Sementti aiheuttaa merkittävän määrän maailman hiilidioksidipäästöistä, noin 8 %. Soodasakka on hankalasti kierrätettävä materiaali, jota päätyy kaatopaikalle merkittäviä määriä. Tämän hyödyntäminen 3D-tulostettavassa materiaalissa vähentäisi kaatopaikalle päätyvän jätteen määrää ja lisäisi kiertotaloutta. Soodasakan hyödyntäminen esimerkiksi hienoaineksen korvikkeena säästäisi myös neitseellisiä raaka-aineita. 3D-tulostaminen etuihin kuuluu erilaisten muotojen toteuttaminen helpommin kuin tavanomaisin muotein.

Työ toteutettiin prosessorientoituneena tutkimuksellisenä kehittämistoimintana, jossa erilaisia ainesosia yhdisteltiin eri suhteilla resepteissä ja näiden vaikutusta tutkittiin. Erilaisten reseptien tulostettavuutta ja puristuslujuutta testattiin ja reseptiä muutettiin tarvittaessa näiden tulosten perusteella.

Työssä syntyi erilaisia tuloksia, täysin epäonnistuneita, erittäin korkean puristuslujuuden omaavia ja tulosominaisuuksiltaan hyviä. Lopputuloksena syntyi 3D-tulostettava sementitön geopolymeeri, jossa on käytetty soodasakkaa.

Lopputuloksesta on pääteltävissä, että sementti on mahdollista korvata muilla aineilla 3D-tulostettavassa betonissa. Tämä on kuitenkin haasteellista ja lisäkokeita vaaditaan, jotta saadaan varmasti määräykset ja vaatimukset täyttävä tuote, jota voidaan hyödyntää käytännön kohteissa.

### **Avainsanat (asiasanat)**

3D-tulostus, betoni, geopolymeeri, soodasakka, masuunikuona, alkaliaktivointi

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Jaakkola, Kalle**

### **Development of a 3D printable geopolymers recipe**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, November 2023, 36 pages.

Degree Programme in Construction and Civil Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The goal was to find an alternative to cement as a binder for a 3D-printable concrete-like geopolymer and to use, among other things, green liquor dregs in this material. Cement causes a significant amount of the world's carbon dioxide emissions, about 8 %. Green liquor dregs is a material that is difficult to recycle, which ends up in a landfill in significant quantities. Utilizing this in 3D-printable material would reduce the amount of waste ending up in the landfill and increase the circular economy. Utilizing green liquor dregs, for example, as a substitute for fine ingredients would also save virgin raw materials. The advantages of 3D printing include the realization of different shapes more easily than with conventional molds.

The work was carried out as a process-oriented research and development work, where different ingredients were combined in varying proportions in the recipes and their effect was studied. The printability and compressive strength of various recipes were tested and the recipe was changed if necessary based on these results.

Different recipes led to varying results, completely unsuccessful, with very high compressive strength and good in terms of 3D-printing characteristics. The end result was a 3D-printable cement-free geopolymer that uses green liquor dregs.

It can be concluded from the final result that it is possible to replace cement with other substances in 3D-printable concrete. However, this is challenging and additional tests are required in order to obtain a product that definitely meets the regulations and requirements and can be used in practical applications.

### **Keywords/tags (subjects)**

3D printing, concrete, geopolymer, green liquor dregs, blast furnace slag, alkali activation

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Tietoa 3D-tulostuksesta ja käytetyistä aineista.....</b>	<b>4</b>
2.1	Tiedonhaku.....	4
2.2	Betoni .....	4
2.3	3D-tulostaminen.....	5
2.4	Geopolymeeri.....	6
2.5	Sideaineet ja niiden aktivaattori .....	7
2.5.1	Alkaliaktivaattori.....	7
2.5.2	Aktivaattorin suhteet.....	8
2.6	Soodasakka.....	8
2.6.1	Soodasakan kuvaus.....	8
2.6.2	Soodasakan käyttö alkalilähteenä .....	9
<b>3</b>	<b>Menetelmäkuvaus .....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Toteutus .....</b>	<b>12</b>
4.1	Toteutuksen kuvaus .....	12
4.2	Käytännön kokeet .....	14
4.3	Robottivusteiset 3D-tulosteet.....	27
<b>5</b>	<b>Pohdintaa .....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset.....</b>	<b>33</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>34</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>36</b>
	Liite 1. Koekappaleiden puristusikä, tiheys ja puristustulos.....	36

## Kuviot

Kuvio 1.	Käsipursotin ja sillä pursotettu koetulostus.....	12
Kuvio 2.	Vasemmalla kappaleen 51 koetuloste ja oikealla kappaleen 54 koetuloste .....	13
Kuvio 3.	Koekappaleiden puristamiseen käytetty puristin .....	14
Kuvio 4.	Seulontaan käytetty seulontalaite .....	15
Kuvio 5.	Koesarjan 33–34 resepti ja puristustulokset.....	16
Kuvio 6.	Koesarjan 35–36 resepti ja puristuslujuudet .....	16
Kuvio 7.	Koesarjan 37–38 resepti ja puristuslujuudet .....	17
Kuvio 8.	Resepti 39–40 resepti ja puristuslujuudet .....	17
Kuvio 9.	Resepti 41–42 resepti ja puristuslujuudet .....	18

Kuvio 10. Resepti 43–44 resepti ja puristuslujuudet .....	19
Kuvio 11. Resepti 45–46 resepti ja puristuslujuudet .....	19
Kuvio 12. Koesarja 47–48 resepti ja puristuslujuudet .....	20
Kuvio 13. Koesarja 49–50 resepti ja puristuslujuudet .....	21
Kuvio 14. Koesarja 51–52 resepti ja puristuslujuudet .....	22
Kuvio 15. Koekappaleen 53 lopullinen resepti ja puristustulos 1 vuorkauden iässä.....	22
Kuvio 16. Koesarjan 54–55 resepti ja puristustulokset.....	23
Kuvio 17. Koekappaleen 51 (vasemmalla) koepursotus verrattuna kappaleen 54 koepursotukseen (oikealla).....	23
Kuvio 18. Koesarjan 56–57 resepti ja puristustulokset.....	24
Kuvio 19. Koesarjan 60–61 resepti ja puristuslujuudet .....	25
Kuvio 20. Koesarja 62–63 resepti ja puristuslujuudet .....	26
Kuvio 21. Koesarjan 64–65 resepti ja puristuslujuudet .....	27
Kuvio 22. Tulostuslaitteisto, pumppu, sauvatärytin ja robotti .....	28
Kuvio 23. Robotti, tulostuskärki ja tulostettuja kappaleita .....	29
Kuvio 24. Ensimmäinen robottivälineinen 3D-tulostus sementittömällä reseptillä 64 .....	30
Kuvio 25. Sementittömällä reseptillä 64 tulostettu m-kirjain .....	31

# 1 Johdanto

Maailmanlaajuisesti käytetyin rakennusmateriaali on betoni, jota valmistetaan noin 13 miljardia kuutiometriä vuosittain (Betoni rakennusmateriaalina n.d.). Betonin valmistus aiheuttaa 8 % kaista maailman hiilidioksidipäästöistä (Skinner & Lalit 2023). Betonin 3D-tulostamisella saadaan luotua erilaisia muotoja, mitkä ovat vaikeita tai kalliita toteuttaa perinteisillä muoteilla. Muodon optimoinnilla saadaan aikaiseksi säästöä käytetyn betonin määrässä ja näin ollen myös hiilijalanjälki pienenee (Törmänen 2022). Käyttämällä 3D-tulostuksessa sementitöntä betoninkaltaista materiaalia, geopolymeeria, saadaan hiilijalanjälkeä edelleen pienennettyä.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään 3D-tulostettavan geopolymeerin reseptin kehittämiseen, missä hyödynnetään muiden teollisuuden alan sivuvirtoja. Työssä keskeisin osa on masuunikuonan ja soodasakan hyödyntäminen sementin ja hienon kiviaineksen tilalla, jolla säästetään neitseellisiä raaka-aineita ja maksimoidaan kiertotaloutta. Lisäksi työssä käsitellään masuunikuonan aktivaattorin ainesosien suhteiden kehittämistä sellaiseksi, jolla saadaan massa kovettumaan nopeasti, kuitenkin riittävän pitkän työstöajan omaavana. Tavoitteena on tehdä vaihtoehtoinen toimiva resepti betonin 3D-tulostukseen, jolla on pienempi hiilijalanjälki kuin sementtiä sisältävällä seoksella, mutta omaa samanlaiset ominaisuudet, 3D-tulostuksen kannalta, kuin perinteinen sementillinen betoni.

Työ on rajattu käsittelemään edellä mainittujen ainesosien suhteiden hakemista ja optimointia, siten että saadaan aikaiseksi hyvin tulostuva ja nopeasti kovettuva massa, mikä omaa riittävän suuren puristuslujuuden. Työssä kuvataan kehitysprosessi alusta loppuun: mistä on aloitettu, mitä muutettu ja miksi. Työ ei syvenny ainesosien sisältämien yhdisteiden reaktioihin tai tavoittelujuiden tarkkaan ennustamiseen ainesosien perusteella, sillä tämä vaatisi huomattavasti enemmän resursseja, sekä useamman alan asiantuntijoiden yhteistyötä. Työ tehdään Jamkin hallinnoimalle SOMA – rakennusmateriaalin 3D-tulostaminen hankkeelle, joka on Euroopan aluekehitysrahaston rahoittama hanke.

## 2 Tietoa 3D-tulostuksesta ja käytetyistä aineista

### 2.1 Tiedonhaku

Pohjatieto eri lähteistä on haettu käyttämällä hakupalvelua Google ja ScienceDirect.com -sivustolta erilaisilla hakusanoilla. Hakusanoina on ollut geopolymeeri, betonin 3D-tulostaminen, 3D-tulostettava geopolymeeri, soodasakka, alkaliaktivaattori, betonin ilmastovaikutus ja näiden englanninkieliset vastineet. Tietoa on pyritty ottamaan lähtökohtaisesti tutkimuksista, mutta myös erilaisia lehtijulkaisuita ja nettisivuja on hyödynnetty tiedonhaussa. Tieteellisistä julkaisuista on valittu aiheeseen sopivimmat ja pyritty valitsemaan ne, jotka on julkaissut tiedekustantaja Elsevier, koska nämä ovat vertaisarvioituja. Lehtiartikkeleista otettu tieto koskee lähinnä uutisointia käytännössä toteutetuista esimerkeistä betonin 3D-tulostamisesta. Lähteiden valinnassa on kiinnitetty huomiota myös tiedon tuoreuteen ja pyritty valitsemaan mahdollisimman uusia julkaisuja.

### 2.2 Betoni

Betoni koostuu sementistä, runkoaineesta, vedestä ja mahdollisesti käytettävistä lisäaineista, joilla saadaan muokattua betonin tiettyjä ominaisuuksia. Näistä aineista sementti aiheuttaa suurimmat hiilidioksidipäästöt. Tämä johtuu sementin valmistustavasta, jossa kalkkikivestä hiilidioksidi poistetaan korkeassa lämpötilassa polttamalla esimerkiksi kivihiihtä.

Sementillä on tärkeä osa betonin valmistusta, sillä tämä toimii betonissa sideaineena. Sideaineen tarkoituksena on sitoa runkoaine, eli hiekka ja kiviaineet toisiinsa lujalla sidoksella, jotta betoni kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Vesi reagoi sementin kanssa sitoutuen sementtiin kemiallisesti ja fysikaalisesti. Tätä reaktiota kutsutaan hydrataatioksi ja puhekielen vastine sanalle on kovettumisreaktio. Reaktiossa syntyvä sementtigeeli sitoo kiviaineksen ja sementin toisiinsa kiinni, muodostaen betonista kiinteän kokonaisuuden. (Hydrataatio n.d.)

Osa hiilidioksidipäästöistä syntyy myös kalkkikiven läpikäymistä kemiallisista reaktioista. Vaikka tässä prosessissa syntyvää hukkalämpöä on vähennetty ja polttoprosessin tehokkuutta on paranneltu, betonin alati lisääntynyt käyttö on lisännyt hiilidioksidipäästöjä kompensoinnista huolimatta. Vuodesta 1990 vuoteen 2020 mennessä betonista johtuvat hiilidioksidipäästöt ovat kolminkertaistuneet. (Watari ym. 2023.)

Päästöjakauma Watarin ja muiden 2023 mukaan sementin tuotannossa sementin karbonaattikal-sinoinnin osuus on noin 51 %, polttoaineiden polton osuus noin 29 %, sähkönkulutuksen osuus noin 7 %. Rakennuspaikalla tapahtuvien toimenpiteiden osuus on noin 6 % ja kuljetuksesta johtu-vat päästöt ovat noin 4 %. Runkoaineen tuotannon osuus on noin 2 % ja loppuosuudesta vastaavat sekoitus ja itse betonin tekoprosessi ja muut toimenpiteet. Tästä koko betonin valmistuksesta, alusta loppuun, johtuvista hiilidioksidipäästöistä 86 % osuudesta vastaa sementin valmistukseen liittyvät toimenpiteet. (Watari ym. 2023.)

Hiilidioksidipäästöjen lisäksi raaka-aineiden kaivaminen ja prosessoinnista aiheutuvat ympäristöra-situkset. Esimerkiksi hiekalla on tärkeä osuus betonin valmistuksessa ja tämä on kaikista käytetyin kiinteä materiaali, jota käytetään 50 miljardia tonnia vuodessa. Hiekan kaivaminen ja poistaminen laajalla mittakaavalla yhdeltä paikalta ja etenkin kriittisiltä alueilta kuten jokien ja rannikoiden alu-eita edesauttaa eroosiota, mikä vaikuttaa ekosysteemiin ympäristön muutoksen kautta ja aiheut-taa jopa uhkaa asuinalueiden säilyvyydelle. Edellä mainittujen asioiden vuoksi on eduksi, jos hie-kan tilalle saadaan muita toimivia materiaaleja käytettäväksi betoniin hiekan tilalle, tai korvaamaan osa neitseellisestä hiekasta muulla materiaalilla. (UNEP 2022.)

## 2.3 3D-tulostaminen

Betonin 3D-tulostamista on kehitetty laajassa mittakaavassa viimeiset 10 vuotta ja useat tahot osallistuvat kehitystyöhön ympäri maailmaa. 3D-tulostamisella tarkoitetaan tietokoneella tehdyn mallin perusteella luotavaa objektia ainetta lisäävällä valmistustavalla. Tietokone ohjaa robottia liikkumaan tietokoneella luodun mallin mukaisesti ja materiaalia lisätään kerroksittain toistensa päälle. Pursotettavan materiaalin määrää ja nopeutta pystytään säätämään halutun laiseksi, riip-puen millaista muotoa kullakin hetkellä ollaan valmistamassa. Tällä menetelmällä päästään eroon muoteista, millä säästetään työaikaa ja nopeutetaan rakennusprosessia. Vaikeutena 3D-tulostuk-sessa on erityistä huolellisuutta vaativa valmistelu jokaisessa vaiheessa ja tällä hetkellä menetel-män epätasainen suorituskyky, verrattuna tavanomaiseen rakentamiseen. (Buswell ym. 2018.)

Betoni materiaalina aiheuttaa omat haasteensa 3D-tulostamisessa. Betonin tulisi olla riittävän not-keaa, jotta sitä pystytään pumppaamaan letkun läpi, mutta tämän tulisi kuitenkin pysyä yhtenäi-senä suuttimesta poistumisen jälkeen ja pystyä kantamaan päälle tulevat kerrokset ilman kasaan painumista ja ilman ei haluttua muodonmuutosta. Tämä aiheuttaa betonin kanssa haasteita, sillä



usein notkealla betonilla niin painuma, kuin leviämä on suuri. Eri kerrosten tulisi tarttua toisiinsa mahdollisimman hyvin ja valmiin rakenteen oltava mahdollisimman yhtenäinen, jotta valmis rakenne kestää sille tulevat rasitukset. Myös betonin nopea kovettuminen on eduksi 3D-tulostamisessa, sillä se mahdollistaa nopean kerrosten kasvattamisen ilman sortumisen vaaraa. Kovettuminen ei kuitenkaan saa olla liian nopeaa, jotta betoni pystytään pumppaamaan letkun läpi ja itse kovettumisreaktio ei pääsee häiriintymään alentaen haluttua lujuutta.

## 2.4 Geopolymeeri

Betonin korvikkeena voidaan käyttää geopolymeeria. Geopolymeeri sisältää sementin korvikkeena muuta materiaalia sideaineena, kuin sementti, esimerkiksi masuunikuonaa. Masuunikuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet alkaliaktivoidaan, jolloin masuunikuona kehittää lujuutta. Sementin kanssa yhdessä masuunikuonaa käytettäessä tämän ja veden reaktiossa syntyvä kalsiumhydroksidi aktivoi masuunikuonan hydrauliset ominaisuudet. Masuunikuonaa syntyy raakauraudan valmistuksen sivutuotteena. (Masuunikuona n.d.)

Myös muita teollisuuden jäte- ja sivuvirtoja voidaan käyttää sementin korvikkeena, jos nämä aineet omaavat hydraulisia ominaisuuksia. Käyttämällä näitä vaihtoehtoisia materiaaleja sementin korvikkeena voidaan vähentää betonin negatiivisia ilmastovaikutuksia ja vähentää jätteenä kaatopaikalle menevän materiaalin määrää. Tällaista kiertotaloutta hyödyntämällä pystyttäisiin vähentämään neitseellisten raaka-aineiden kulutusta, mikä vähentää ympäristölle aiheutuvia rasituksia. Betonin raaka-aineiden kuljetuksesta johtuvia hiilidioksidipäästöjä pystyttäisiin vähentämään kiertotalouden lisäämisellä, kun paikallisesti saatavilla olevia, teollisuuden sivu- ja jätevirtoja hyödynnettäisiin sideaineena sementin sijaan. Kuten aikaisemmin on mainittu kuljetus aiheuttaa noin 4% betonin koko valmistusprosessin ajalta ja on toiseksi suurin päästölähde muista betonin päästölähteistä, kuin sementin valmistusprosessista johtuvista päästöistä. (Almutairi ym. 2021.)

Geopolymeerin valmistuksessa käytettyjä sideaineita sementin tilalla ovat muun muassa: alumiinisiikaatti, lentotuhka, metakaoliini ja masuunikuona. Näiden materiaalien käytöstä geopolymeerien valmistuksessa tietoa on hyvin saatavilla ja näiden erilaista ominaisuuksista sementin tilalla käytettäessä. Esimerkiksi masuunikuonaa hyödynnetään seosaineena sementin kanssa massiivivaluissa tämän alhaisen lämmöntuoton johdosta. Geopolymeerien ominaisuudet vastaavat hyvinkin

paljon betonin ominaisuuksia. Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista betonille on sen kyky ottaa vastaan puristusta ja tätä ominaisuutta hyödynnetäänkin rakentamisessa. Geopolymeerit saadaan valmistettua siten, että niiden puristuslujuus on erittäin korkea ja massat kovettuvat nopeasti (minuuteissa). (Almutairi ym. 2021.)

Geopolymeeria hyödyntämällä rakennettiin 60 –luvulla kaksi 9-kerroksista asuinrakennusta Ukrainassa Mariupolissa. Ensimmäinen sementitön, alkaliaktivoitu, geopolymeerista rakennettu kerrostalo rakennettiin Liepstkissä Venäjällä ja se on 20 kerrosta korkea. Geopolymeerien käytöstä ja toimivuudesta löytyy siis konkreettisia esimerkkejä. (Almutairi ym. 2021.)

## **2.5 Sideaineet ja niiden aktivaattori**

Betonin sideaineena toimii sementti, joka reagoi veden kanssa sekoitettuna tuottaen sementtigelin. Tätä reaktiota kutsutaan hydrataatioksi. Sementtigelin tehtävänä on muodostaa luja sidosrunkoaineen (kiviaineksen) ja sementin välille. (Hydrataatio n.d.) Geopolymeereissä sementti korvataan muulla sideaineeksi kelpaavalla aineella, jolla on kyky muodostaa sementtigelin tapainen luja sidosverkko geopolymeerin ainesosien välille. Tähän vaihtoehtoiseksi sideaineeksi pyritään valitsemaan teollisuuden sivuvirroista tai jätejakeesta soveltuvia materiaaleja. Yleisesti ottaen nämä vaihtoehtoiset sideaineet eivät reagoi samalla tavalla veden kanssa kuin sementti, eli muodostaen tarvittavaa lujaa sidosverkkoa. Veden sijaan kovettumisreaktion käynnistämiseksi ja sen ylläpitämiseksi tarvitaan aktivointiaine. Geopolymeereille tähän tarkoitukseen käytetään alkaliaktivaattoreita.

### **2.5.1 Alkaliaktivaattori**

Fengin ja muiden (2023, 3987) mukaan natriumhydroksidia ja natriumsilikaattia on aikaisemmissa tutkimuksissa käytetty laajalti alkaliaktivaattoreina geopolymeerien valmistuksessa. Ilman alkaliaktivaattoria geopolymeerejä ei saada kovettumaan, joten sopivan alkaliaktivaattori –suhteen etsiminen on tärkeä osa geopolymeerien valmistusta. Alkaliaktivaattori voidaan laittaa kuiva-ainesten (sideaine, runkoaines ja mahdolliset lisäaineet) sekaan valmiina liuoksena tai lisätä alkaliekvivalenttina, eli kuivana jauheena kuiva-aineiden sekaan valmiiksi (Feng ym. 2023). Kuiva-aineiden sekaan jauheena lisättäessä, voidaan tuotetta valmistaa valmiiksi säkkeihin pakattuna, joihin tarvitsee lisätä vain ennalta ilmoitettu vesimäärä, joka tuottaa halutun lopputuloksen. Sopivan

alkaliaktivaattori -suhteen löytämiseksi on valmistettava useita eri koekappaleita erilaisilla seos-  
suhteilla ja testattava näiden puristuslujuus.

Puristuslujuus on yksi keskeisimpiä betonin laatua kuvaavia tekijöitä (Puristuslujuuden määrittäminen n.d.), joten tämän ominaisuuden testauksella saadaan tietoa betonin laadusta. Koska geopolymeerejä kehitetään korvaamaan betonia, on myös geopolymeereillä oltava samankaltaiset ominaisuudet, kuin betonilla. Tämän vuoksi geopolymeereille on tehtävä samat testit kuin betonillekin, jotta voidaan varmistua geopolymeerin soveltuvuudesta betonin korvikkeena.

### **2.5.2 Aktivaattorin suhteet**

Alkaliaktivaattorin erilaisilla suhteilla on vaikutusta muun muassa lopulliseen lujuteen ja kovettumisaikaan. Edellä mainittuihin ominaisuuksiin vaikuttaa myös seoksissa olevien yhdisteiden ja alkua-  
aineiden pitoisuuden ja suhteet. Samankaltaisena ominaisuutena betoniin verrattuna vesi/side-  
aine –suhteen kasvaminen heikentää geopolymeerin lujuuksia, siinä kuin betoninkin. Vesimäärän  
ollessa alhainen, mutta kuitenkin riittävä kaikkien reaktioiden loppuun viemiseksi halutun kalta-  
sina, lujuus on suurempi, kuin liiallisella vesimäärällä. (Feng ym. 2023).

## **2.6 Soodasakka**

### **2.6.1 Soodasakan kuvaus**

Soodasakka muistuttaa olomuodoltaan puun poltossa syntyvää, märkää, tuhkaa, ollessaan ominai-  
suuksiltaan kuitenkin erilaista. Yksi keskeisimmistä eroista tulee esille vettä lisättäessä, poltetun  
puun tuhka kovettuu kastuessaan ja soodasakka sen sijaan pehmenee. Tämä ominaisuus muuttaa  
näiden aineiden käsiteltävyyttä oleellisesti jatkokäyttöä ajatellen. Soodasakkaa syntyy selluteh-  
tailla sellun valmistusprosessissa keittovaiheessa liuennutta puuta poltettaessa ja on olomuodol-  
taan märän tuhkan kaltaista. (Töyssy 2016.)

Vuoden 2016 tiedon mukaan UPM:n tehtailla syntyi yli 50 000 tonnia soodasakkaa ja suurin osa  
tästä päätyi kaatopaikalle. Vain vajaat 5 % on pystytty hyödyntämään maanrakennuksessa. Yksi  
jatkokäsittelyä vaativaksi tekevä asia on soodasakan sisältämät aineet. Esimerkiksi raskasmetallit  
muodostavat omat vaatimuksensa, miten niitä tulee käsitellä ja missä niitä voidaan käyttää, siten

ettei sallitut määrät ylitä. (Töyssy 2016.) Toisaalta nämä soodasakan sisältämät aineet voivat mahdollistaa erilaisia käyttökohteita, lisätutkimuksia mahdollisista käyttökohteista tehtäessä.

### 2.6.2 Soodasakan käyttö alkalilähteenä

Geopolymeereissa käytettävät vaihtoehtoiset sideaineet sementin tilalla vaativat alkaliaktivaattorin, joka aktivoi kovettumisreaktion. Esimerkkejä käytetyille alkalilähteille ovat natriumhydroksidi ja natriumsilikaatti. Soodasakka voi toimia mahdollisena alkalilähteenä geopolymeereille, koska soodasakka on emäksinen materiaali. Tätä kautta soodasakkaa voidaan hyödyntää, muuten jätteenä menevää materiaalia, hyötykäytössä rakennusalalla. Natriumpitoisuus ja muiden aineiden osuudet vaihtelevat kuitenkin soodasakan alkuperän mukaan paljon ja tämä vaikuttaa käyttökelpoisuuteen alkaliaktivaattorina. Vaikutus käyttökelpoisuuteen johtuu alkalipitoisuuden vaihtelusta ja myös muut ominaisuudet muuttuvat erilaisten ainepitoisuuksien muuttuessa. (Rasmus ym. 2023.)

Alkaliaktivoitua geopolymeeria käytettäessä on huomioitava ympäristövaikutukset samalla tavalla kuin sementtiä sisältävän betonin kanssa. Alkaliaktivaattorit saattavat olla ympäristön kannalta yhtä haitallisia kuin sementti ja tästä yhtenä esimerkkinä on natriumsilikaatti, mikä on yksi yleisimmistä käytetyistä alkaliaktivaattoreista ja negatiivisilta ympäristövaikutuksiltaan lähes sementtiä vastaava. Tästä syystä myös alkaliaktivaattorien kohdalla on syytä miettiä vaihtoehtoisten aineiden käyttöä ja kiertotalouden mahdollisuuksia. Etenkin natriumrikas soodasakka vaikuttaa soveltuvalta vaihtoehdolta hyödynnettäväksi osana alkaliaktivointia. (Rasmus ym. 2023.)

Ennen soodasakan käyttöä alkaliaktivaattorina se täytyy ensin esikäsitellä. Esikäsitelyssä soodasakka täytyy kuumentaa korkeassa lämpötilassa, jotta orgaaninen hiili poistuisi tästä ja mahdollistaa käytön aktivaattorina. Esikäsitelyn tarve hankaloittaa soodasakan suoraan hyödyntämistä geopolymeereissa. Soodasakan lisääminen jauheena sideaineen ja muiden aineiden kanssa mahdollistaa, lisää vain vesi, tyyppisen ratkaisun. Tämä on käyttäjäystävällisempi ratkaisu verrattuna emäksisten aineiden lisäämiseen nestemäisessä muodossa, sillä syövyttävien aineiden käsittely vaatii erityistoimenpiteitä esimerkiksi suojavaatetuksen ja erityistä huolellisuutta vaativan käsittelyn osalta. (Rasmus ym. 2023.) Tässä työssä käytettyä soodasakkaa ei kuumennettu 105 °C korkeammassa lämpötilassa. Soodasakkaa ei myöskään käytetty yksinään alkaliaktivaattorina.

Kostean ja kuivan soodasakan käytön vaikutuksia erilaisissa seoksissa on tutkittu esimerkiksi Adesnyan ja muiden tutkimuksessa (2023), jossa kuivatun soodasakan käytöllä saavutettiin paremmat puristustulokset seitsemän ja 28 vuorokauden ikäisenä, kuin kosteaa soodasakkaa käytettäessä. Soodasakan kuivatus kuitenkin lisää ympäristöön kohdistuvaa rasiitusta lämmitykseen käytettävän energian johdosta. Esikäsitteilyyn kuuluu myös soodasakan jauhaminen hienommaksi jauheeksi. Tällä jauhamisella on myös vaikutus soodasakan käyttäytymiselle geopolymeerissa raekoon vaikutuksen vuoksi. Hienompi raekoko mahdollistaa tiiviimmän rakenteen, millä on vaikutusta puristuslujuuden lisäksi muihinkin ominaisuuksiin. (Adesnya ym. 2023.)

### 3 Menetelmäkuvaus

Muuttunut toimintaympäristö on yksi kehittämisen perussyistä (Toikko & Rantanen 2009, 18). Tässä työssä kehittämisellä pyritään löytämään ratkaisu jätteenä kaatopaikalle joutuvan materiaalin vähentämiseen, neitseellisten raaka-aineiden käytön vähentämiseen ja hiilidioksidipäästöjen pienentämiseen betonin käytön osalta. Toinen näkökulma on alati tehokkaampien ja nopeampien rakentamisen menetelmien kehittäminen. 3D-tulostamisella pyritään luomaan nopeampi ja helpompi tapa luoda monimutkaisiakin muotoja ja rakenteita, samalla säästämällä materiaaleja muotojen optimoinnilla.

Perustutkimuksen tavoitteena on tietämyksen edistäminen, eikä se tähtää suoraan käytännöllisiin tavoitteisiin ja tämä vastaa mitä- ja miksi-kysymyksiin. Soveltavassa tutkimuksessa pyritään ratkaisemaan käytännön ongelmia käyttäen apuna perustutkimuksessa tuotettua teoreettista ja kuvailevaa tietoa. Tässä vastataan myös kuinka-kysymykseen. Kehitystyön tavoitteena on luoda uusia tai parannettuja tuotteita, tuotantovälineitä tai tuotantomenetelmiä ja palveluja. Nämä kolme tapaa tuottaa tietoa ovat yleisesti tiedeyhteisön hyväksymä jaottelu tiedontuotannolle. Kehitystyön yhteiskunnallinen merkitys on viime aikoina kasvanut. (Toikko & Rantanen 2009, 19–20.) Tässä työssä käytettiin apuna teoreettista pohjatietoa ja kokeiltiin käytännön kokeilla erilaisia yhdistelmiä, kuinka sementin korvaaminen onnistuu 3D-tulostettavassa materiaalissa muilla aineilla.

Tutkimuksellisella kehittämistoiminnalla kuvataan tutkimustoiminnan ja kehittämistoiminnan yhteyttä, jossa tutkimus ja kehittämistoiminta risteävät. Tässä käytännön ongelmat ja kysymykset

toimivat tiedontuotannon ohjaavana tekijänä, jossa tutkimuksellisia periaatteita käytetään kehittämisen apuna ja hyödynnetään niitä tarpeen mukaan. Tällaisessa kehittämistoiminnassa ei tavoitella ainoastaan välittömiä tuloksia, vaan kuvataan ongelmat ja niiden ratkaisu, sekä tuotetaan tietoa perustellusti. (Toikko & Rantanen 2009, 21–23.) Kehittämistoiminnan tuottama tieto pyrkii osoittamaan kehitettävän asian käyttökelpoisuudesta, esimerkiksi onko jokin työmenetelmä hyvä vai ei. Tutkimuksellisessa kehittämistoiminnassa tavoitellaan empiirisesti pätevää tietoa. (Toikko & Rantanen 2009, 39.) Tässä työssä etsittiin ratkaisua muun muassa ratkaisua soodasakan hyödyntämiseen 3D-tulostettavan betonin kaltaisessa materiaalissa ja sementin korvaamista hiilineutraalimmalla materiaalilla. Tietoa tuotettiin erilaisin kokein erilaisista yhdistelmistä resepteissä ja esitettiin puristustuloksia, sekä kokeiltiin soveltuvuutta 3D-tulostamiseen.

Kehittämistoiminta voidaan nähdä joko suunnitteluorientoituneena tai prosessorientoituneena toimintana. Suunnitteluorientoituneessa kehittämisessä prosessi on suunniteltu ja määritelty mahdollisimman tarkasti ja tämän tavoitteena on mahdollisimman ennakoitavissa ja hallittavissa oleva toiminta. Tällöin toteutusta verrataan suunnitelmaan ja jos suunnitelmasta poiketaan, tehdään muutoksia, joiden avulla palataan suunniteltuun toimintaan takaisin. (Toikko & Rantanen 2009, 49–50.)

Prossessorientoituneessa kehittämisessä kehityksen kohteena olevasta asiasta syntyy koko ajan uutta tietoa ja toimintaa voidaan muuttaa tämän tiedon pohjalta. Tällöin toimintaa kehitetään jatkuvasti uuden asian oppimisen ja kokeiluiden kautta haluttuun suuntaan. Tiedon jatkuva kerääminen ja analysointi toimivat pohjana toiminnan kehittämiseksi ja kehittämistyö muuttuu jatkuvasti uuden tiedon pohjalta ja prosessin suunta on ennakoimaton. (Toikko & Rantanen 2009, 50.) Tämä työ oli prosessorientoitunut, sillä kokeiden tulosten perusteella toimintaa muutettiin, jotta päästäisiin haluttuun suuntaan ja lopputulokseen. Tuloksia oli vaikea ennustaa etukäteen ja ennalta ajatellusta suunnasta poikettiin monesti.

## 4 Toteutus

### 4.1 Toteutuksen kuvaus

Työssä tavoitteena oli kehittää sementitön 3D-tulostettava geopolymeeri, joka sisältää masuunikuonaa ja soodasakkaa. Kokeellisessa osiossa tutkittiin masuunikuonan ja soodasakan soveltuvuutta osana betoninkaltaisen 3D-tulostettavan rakennusmateriaalin valmistamisessa. Tässä osiossa valmistettiin Verticon valmisseoksesta vertailumassa, minkä pohjalta lähdettiin kehittämään samankaltaisia ominaisuuksia omaavia sementittömiä seoksia. Erilaisista resepteistä valmistettiin koekappaleita puristuslujuuden testausta varten ja näiden tuloksia vertailtiin toisiinsa, joiden pohjalta reseptejä kehitettiin haluttuun puristuslujuuteen.

Valmistettujen seosten ominaisuuksia, kuten tulostettavuus, kuinka hyvin massa kyetään pursottamaan putken läpi ja tämän yhtenäinen, katkeilematon rakenne, vertailtiin Verticon massan ominaisuuksiin. Tätä ominaisuutta testattiin pienistä koe-eristä valmistetuilla tulostusmassoilla käsipursoittimella pursotetuilla koetulostuksilla (kuvio 1). Tässä massaa pursotettiin palkoina muutama kerros päällekkäin ja havainnoitiin silmämääräisesti massan muotonsa säilyttämistä ja riittävän kontaktin muodostamista palkojen välille (kuvio 2). Jos reseptin ominaisuudet eivät olleet riittävän hyvät reseptiä muutettiin.



Kuvio 1. Käsipursoitin ja sillä pursotettu koetulostus (Kalle Jaakkola)



Kuvio 2. Vasemmalla kappaleen 51 koetuloste ja oikealla kappaleen 54 koetuloste (Kalle Jaakkola)

Puristuslujuus testattiin Controlsin puristimella (kuvio 3) Jyväskylän ammattikorkeakoulun akkreditoitussa rakennuslaboratoriossa. Valmistetut koekappaleet olivat mitoiltaan 100 x 100 x 100 mm olevia kuutioita, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Puristuslujuudet on ilmoitettu paineen kaavasta  $p = F/A$  laskettuna, missä A on pinta-ala, joka näillä kappaleilla oli 10 000 mm<sup>2</sup> ja F on voima, joka saatiin kuhunkin kappaleen kohdistetusta suurimmasta voimasta ennen hajoamista. Tulokset on ilmoitettu tällä tavalla, eikä SFS 7022:2019 mukaisesti. Standardin mukaisiksi 150 x 150 x 150 mm kuutiolujuuksiksi muunnetut lujuudet löytyvät liitteestä 1.





Kuvio 3. Koekappaleiden puristamiseen käytetty puristin (Kalle Jaakkola)

Koesarjoilla tarkoitetaan samalla valmistuserällä ja valmistuskerralla tehtyjä koekappaleita, joista testattiin puristuslujuus ja kokeiltiin soveltuvuutta tulostamiseen käsipursottimella koetulostamalla pieni määrä massaa. Koesarjoja valmistettiin useita kertoja erilaisella reseptillä. Reseptiä muutettiin aikaisempien koesarjojen tulosten perusteella.

## 4.2 Käytännön kokeet

Verticon perustulostusmassa-jauhetta seulottiin 1 kg seulontalaitteella (kuvio 4), jolla selvitettiin rakeisuus kiviaineksille tulostettavan massan pohjaksi. Seulonnasta saatiin tulokseksi seuraavaa 2 mm: 0,7 %, 1 mm: 5,7 %, 0,5 mm: 14,0 %, 0,25 mm: 34,2 %, 0,125 mm: 7,0 % loppuosa 38,4 % oli tätä pienempää. Sementtiä ei erotettu ennen seulontaa, vaan oletettiin 0,125 mm seulan läpäisseen osuuden, väristä ja määrästä päätellen, olevan sementtiä. Verticon käyttöturvatiedotteen mukaan sementtiä on seoksen (Vertico 3D print base mix) määrästä 40,13 %. Seulonnalla ei pyritty tarkkaan rakeisuuden selvittämiseen, vaan suuntaa antavaksi pohjatiedoksi. Näiden tulosten perusteella seulottiin laboratoriosta löytyvästä 0–8 mm sorasta ja hienoaineksesta 2 mm ja 0,5 mm

käsiseulalla runkoaine valmistettaviin resepteihin. Näiden väliseksi suhteeksi valittiin lähtökohdaksi noin 35 % ja 65 %. Jatkossa taulukoissa 0,5–2 mm runkoaineeseen viitataan nimellä runkoaine 1 ja 0–0,5 mm runkoaineeseen viitataan nimellä runkoaine 2.



Kuvio 4. Seulontaan käytetty seulontalaite (Kalle Jaakkola)

Tästä valmistettiin koesarja 33–34 (kuvio 5), jossa massaprosentuaaliset osuudet reseptin kokonaismassasta olivat: 0,5–2 mm kiviainesta 18,8 %, 0–0,5 mm kiviainesta 35 %, sementtiä 31,5 %, vettä 14,1 % ja Uppo-Parmixia 0,7 %. Näillä suhteilla toteutettuna tulostettavuus käsipursottimella olivat hyvät. Tämän reseptin pohjalta sementtiä korvattiin muilla aineilla ja seurattiin vaikutusta tulostettavuuteen ja puristuslujuuteen. Puristustulos seitsemän vuorokauden ikäisenä tälle koesarjalle oli 50,0 MPa ja 28 vuorokauden iässä tulos oli 56,6 MPa.

<b>Koesarja 33 - 34</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	18,8 %	1100	7 vrk	50,0
Runkoaine 2	35,0 %	2050	28 vrk	56,6
Sementti	31,5 %	1850		
Vesi	14,1 %	825		
Uppo-Parmix	0,7 %	40		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5865</b>		

Kuvio 5. Koesarjan 33–34 resepti ja puristustulokset (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 35–36 (kuvio 6) korvattiin 50 % sementin määrästä masuunikuonalla, pitäen resepti muuten samanlaisena. Tällä kappaleella oli huomattavasti alempi puristuslujuus 7 vuorokauden iässä 38,8 MPa, kuin edellisellä kappaleella. 28 vuorokauden ikäisenä pelkkää sementtiä sisältävä kappale kesti 56,6 MPa ja 50 % masuunikuonaa sideaineena käyttävä kappale kesti 54,2 MPa. Lujuusero tasoittui pidemmällä aikavälillä ja hitaamman lujuuskehityksen tiedetään olevan masuunikuonan ominaisuus. Tällä koesarjalla kokeiltiin, millainen vaikutus sementin korvaamisella masuunikuonalla on puristuslujuuteen ja pursotettavuuteen. Käsin pursotettaessa ei havaittu merkittävää eroa tulostettavuudessa koesarjaan 33–34 verrattuna.

<b>Koesarja 35 - 36</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	18,8 %	1100	7 vrk	38,8
Runkoaine 2	35,0 %	2050	28 vrk	54,2
Masuunikuona	15,8 %	925		
Sementti	15,8 %	925		
Vesi	14,1 %	825		
Uppo-Parmix	0,7 %	40		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5865</b>		

Kuvio 6. Koesarjan 35–36 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 37–38 (kuvio 7) sementistä korvattiin 10 % soodasakalla, jolloin sementtiä oli sideaineesta 40 %, masuunikuonaa 50 %. Puristustulos tälle oli seitsemän vuorokauden iässä 32,1 MPa ja 28 vuorokauden iässä 46,2 MPa. Soodasakka heikensi puristustulosta huomattavasti edelliseen koesarjaan 35–36 verrattuna. Erot puristuslujuuksissa olivat seitsemän vuorokauden iässä 6,7 MPa ja 28 vuorokauden iässä 8 MPa. Soodasakka sitoo itseensä huomattavan paljon vettä, eikä tätä huomioitu vesimäärässä. Veden lisääminen olisi muuttanut vesi–sideaine –suhdetta, joka haluttiin

pitää samana edellisiin kokeisiin nähden, jotta saataisiin selville eri aineiden vaikutus puristuslujuuteen.

<b>Koesarja 37 - 38</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	18,8 %	1100	7 vrk	32,1
Runkoaine 2	35,0 %	2050	28 vrk	46,2
Masuunikuona	15,8 %	925		
Sementti	12,6 %	740		
Vesi	14,1 %	825		
Uppo-Parmix	0,7 %	40		
Soodasakka	3,2 %	185		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5865</b>		

Kuvio 7. Koesarjan 37–38 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Sementin vähentämistä jatkettiin edelleen koesarjaan 39–40 (kuvio 8), jossa sideaineesta sementtiä oli 27 %, masuunikuonaa 63 % ja soodasakkaa 10 %. Lisäksi alle 0,5 mm kiviaineksesta 30 % korvattiin soodasakalla verrattuna koesarjaan 37–38. Seitsemän päivän puristuslujuus oli 23,8 MPa ja 28 vuorokauden puristuslujuus 32,3 MPa. Puristuslujuuden heikkenemistä selittää sementin vähentäminen ja soodasakan määrän lisääminen. Soodasakan määrän kasvattaminen lisäsi veden tarvetta, jotta massaa saatiin pursotettua hyvin käsipursottimella, ja tämä nostaa vesi–sementti – suhdetta, joka alentaa puristuslujuutta. Massa levisi hieman enemmän kuin aikaisempi koesarja pursotettaessa.

<b>Koesarja 39 - 40</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	18,2 %	1100	7 vrk	23,8
Runkoaine 2	23,7 %	1435	28 vrk	32,3
Masuunikuona	19,3 %	1165		
Sementti	8,3 %	500		
Vesi	16,6 %	1005		
Uppo-Parmix	0,7 %	40		
Soodasakka	13,2 %	800		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>6045</b>		

Kuvio 8. Resepti 39–40 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 41–42 (kuvio 9) siirryttiin täysin sementittömään reseptiin, johon alkaliaktivaattorina käytettiin natriumhydroksidin (NaOH) ja vesilasin seosta. Natriumhydroksidista valmistettiin 5 molaarinen liuos. Vesilasi tuli valmiina liuoksena, jossa piidioksidia oli 26,8 % ja natriumoksidia 8,2 % loppuosan ollessa vettä. Alkaliaktivaattorin seossuhteet tulivat KBB-hankkeessa tehtyjen kokeiden pohjalta. Puristuslujuus seitsemän vuorokauden iässä oli 11,4 MPa ja 28 vuorokauden iässä 32,6 MPa. Kappaleet eivät kuitenkaan kestäneet vuorokauden iässä kunnolla muotista purkamista ja kuutioihin jäi jälki niitä sormella painettaessa. Tulostettavuus käsipursottimella oli hyvä, mutta 16 tunnin iässä koetuloste hajosi käsin rasitettaessa, eivätkä palot olleet tarttuneet kunnolla toisiinsa.

<b>Koesarja 41 - 42</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	17,9 %	1103	7 vrk	11,4
Runkoaine 2	32,6 %	2012	28 vrk	32,6
Masuunikuona	20,4 %	1261		
NaOH	2,0 %	124		
Vesi	11,3 %	696		
Uppo-Parmix	0,7 %	41		
Soodasakka	9,5 %	587		
Vesilasi	5,6 %	346		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>6170</b>		

Kuvio 9. Resepti 41–42 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 43–44 (kuvio 10) sideaineena käytettiin 70 % masuunikuonaa, 20 % sementtiä ja soodasakkaa 10 %. Seitsemän vuorokauden puristustulos oli 24,9 MPa ja 28 vuorokauden puristustulos oli 26,6 MPa. Lujutta ei enää kehittynyt seitsemän ja 28 vuorokauden välillä merkittävästi, mahdollisesti alkalisuuden puutteen vuoksi, sillä sementin ja etenkin soodasakan määrää vähennettiin merkittävästi. Nämä molemmat toimivat alkalilähteenä.

<b>Koesarja 43 - 44</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	18,8 %	1136	7 vrk	24,9
Runkoaine 2	35,0 %	2116	28 vrk	26,6
Masuunikuona	22,1 %	1336		
Sementti	6,3 %	381		
Vesi	14,1 %	852		
Uppo-Parmix	0,7 %	42		
Soodasakka	3,0 %	181		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>6045</b>		

Kuvio 10. Resepti 43–44 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 45–46 (kuvio 11) sementittömän reseptin kehitystä jatkettiin muuttamalla soodasakan määrä 5 % kokonaismassasta ja tällä saatiin veden määrää alennettua hieman verrattuna koesarjaan 41–42 ja puristustuloksetkin olivat hieman paremmat. 7 vuorokauden iässä puristus tulos oli 13,7 MPa ja 28 vuorokauden iässä 36,3 MPa. Koetulostus käsipursottimella ei kuitenkaan ollut helppoa, sillä massa oli liian jähmeää tähän.

<b>Koesarja 45 - 46</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	19,0 %	1100	7 vrk	13,7
Runkoaine 2	35,4 %	2050	28 vrk	36,3
Masuunikuona	22,3 %	1290		
NaOH	2,0 %	117		
Vesi	10,0 %	580		
Uppo-Parmix	0,7 %	41		
Soodasakka	5,0 %	289		
Vesilasi	5,7 %	328		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5795</b>		

Kuvio 11. Resepti 45–46 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 47–48 (kuvio 12) soodasakan määrä vähennettiin 2,2 %:iin kokonaismassasta ja runkoaineen määrä kasvatettiin muutamalla prosenttiyksiköllä. Vedentarve putosi soodasakan vähentämisen myötä. Myös masuunikuonan osuutta kasvatettiin hieman. Nämä muutokset edelliseen koesarjaan nähden. Puristustulokset olivat seitsemän vuorokauden iässä 2,3 MPa ja 28 vuorokauden

iässä 38,1 MPa. Tulostui hyvin käsin pursotettaessa, mutta massa vaikutti hieman liian löysältä silmämääräisesti havainnoiden. Seitsemän vuorokauden puristuslujuus erittäin alhainen.

<b>Koesarja 47 - 48</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	20,6 %	1200	7 vrk	2,3
Runkoaine 2	37,0 %	2150	28 vrk	38,1
Masuunikuona	23,0 %	1340		
NaOH	2,1 %	120		
Vesi	8,6 %	500		
Uppo-Parmix	0,7 %	41		
Soodasakka	2,2 %	127		
Vesilasi	5,8 %	337		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5815</b>		

Kuvio 12. Koesarja 47–48 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 49–50 (kuvio 13) masuunikuonan osuutta kasvatettiin 23,0 % osuudesta 26,1 % ja runkoaineen osuus muutettiin takaisin koesarja 45–46 mukaiseksi. Seitsemän vuorokauden puristustulos 1,29 MPa eli tämä massa ei kestänyt mitään varhaisessa vaiheessa, mutta 28 vuorokauden puristustulos oli 34,3 MPa. Tässä ja edellisessä koesarjassa näkyi erittäin alhainen seitsemän vuorokauden puristuslujuus. Todennäköisesti syynä alkaliaktivaattorin riittämättömyys. Tämän ja edellisen koesarjan reseptiä verrattaessa koesarjaan 45–46 olennaisimpana erona on soodasakan määrän vähentäminen ja masuunikuonan osuuden lisääminen, joten soodasakan toimintaa alkali-lähteenä on syytä tutkia. Lisäksi alkaliaktivaattorin suhteita ja määrää oli syytä tarkastella lähemmin.

<b>Koesarja 49 - 50</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	19,1 %	1100	7 vrk	1,3
Runkoaine 2	35,6 %	2050	28 vrk	34,3
Masuunikuona	26,1 %	1500		
NaOH	2,0 %	117		
Vesi	8,5 %	490		
Uppo-Parmix	0,7 %	41		
Soodasakka	2,2 %	127		
Vesilasi	5,7 %	328		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5753</b>		

Kuvio 13. Koesarja 49–50 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 51–52 (kuvio 14) alkaliaktivaattorin määrää sekä natriumhydroksidin ja vesilasin suhteita muutettu Nematollahin ja muiden (2018) tutkimuksen mukaan erilaisiksi. Edellä mainitussa tutkimuksessa sideaineena käytettiin lentotuhkaa ja alkaliaktivaattorissa 8 molaarista natriumhydroksidia. Tässä työssä käytettiin sideaineena masuunikuonaa ja alkaliaktivaattorissa 5 molaarista natriumhydroksidia, jonka määrää nostettiin vastaamaan 8 molaarisen liuoksen ainemäärää. Alkaliaktivaattorin osuudeksi tuli 0,68 masuunikuonan massasta. Tähän kokeeseen runkoaineen määräksi otettiin 2,4 kertainen massa masuunikuonan ja soodasakan yhteenlasketusta massasta. Soodasakan osuutta nostettiin edellisten kokeiden pohjalta.

Tällä parannetulla suhteella kappaleet kovettuivat erittäin nopeasti. Noin 20 minuuttia muotittain laittamisen jälkeen koekappaleet olivat kovettuneet siten, että muurauskauhalla kevyesti naputellen näihin ei jäänyt jälkeä. Koepursotuskappaleet kestivät päällimmäisestä palosta ilmaan nostamisen noin kahden tunnin jälkeen pursotuksesta. Näiden leviämä oli hieman liian suuri 3D-tulostettavaksi materiaaliksi (kuvio 17). Yhden vuorokauden puristustulos oli 22,1 MPa ja 28 vuorokauden puristustulos oli 64,8 MPa. Kovettuminen oli tässä kokeessa liian nopeaa 3D-tulostusta varten, sillä massa ehtisi kovettua letkuun, eikä tulostaminen tällöin onnistuisi. Alkaliaktivaattorin suhteita oli muutettava.



<b>Koesarja 51 - 52</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	19,7 %	1040	1 vrk	22,1
Runkoaine 2	39,5 %	2080	28 vrk	64,8
Masuunikuona	19,7 %	1040		
NaOH	5,3 %	278		
Vesi	1,9 %	100		
Uppo-Parmix	0,8 %	40		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	8,2 %	434		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5272</b>		

Kuvio 14. Koesarja 51–52 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koekappaleeseen 53 (kuvio 15) runkoaineen määrä laskettiin 1,7 kertaiseksi, masuunikuonan ja soodasakan massasta laskettuna, edellisen 2,4 kertaisen määrään sijaan. Alkaliaktivaattorin määräksi laskettiin 0,61 masuunikuonan massasta. Tällä koekappaleella oli tarkoitus kokeilla runkoaineen määrän vähentämisen vaikutusta tulostettavuuteen, joten massaa valmistettiin pienempi määrä. Alkuperäisellä reseptillä valmistettaessa natriumhydroksidiliuoksen ja vesilasiliuoksen sisältämä vesimäärä riitti tekemään massasta liian löysän. Tämän johdosta kuiva-aineita jouduttiin lisäämään mukaan enemmän kesken valmistusprosessin. Tästä massasta valmistettiin vajaa koekuutio, jolle laskettiin murtokuorman ja pinta-alan mukaan puristuslujuus. Puristustulos yhden vuorokauden iässä oli 27,2 MPa. Käsin pursotettaessa massa tulostui hyvin, mutta kovettui liian nopeasti.

<b>Koekappale 53</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	17,7 %	380	1 vrk	27,2
Runkoaine 2	35,3 %	759		
Masuunikuona	24,9 %	536		
NaOH	6,0 %	128		
Vesi	0,0 %	0		
Uppo-Parmix	0,7 %	14		
Soodasakka	6,2 %	134		
Vesilasi	9,3 %	200		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>2151</b>		

Kuvio 15. Koekappaleen 53 lopullinen resepti ja puristustulos 1 vuorokauden iässä (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 54–55 (kuvio 16) natriumhydroksidi/vesilasi –suhde muutettiin 1:1 aiemmasta 0,64 massasuhteesta. Myös tällä suhteella massa kovettui liian nopeasti. Noin tunti koekappaleen valmistuksen jälkeen muuraukauhalla sai painaa kohtuullisella voimalla, jotta kappaleeseen sai tehtyä jäljen. Puristustulos yhden vuorokauden jälkeen 19,9 MPa ja 28 vuorokauden puristustulos oli 79,9 MPa. Tällä reseptillä tuli tarpeettoman korkea puristuslujuus tavoiteltavaan 37 MPa nähden. Koepursotus antoi hyvän näköisen tuloksen (kuvio 17).

Koesarja 54 - 55		Massa (g)	Ikä	Puristuslujuus (MPa)
Runkoaine 1	19,4 %	1040	1 vrk	19,9
Runkoaine 2	38,9 %	2080	28 vrk	79,9
Masuunikuona	19,4 %	1040		
NaOH	6,7 %	356		
Vesi	3,3 %	177		
Uppo-Parmix	0,7 %	40		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	6,7 %	356		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5349</b>		

Kuvio 16. Koesarjan 54–55 resepti ja puristustulokset (Kalle Jaakkola)



Kuvio 17. Koekappaleen 51 (vasemmalla) koepursotus verrattuna kappaleen 54 koepursotukseen (oikealla) (Kalle Jaakkola)

Koesarjassa 56–57 (kuvio 18) alkaliaktivaattorina käytettiin ainoastaan natriumhydroksidia pitäen aktivaattorin massa samana. Tällä kappaleella tiheys oli alempi kuin aikaisemmillä koekappaleilla. Koekappaleen halkaisun jälkeen halkaisupinnassa oli silmin havaittavissa olevia huokosia läpi kappaleen. Esimerkiksi suhteen ollessa 1:1 tiheys oli 2182 kg/m<sup>3</sup> (koekappale 54) ja tämän kokeen kappaleiden tiheydet olivat 1943 kg/m<sup>3</sup> ja 1952 kg/m<sup>3</sup>. Puristustulos yhden vuorokauden iässä oli 5,7 MPa ja 28 vuorokauden iässä 14,5 MPa. Tämän kokeen perusteella vesilasilla on olennainen osuus tiivistymisen kannalta ja tätä kautta vaikutus loppulujuuteen.

<b>Koesarja 56 - 57</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	19,7 %	1040	1 vrk	5,7
Runkoaine 2	39,5 %	2080	28 vrk	14,5
Masuunikuona	19,7 %	1040		
NaOH	13,5 %	712		
Vesi	1,9 %	100		
Uppo-Parmix	0,8 %	40		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	0,0 %	0		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5272</b>		

Kuvio 18. Koesarjan 56–57 resepti ja puristustulokset (Kalle Jaakkola)

Koesarjalla 60–61 (kuvio 19) sekoitusaikaa testattu siten että sekoitettu aluksi 15 minuuttia ja tämän jälkeen seisotettu noin 7 minuuttia ja sekoitettu tämän jälkeen 5 minuuttia. Tällä oli tarkoitus simuloida sekoittamista ja sen jälkeistä syöttökaukaloön lappamista ja pumpun läpi kulkemista. Tässä tuli ilmi tämän kokeilun tarpeellisuus, koska massan käyttäytyminen muuttui hieman seisottamisen ja uudelleen sekoittamisen jälkeen. Ensimmäisen sekoituskerran jälkeen massa vaikutti hieman löysältä, mutta seisottamisen ja uudelleen sekoittamisen jälkeen massa alkoi kovettua todella nopeasti. Massan muottiin laittaminen oli erittäin haasteellista 10 minuutin jälkeen ja massa oli selvästi kovettumassa muottiin laittamisen aikana. Muotista purettaessa näkyi, ettei massa ollut tiivistynyt kunnolla ja muoto ei ollut täysin kuution mallinen. Kappaleet kuitenkin puristettiin ja puristustulokset yhden vuorokauden iässä 12,4 MPa ja 38 vuorokauden iässä 17,3 MPa.

<b>Koesarja 60 - 61</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä</b>	<b>Puristuslujuus (MPa)</b>
Runkoaine 1	19,7 %	1040	1 vrk	12,4
Runkoaine 2	34,4 %	1820	38 vrk	17,3
Masuunikuona	24,6 %	1300		
NaOH	6,7 %	356		
Vesi	2,3 %	120		
Uppo-Parmix	0,7 %	35		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	6,7 %	356		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5287</b>		

Kuvio 19. Koesarjan 60–61 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

Koesarjan 62–63 tekeminen aloitettiin kuvion 20 mukaisella reseptillä. Alkaliaktivaattorin määrä masuunikuonan massasta laskettuna 0,548 ja natriumhydroksidi/vesilasi –suhde oli 2:1. Aluksi massaa sekoitettiin 15 minuuttia ja tämän jälkeen suoritettiin koepursotus käsipursottimella, joka näytti hyvältä. Massaa seisotettiin 10 minuuttia ja tämän jälkeen sekoitettiin 5 minuuttia. Tämän jälkeen massa alkoi kovettua erittäin nopeasti ja tästä valmistettiin koekuutio. Jäljelle jääneeseen massaan sekoitettiin vettä lisää 36 grammaa, jolla selvitetään, onko kyse todellakin kovettumisesta vai sitovatko kuiva-aineet vettä itseensä ja tämä vaikuttaisi kovettumiselta. Veden lisäämisen ja lyhyen sekoittamisen jälkeen massa alkoi jälleen kovettua, eikä tullut enää käsipursottimesta ulos. Tästä massasta valmistettiin toinen koekuutio. Tälläkin alkaliaktivaattorilla kovettuminen tapahtuu aivan liian nopeasti. Kumpikin koekuutio puristettiin yhden vuorokauden iässä. Ensimmäisen puristutuloksen ollen 22,6 MPa ja toisen 21 MPa. Näissäkin kappaleissa huono tiivistyminen näkyi muotit purettaessa.

<b>Koesarja 62 - 63</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	19,6 %	1040	1 vrk	22,6
Runkoaine 2	34,4 %	1820	1 vrk	21,0
Masuunikuona	24,5 %	1300		
NaOH	9,0 %	475		
Vesi	2,5 %	130		
Uppo-Parmix	0,7 %	35		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	4,5 %	237		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5297</b>		

Kuvio 20. Koesarja 62–63 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

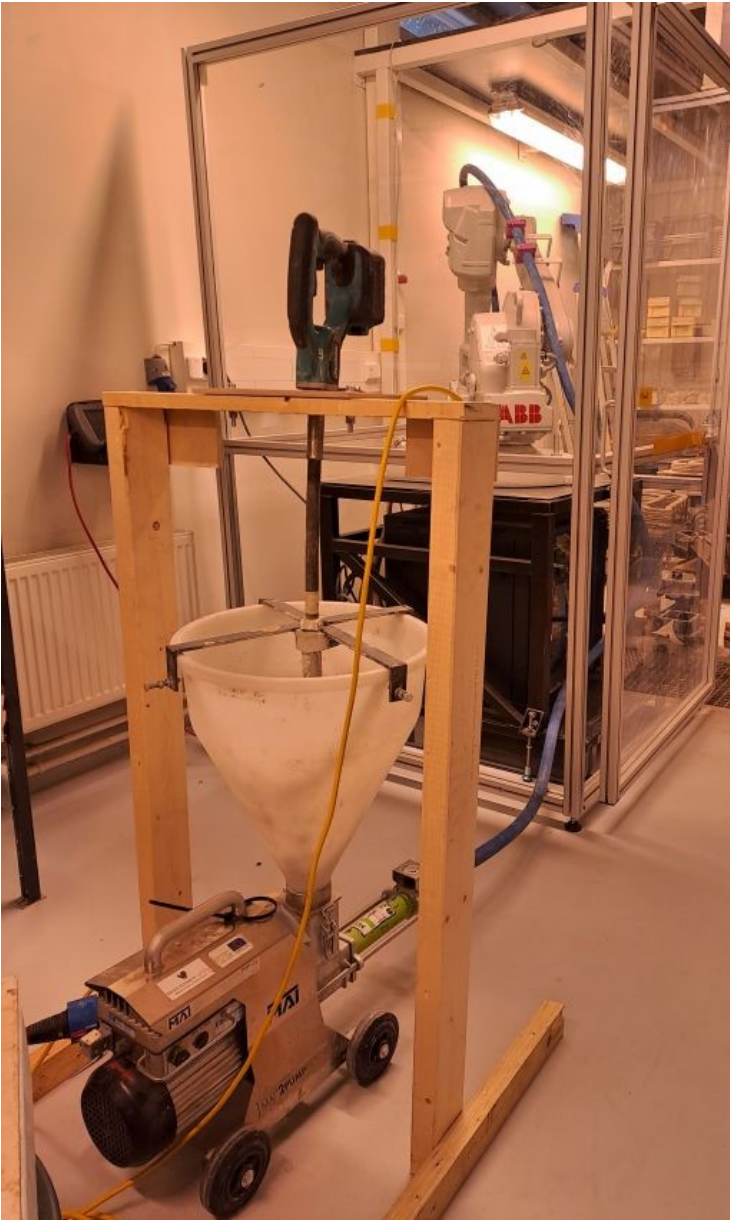
Koesarjaan 64–65 (kuvio 21) natriumhydroksidi/vesilasi –suhde muutettiin 5:1 edellisten kokeiden pohjalta ja kokeiltiin kuinka vesilasin osuuden pienentäminen edelleen vaikuttaa kovettumisen nopeuteen. Alkaliaktivaattorin määrä pidettiin samana edelliseen kokeeseen nähden, eli 0,548 masuunikuonan massasta. Valmistuksessa noudatettiin viimeisimpien kokeiden mukaisesti samaa valmistustapaa. Massaa sekoitettiin 15 minuuttia ja tästä suoritettiin koepursotukset, jotka antoivat erittäin lupaavia tuloksia. Palot tulostuivat hyvin muotonsa pitäen, kuitenkin hyvin toisiinsa liittyen. Tämä silmämääräisesti arvioiden. Massaa seisotettiin 10 minuuttia ja tämän jälkeen sekoitettiin lisää 5 minuuttia, jonka jälkeen suoritettiin toinen koepursotus. Tällä kertaa massa ei alkanut kovettua vielä tässä vaiheessa, vaan tulostaminen käsipursottimella onnistui hyvin. Massasta valmistettiin koekuutiot. Noin tunti ja 15 minuuttia koekuutioiden valmistamisen jälkeen koetulosten kovettumista kokeiltiin painamalla tätä ruuvilla, johon ruuvi upposi kohtuullisen helposti pienellä vastuksella. Tällä reseptillä vaikutti olevan riittävän pitkä työstöaika. Puristustulokset olivat 22,3 MPa vuorokauden iässä ja 53,8 MPa 36 vuorokauden iässä. Tämä resepti jatkossa nimellä resepti 64.

<b>Koesarja 64 - 65</b>		<b>Massa (g)</b>	<b>Ikä Puristuslujuus (MPa)</b>	
Runkoaine 1	19,8 %	1040	1 vrk	22,3
Runkoaine 2	34,6 %	1820	36 vrk	53,8
Masuunikuona	24,7 %	1300		
NaOH	11,3 %	594		
Vesi	1,8 %	95		
Uppo-Parmix	0,7 %	35		
Soodasakka	4,9 %	260		
Vesilasi	2,3 %	119		
<b>Yhteensä</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5263</b>		

Kuvio 21. Koesarjan 64–65 resepti ja puristuslujuudet (Kalle Jaakkola)

### 4.3 Robottivusteiset 3D-tulosteet

3D-tulostamisessa käytettiin ABB 1600 –robottia (kuvio 23), jolle tuotiin tietokoneella luodusta mallista liikeradat. Tulostettavan materiaalin pumppaamisessa käytettiin MAI®2PUMP-PICTOR:ia (kuvio 22), joka on tarkoitettu lähinnä laastin pumppaukseen. Pumpun kanssa käytettävän materiaalin raekoon ylärajaksi on ilmoitettu 2 mm. Tulostettava massa laitettiin pumpun syöttökaukalo, josta tämä kulki pumpulta tulevan letkun kautta robotille (kuvio 22). Syöttökaukalon ulkopuolelle valmistettiin teline, johon asetettiin sauvatärytin (kuvio 22). Sauvatäryttimen pää oli syöttökaukalossa olevan tulostettavan materiaalin keskellä. Tällä massa saatiin kulkemaan tasaisesti pumpulle. Tulostettaessa pumppu laitettiin päälle ja odotettiin tulostettavan materiaalin tulevan letkun läpi. Tämän jälkeen robotti käynnistettiin ja tämä alkoi toteuttaa sille ennalta asetettua liikerataa. Tulostuksen ollessa valmis robotti palasi aloituspaikalleen ja pumppu pysäytettiin.



Kuvio 22. Tulostuslaitteisto, pumppu, sauvatärytin ja robotti (Kalle Jaakkola)



Kuvio 23. Robotti, tulostuskärki ja tulostettuja kappaleita (Kalle Jaakkola)

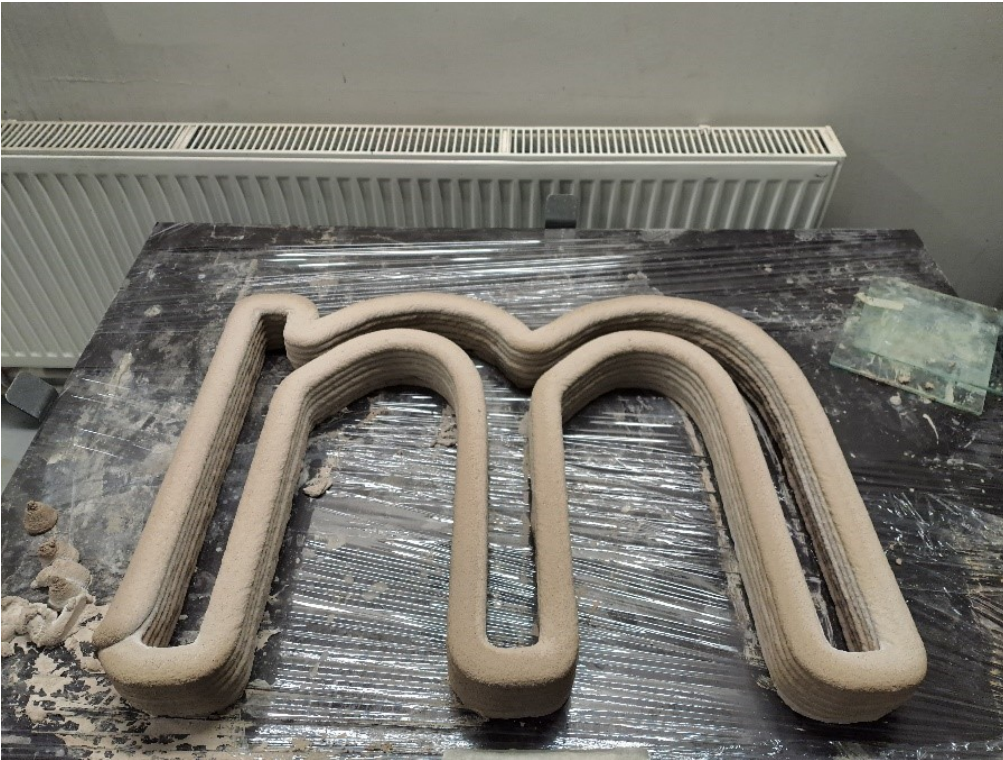
Reseptin 64 koepursotukset käsipursottimella antoivat lupaavia tuloksia varsinaista 3D-tulostamista varten, joten tästä reseptistä valmistettiin 40 kg erä. Tässä erässä käytettiin runkoaineena Fescon 0–2 mm leikkihiekkaa, sillä suuren hiekkamäärän seulominen olisi ollut liian hidasta aikataululle, jolle tuloste haluttiin toteuttaa. Robottivusteinen 3D-tulostus tällä sementittömällä massalla onnistui erittäin hyvin. Ensimmäisen robottivusteisen tulostuskerran ongelmaksi osoittautui robotin asetukset, jolloin tuloste ei visuaalisesti näyttänyt hyvältä (kuvio 24). Massa kuitenkin tuli katkeilematta ulos ja säilyttäen muotonsa. Tästä massasta valmistettiin kaksi koekuutiota, joista jätettiin sauvatäryttäminen pois, jotta kuutioiden rakenne vastaisi enemmän varsinaisen tulosteen rakennetta. Puristuslujuudet koekappaleille olivat yhden vuorokauden iässä 15,7 MPa (nimellä T1.1) ja seitsemän vuorokauden iässä 30,9 MPa (nimellä T1.2).





Kuvio 24. Ensimmäinen robottivusteinen 3D-tulostus sementittömällä reseptillä 64 (Kalle Jaakkola)

Toisella tulostuskerralla runkoaine seulottiin käsin, kuten muissakin kokeissa oli tehty. Massan valmistuksen jälkeen tulostamisen aloittaminen viivästy noin 15 minuutilla ja aluksi letkun läpi ei ajettu riittävästi löystytettyä massaa ulos. Näistä kahdesta seikasta johtuen massa ei tullut letkusta läpi ja asiaa koitettiin korjata nostamalla pumpun kierrosnopeutta. Massa ei edelleenkään tullut letkusta läpi ja pumpun lämpötila nousi. Lämpötilan noususta johtuen letkun alkupäässä ja pumpussa oleva massa alkoi kovettua erittäin nopeasti. Letku irrotettiin pumpusta ja todettiin massan kovettuneen letkuun siten, että massaa ei saatu letkusta irti enää mitenkään. Syöttökaukalossa oleva massa poistettiin ja siihen lisättiin vettä noin 2 desilitraa ja sekoitettiin. Pumppu puhdistettiin ja letku vaihdettiin. Letkun vaihtamisen jälkeen siitä pumpattiin läpi riittävästi löystytettyä massaa läpi ja laitettiin sekoitettu massa takaisin syöttökaukaloon. Näiden toimenpiteiden jälkeen tulostaminen onnistui erinomaisesti. Kuviossa 25 tällä tulostuskerralla syntyneestä m-kirjaimesta. Tästäkin tulostetusta massasta valmistettiin kaksi koekuutiota ja näiden puristustulokset olivat yhden vuorokauden iässä 16,7 MPa (nimellä T2.1) ja seitsemän vuorokauden iässä 36,1 MPa (nimellä T2.2).



Kuvio 25. Sementittömällä reseptillä 64 tulostettu m-kirjain (Kalle Jaakkola)

## 5 Pohdintaa

Reseptin kehittäminen uusilla ainesosilla vaati runsasta kokeilua erilaisilla yhdistelmillä ja virheiden kautta oppimista. Olennaisimpana osana kehitystyötä oli löytää pohjaksi toimiva sementillinen resepti ja tästä lähteä korvaamaan sementtiä muilla aineilla ja verrata tuloksia keskenään. Huonommat tulokset antoivat viitettä käytettävän aineen mahdollisesta käytettävyydestä sellaisenaan sementin tilalla ja tietoa siitä, että muitakin ainesosia ja näiden suhteita tulee muuttaa, kun sementtiä korvataan. Esimerkkinä tästä oli masuunikuona, joka ei yksin toiminut sideaineena veden kanssa, vaan tämän aktivointiin tarvittiin alkaliaktivaattori. Alkaliaktivaattorin määrä suhteessa sideaineeseen sekä natriumhydroksidin ja vesilasin seossuhde vaikuttivat taasen oleellisesti kovettumisreaktion nopeuteen.

Luotettavuus kehittämistoiminnassa tarkoittaa lähinnä käyttökelpoisuutta eli syntyvän tiedon tulee olla hyödyllistä. Tuotettavan tiedon tulee kuitenkin olla myös luotettavaa ja tämän keskeinen osa on toistettavuus. Tulosten tulee olla samanlaisella tutkimusasetelmalla toistettaessa yhden-suuntaisia, jolloin voidaan varmistua tulosten luotettavuudesta. (Toikko & Rantanen 2009, 121–

122.) Kokeet ovat toistettavissa, koska reseptit on ilmoitettu työssä. Kuitenkin tässä työssä koekappaleiden määrät olivat pieniä ja testejä ei toistettu uudelleen, kuin reseptin 64 osalta 3D-tulostuksen yhteydessä.

Koesarjat toteutettiin pienillä määrillä, jotta erilaisten ainesosien ja niiden seossuhteiden toimivuutta pystyttiin nopeasti kokeilemaan. Useammalla sekoituserällä samasta reseptistä useampia koekappaleita valmistamalla saisi tilastollisesti merkittävämpiä tuloksia, mutta tämä olisi vaatinut enemmän resursseja. Työn tarkoituksena ei ollut tuottaa suoraan kaupalliseen käyttöön valmista tuotetta, vaan etsiä käyttömahdollisuuksia vaihtoehtoisille materiaaleille, joten pienemmät koeerät toimivat paremmin tässä yhteydessä. Jatkokehityksessä isommilla koekappale-erillä ja laajemmalla ikäskaalalla testaamisella saataisiin paremmin tietoa reseptin käyttäytymisestä. Lisäksi muitakin testejä, kuin puristuslujuutta on syytä testata, kuten esimerkiksi säänkestävyys pitkällä aikavälillä.

Korkein valmistettu tuloste oli 19–kerroksinen, eli noin 19,5 cm korkea. Tämä ei ole suuri korkeus ja käytännön rakenteita ajatellen korkeampia tulosteita tulisi kokeilla, jotta saataisiin selville, kuinka korkeita rakenteita voidaan kerralla tulostaa.

Tässä työssä tehdyissä kokeissa runkoaineena käytettiin alle 2 millimetrin kokoista raekokoa, jolloin esimerkiksi Arvo Nykäsen kehittämää suhteitusmenetelmää ei voitu hyödyntää, koska esimerkiksi kiviaineksen ylänimellisrajalle pienin arvo on 8 mm. Raekokoa rajoitti käytetyn pumpun suurin sallittu maksimiraekoko, joka oli 2 millimetriä. Jatkokehityksen kannalta tulisi runkoaineena kokeilla isomman raekoon omaavaa ainesta ja tämän käyttäytymistä 3D-tulostuksessa. Tällöin massasta saataisiin enemmän betonin kaltaista materiaalia, kun nyt koostumus vastaa lähinnä laastia.

Soodasakan ja biopohjaisen lentotuhkan lisääminen seokseen nosti vedentarvetta huomattavasti ja tämä vaikutti negatiivisesti vesi/sideaine –suhteeseen, eli suhdeluku kasvoi. Vettä jouduttiin lisäämään, koska muutoin massa olisi ollut liian jähmeätä letkun läpi pumpattavaksi, eikä massa pysynyt yhtenäisenä tulosteena. Veden lisäämisen sijaan voisi kokeilla erilaisten notkistavien aineiden vaikutusta massan notkeuden lisäämiseksi, jolloin vesi/sideaine –suhde pysyisi halutuissa rajoissa ja tällä ei olisi koekappaleiden puristuslujuuteen alentavaa vaikutusta.

Opinnäytetyötä tehdessä on noudatettu hyvää tieteellistä käytäntöä. Muiden tutkimustuloksia hyödynnettäessä on kyseiseen lähteeseen viitattu. Käytetyt lähteet ovat verkkohauilla vapaasti saatavilla. Tulokset on ilmoitettu sellaisenaan, eikä näitä ole vääristelty ja nämä ovat toistettavissa ilmoitettujen reseptien perusteella.

## 6 Johtopäätökset

Testien perusteella voidaan todeta olevan mahdollista korvata sementti sideaineena 3D-tulostettavassa massassa. Pitkäaikaisen keston toteamiseksi vaaditaan kuitenkin lisätestaamista ja todellisen kaltaisten rakenteiden tekemistä, joista käytännön käyttökelpoisuus voidaan todeta. Syntyneitä toimivaa 3D-tulostettavaa reseptiä ei testattu muilta ominaisuuksiltaan kuin puristuslujuudeltaan ja tulostuvuudeltaan suhteellisen pienikokoisessa mittakaavassa. Tämän vuoksi luotettavuus kaikilta ominaisuuksiltaan ja isommassa mittakaavassa toteutettuna on toteennäyttämättä. Erilaisten teollisuuden sivu- ja jätevirtojen hyödyntäminen 3D-tulostettavassa betoninkaltaisessa geopolymeerissa vaatii vielä lisätestejä ja kehittämistä, mutta tässä työssä saadut tulokset antavat suuntaa mahdollisuudesta näiden hyödyntämisessä tulevaisuudessa sementin ja hienoaineksen korvikkeena.

## Lähteet

- Adesanya, E., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Finnilä, M. & Illikainen, M. 2023. Utilization of green liquor dreg in lightweight aggregates: Effect of texture on physical properties. *Developments in the Built Environment*. Viitattu 11.9.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923001011>.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. M., Adesina, A., Isleem, H. F. & Zeyad, A. M. 2021. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*. Viitattu 8.9.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002485>.
- Betoni rakennusmateriaalina. N.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 20.9.2023. <https://betoni.com/tieto-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/>.
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z. & Dirrenberg, J. 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. Viitattu 17.11.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>.
- Feng, X., Liu, N. & Lu, X. 2023. Investigation of un-calcined coal gangue together with ground granulated blast furnace slag and fly ash to ambient-curing production high-strength geopolymer. *Journal of Materials Research and Technology*. Viitattu 8.9.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423014989>.
- Hydrataatio. N.d. Betonitieto. Viitattu 8.9.2023. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/hydrataatio.html>.
- Masuunikuona. N.d. Betonitieto. Viitattu 8.11.2023. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/masuunikuona.html>.
- Nematollahi, B., Vijay, P., Sanjayan, J., Nazari, A., Xia, M., Nerella, V. N. & Mechtcherine, V. 2018. Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction. Viitattu 9.11.2023. [https://www.researchgate.net/publication/329124755\\_Effect\\_of\\_Polypropylene\\_Fibre\\_Addition\\_on\\_Properties\\_of\\_Geopolymers\\_Made\\_by\\_3D\\_Printing\\_for\\_Digital\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/329124755_Effect_of_Polypropylene_Fibre_Addition_on_Properties_of_Geopolymers_Made_by_3D_Printing_for_Digital_Construction).
- Puristuslujuuden määrittäminen. N.d. Labroc. Viitattu 8.9.2023. <https://labroc.fi/puristuslujuuden-maaritys/>.
- Rasmus, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P. & Illikainen, M. 2023. Effect of green liquor dregs as an alkali source for alkali-activated blast furnace slag mortar. *Case Studies in Construction Materials*. Viitattu 11.9.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523001298>.
- Skinner, B. & Lalit, R. 2023. Concrete: 8% of global emissions and rising. Which innovations can achieve net zero by 2050? *Energy Post* 24.1.2023. Viitattu 20.9.2023. <https://energy.post.eu/concrete-8-of-global-emissions-and-rising-which-innovations-can-achieve-net-zero-by-2050/>.

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. Tampere: Tampereen yliopistopaino, 18–23, 39, 49–50. Viitattu 29.9.2023. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/100802>.

Törmänen, E. 2022. Suomalaisyritys kehitti omalaatuisen menetelmän betonin 3d-tulostukseen. Säästää materiaalia 66 % – Katso kuvat lopputuloksesta. Tekniikka & Talous 10.11.2022. Viitattu 20.9.2023. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomalaisyritys-kehitti-omalaatuisen-menetel-man-betonin-3d-tulostukseen-saastaa-materiaalia-66-katso-kuvat-lopputuloksesta/3a480e4b-d779-46a4-921e-e5118a58ea8a>.

Töyssy, S. 2016. Olomuodoltaan hankala soodasakka on pulmallinen kierrätettävä. UPM 14.12.2016. Viitattu 11.9.2023. <https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2016/12/olomuodoltaan-hankala-soodasakka-on-pulmallinen-kierratettava/>.

UNEP 2022. Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland. Viitattu 17.11.2023. <https://www.unep.org/resources/report/sand-and-sustainability-10-strategic-recommendations-avert-crisis>.

Watari, T., Cao, Z., Serrenho, A. C. & Cullen, J. 2023. Growing role of concrete in sand and climate crises. iScience. Viitattu 17.11.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223008593>.

## Liitteet

### Liite 1. Koekappaleiden puristusikä, tiheys ja puristustulos

Koekappale	Ikä	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Puristuslujuus (Mpa)	SFS 7022:2019 mukainen puristuslujuus
33	7 vrk	2202	50,0	48,6
34	28 vrk	2217	56,6	54,9
35	7 vrk	2192	38,8	37,7
36	28 vrk	2208	54,2	52,7
37	7 vrk	2163	32,1	31,1
38	28 vrk	2190	46,2	44,9
39	7 vrk	2054	23,8	23,1
40	28 vrk	2064	32,3	31,3
41	7 vrk	2037	11,4	11,1
42	28 vrk	2052	32,6	31,6
43	7 vrk	2101	24,9	24,2
44	28 vrk	2127	26,6	25,8
45	7 vrk	2128	13,7	13,3
46	28 vrk	2119	36,3	35,2
47	7 vrk	2137	2,3	2,2
48	28 vrk	2147	38,1	37,0
49	7 vrk	2135	1,3	1,3
50	28 vrk	2138	34,3	33,3
51	1 vrk	2233	22,1	21,5
52	28 vrk	2245	64,8	62,9
53	1 vrk	2230	27,2	26,4
54	1 vrk	2182	19,9	19,3
55	28 vrk	2193	79,9	77,6
56	1 vrk	1943	5,7	5,5
57	28 vrk	1952	14,5	14,1
60	1 vrk	-	12,4	12,0
61	38 vrk	-	17,3	16,8
62	1 vrk	2160	22,6	21,9
63	1 vrk	2150	21,0	20,4
64	1 vrk	2143	22,3	21,6
65	36 vrk	2155	53,8	52,3
T1.1	1 vrk	2135	15,7	15,2
T1.2	7 vrk	2122	30,9	30,0
T2.1	1 vrk	2116	16,7	16,2
T2.2	7 vrk	2163	36,1	35,0