

Opinnäytetyö (AMK)

Tuotantotalous

2024

Hannes Mattsson

VAIHTOEHTOISTEN MATERIAALIEN KÄYTTÖ KUIVATUOTETEHTAAN PROSESSISSA

- Saint-Gobain Finland Oy

Hannes Mattsson

VAIHTOEHTOISTEN MATERIAALIEN KÄYTTÖ KUIVATUOTETEHTAAN PROSESSISSA

- Saint-Gobain Finland Oy

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin kiertotaloussiilosto ja teräsrakenne Saint-Gobain Finlandille. Projekti toteutettiin taloudellisena investointina ja osana kiertotalouteen siirtymistä. Korvaamalla neitseellisiä sideainesysteemejä terästehtaan senkkakuonalla saavutetaan merkittäviä päästövähennyksiä. Jalostettu kuona korvaa osan raaka-aineista laasteissa ja tasoitteissa. Kuonan avulla edistetään kiertotaloutta ja alennetaan tuotannon hiilijalanjälkeä. Vaihtoehtoisina materiaaleina toimivat senkkakuona ja kivimurske kuljetetaan tehtaalte ja varastoidaan suunniteltuihin siiloihin, joista ne annostellaan tuotantoon.

Projektin tutkimusongelmana on kiertotalousmateriaalien virtausongelmat siilostossa, sen teräsrakenteen mahdollinen pettäminen ja asentamisen epäonnistuminen. On mahdollista, että jauheen virtaus häiriintyy vääränlaisen suunnittelun seurauksena. On myös mahdollista, että siilostoa ei saada asetettua oikeaan korkeuteen ja ei saada luotua kulkua siiloston hoitotasolle. Yksi suurimmista tutkimusongelmista on teräsrakenteen kestävyys ja mitoitus, jotta se saadaan sovitettua tehtaan kylkeen ahtaassa ympäristössä. On mahdollista, että tilanpuutteen vuoksi riittävän kestävä teräsrakenne ja syöttölaitteisto ei saada asennettua. Projektin tutkimuskysymys on siis minkälainen siilosto ja teräsrakenne tarvitaan siiloston toiminnallisuuteen?

Projektissa hyödynnettiin jauheen virtausta simuloivia laitteita laboratorio-olosuhteissa, sekä teräsrakennetta ja sen kestävyttä simuloivia menetelmiä, kuten 3D-laserskannausta, tietokoneavusteista suunnittelua ja tietokoneavusteista lujuuslaskentaa. Siilosten mitat määriteltiin laboratoriossa testattujen jauheen virtausominaisuuksien perusteella. Tehdasympäristö laserskannattiin ja mitat tallennettiin Navisworks Simulate-ohjelmaan. Teräsrakenteesta luotiin prototyyppi Solidworks 2020-ohjelmalla, jota käyttäen siilosto asetettiin oikeaan korkeuteen. Prototyypille suoritettiin lujuuslaskenta Comsol Multiphysics 5.4-ohjelmalla ja tehtiin tarvittavat muutostyömenpiteet.

Tulokseksi saatiin mitoitukseltaan toimiva siilosto ja lujuuslaskennassa kestäväksi ääriolosuhteissa todettu teräsrakenne. Siilostoa ja teräsrakennetta voidaan hyödyntää mallina vastaavanlaisissa projekteissa, joissa siilosto liitetään tehtäseen tiettyyn korkeuteen.

ASIASANAT:

Kiertotalous, kuona, jauheet, siilot, teräsrakenteet, tietokoneavusteinen suunnittelu, lujuusoppi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Industrial management

2024 | 55 pages

Hannes Mattsson

USE OF ALTERNATIVE MATERIALS IN THE DRY MIX PRODUCT PLANT PROCESS

- Saint-Gobain Finland Oy

In this thesis, a circular economy silo and steel structure were designed for Saint-Gobain Finland. The project was implemented as a financial investment and as part of the transition to a circular economy. By replacing virgin binder systems in the steel plant with ladle slag significant emissions reductions can be achieved. The processed slag replaces part of the raw materials in mortars and plaster. The use of slag promotes the circular economy and reduces the carbon footprint of production. Alternative materials, such as ladle slag and crushed stone, are transported to the factory and stored in designated silos, from which they are dosed into production.

The research problem of the project is the flow issues of circular economy materials in the silo, the potential failure of its steel structure, and the risk of installation failure. There is a possibility that the flow of the powder will be disrupted due to improper design. It is also possible that the silo cannot be positioned at the correct height, preventing access to the maintenance levels of the silo. One of the main research issues is the durability and sizing of the steel structure to fit into the factory's tight environment. Due to space constraints, it may not be possible to install a sufficiently durable steel structure and feeding equipment. Therefore, the research question of the project is: what kind of silo and steel structure are necessary for the functionality of the silo?

The project utilized devices that simulate powder flow in laboratory conditions, as well as methods that simulate the steel structure and its durability, such as 3D laser scanning, computer-aided design, and computer-aided strength calculation. The dimensions of the silos were defined based on the flow characteristics of the powders tested in the laboratory. The factory environment was laser scanned, and the measurements were recorded in Navisworks Simulate software. A prototype of the steel structure was created using Solidworks 2020, which was then used to position the silo at the correct height. A strength calculation was performed on the prototype using Comsol Multiphysics 5.4 software, and the necessary modifications were made.

As a result, a functional silo and a steel structure that was found to be durable under extreme conditions were obtained. The silo and steel structure can serve as a model in similar projects where the silo is connected to a factory at a specific height.

KEYWORDS:

Circular economy, slag, powders, silos, steel constructions, computer-aided design, strength theory

SISÄLTÖ

JOHDANTO	1
2 KIERTOTALOUS	3
2.1 Mitä kiertotalous on?	3
2.2 Miksi kiertotaloutta tarvitaan?	5
2.3 Kiertotalouden strateginen ohjelma ja indikaattorit	8
2.4 Teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen	12
2.5 Terästehtaan senkkakuona vaihtoehtoisena materiaalina	14
3 KIERTOTALOUSSILOJEN SUUNNITTELU	16
3.1 Siilosuunnittelu	16
3.2 Jauheen raejakauman mittaukseen käytettävät menetelmät	18
3.3 Jauheen virtausominaisuuksien mittaukseen käytettävät menetelmät	19
3.4 Teräsrakennesuunnittelussa käytettävät menetelmät	22
3.5 Lujuustarkastelussa käytettävät menetelmät	26
4 TUTKIMUSASETELMAN JA MENETELMIEN VALINTA	28
4.1 Tutkimusasetelma	28
4.2 Tutkimusmenetelmien valinta	28
4.3 Prosessi	29
5 KUONAJAUHEEN JA KIVIMURSKKEEN MITTAUS JA TULOKSET	31
5.1 Kuonan mittaus ja tulokset Camsizer XT:llä	31
5.2 Kuonan ja betonimurskeen mittaus ja tulokset Powder Flow Testerillä	32
5.3 Tulosten hyödyntäminen siilosuunnittelussa	35
6 TERÄSRAKENNESUUNNITTELU	36
6.1 Lähtötiedot	36
6.2 Suunnittelun eteneminen	38
7 PROJEKTIN LOPPUTULOS	52
LÄHTEET	53

KUVIOT

Kuvio 1. Kiertotalous (mukaillen Euroopan Parlamentti 2023).	4
Kuvio 2. Lineaaritalous (mukaillen Kiertotalousosaamiskeskus 2024).	5
Kuvio 3. Toiminnot ja indikaattorit (mukaillen Tilastokeskus indikaattorit 2024).	9
Kuvio 4. Materiaalien kiertotalousaste 2013-2020 (Kaariaho & Pirtonen 2022).	11
Kuvio 5. Senkkakuona teräksen jalostusprosessissa (Saint-Gobain Finland 2024).	15
Kuvio 6. Ydinvirtaus ja massavirtaus (mukaillen Bulk Solids Portal 2020).	17
Kuvio 7. Jauheen murtumistesti (mukaillen Operating Instructions Manual, 38).	20
Kuvio 8. Jauheen virtaavuus (mukaillen Operating Instructions Manual, 39).	21
Kuvio 9. Laboratoriomittauksen tulokset Camsizer XT:llä.	31
Kuvio 10. Laboratoriomittauksen tulokset Powder Flow Testerillä.	32
Kuvio 11. Jauheen virtaavuus (mukaillen Operating Instructions Manual, 39).	33
Kuvio 12. Laboratoriomittauksen tulokset Powder Flow Testerillä.	34
Kuvio 13. Siilon mitat Solidworks 2020-ohjelmassa.	35

KUVAT

Kuva 1. Ensimmäisiä Solidworks-kokoonpanoja siiloista ja teräsrakenteesta.	38
Kuva 2. Tehtaan laserskannauksesta saatu pistepilvi Navisworks-ohjelmassa.	39
Kuva 3. Ruuvikuljettimien asettelu.	39
Kuva 4. Välipalkit Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	40
Kuva 5. Yläkulman vinopalkki Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	41
Kuva 6. Teräsrakenteen Solidworks-kokoonpano välivaiheessa.	42
Kuva 7. X-suuntainen tuuli Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	43
Kuva 8. Y-suuntainen tuuli Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	44
Kuva 9. Tukipalkki Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	45
Kuva 10. Tukipalkit Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	46
Kuva 11. Teräsrakenteen katto Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	47
Kuva 12. Teräsrakenteen etukulma Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.	47
Kuva 13. Päivitetty Solidworks-kokoonpano teräsrakenteesta.	48
Kuva 14. Teräsrakenteen lopullinen Solidworks-kokoonpano.	49
Kuva 15. Valmis teräsrakenne Navisworks-ohjelmassa.	50
Kuva 16. Valmis teräsrakenne Navisworks-ohjelmassa.	51

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on silosuunnittelu vaihtoehtoisille materiaaleille kuivatutehtaaseen. Toimeksiantajana on Saint-Gobain Finland Oy. Uusien materiaalien käyttöönotto on osana kiertotalouteen siirtymistä, jonka tavoitteena on minimoida materiaalien tuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Kiertotalous on tärkeää ja ajankohtaista, koska siitä toivotaan ratkaisua neitseellisten raaka-aineiden ylikulutukseen, ilmastomuutokseen ja luontokatoon. Ongelman ratkaisuksi haetaan laajaa järjestelmätason muutosta. Yhteiskunnassa pyritään siirtymään pois lineaarisesta talousmallista ja siirtymään kiertotalouteen. Sen edistämiseksi suuri potentiaali on teollisten sivuvirtojen paremmassa hyödyntämisessä. Ottamalla käyttöön sivuvirtoja odotetaan ilmastohyötyjen moninkertaistuvan. Suuria sivuvirtoja on löydettävissä teollisen tuotannon jätteistä ja niitä voidaan hyödyntää ilmaston, sekä talouden kannalta edullisesti.

Tehtävänä on suunnitella ja mitoittaa vaihtoehtoisten materiaalien varastointi ja syöttölaitteisto Saint-Gobain Finland/Weberin Kiikalan kuivatutehtaalle. Tarkoituksena on parantaa tehtaan ekologisuutta ja kannattavuutta lisäämällä vaihtoehtoisia materiaaleja tuotantoon. Vaihtoehtoisilla materiaaleilla voidaan korvata esimerkiksi kvartsipitoista hiekkaa tai niitä voidaan käyttää sideaineena. Uudet laitteet liitetään olemassa olevaan prosessiin. Vaihtoehtoinen materiaali jalostetaan muualla ja kuljetetaan säiliöautolla tehtaalle. Laadun varmistus tapahtuu vaihtoehtoista materiaalia tuottavalla tehtaalla. Erityisen huomion alla tulee olemaan materiaalin tasalaatuisuus. Vaihtoehtoisena materiaalina voivat olla muun muassa terästehtaan kuona ja murskattu kivi. Kuonapohjaisella sideaineella saavutetaan erinomainen päästövähennys korvaten neitseellisiin raaka-aineisiin perustuvia perinteisiä sementtipohjaisia sideainesysteemejä. Laitosinvestointi tukee suoraan kiertotalouden tavoitteita ja kiertotalouden strategista edistämishjelmaa, sekä valtakunnallista jätesuunnitelmaa.

Nykyinen laitteisto on riittämätön kiertotalousmateriaalien käyttöönotolle, koska niille ei ole toimivaa silostoa ja syöttöjärjestelmää. Jotta vaihtoehtoisia materiaaleja voidaan käyttää, tulee silojen määrää lisätä. Silojen asennus liitetään tehtaan rakenteisiin. Opinnäytetyön tarkoituksena on mitoittaa ja suunnitella silosto ja annostelulaitteet liitetynä olemassa olevaan prosessiin. Jauheen virtausominaisuudet selvitetään Camsizer- ja Powder Flow Tester-mittalaitteilla, joiden perusteella mitoitetaan silosto. Suunnitteluun liittyy myös teräsrakenteiden mitoitus- ja lujuustarkastelu. Myös raaka-aineiden

siirto- ja annostelulaitteet tulee suunnitella ja mitoittaa. Tehdasympäristö skannataan suunnittelun lähtötietojen selvittämiseksi. Tämä jälkeen siilot ja niiden teräsrakenne mallinnetaan prototyyppi prosessiympäristöön. Prototyypille suoritetaan lujoustarkastelu ja siihen tehdään tarvittavat muutostoimenpiteet.

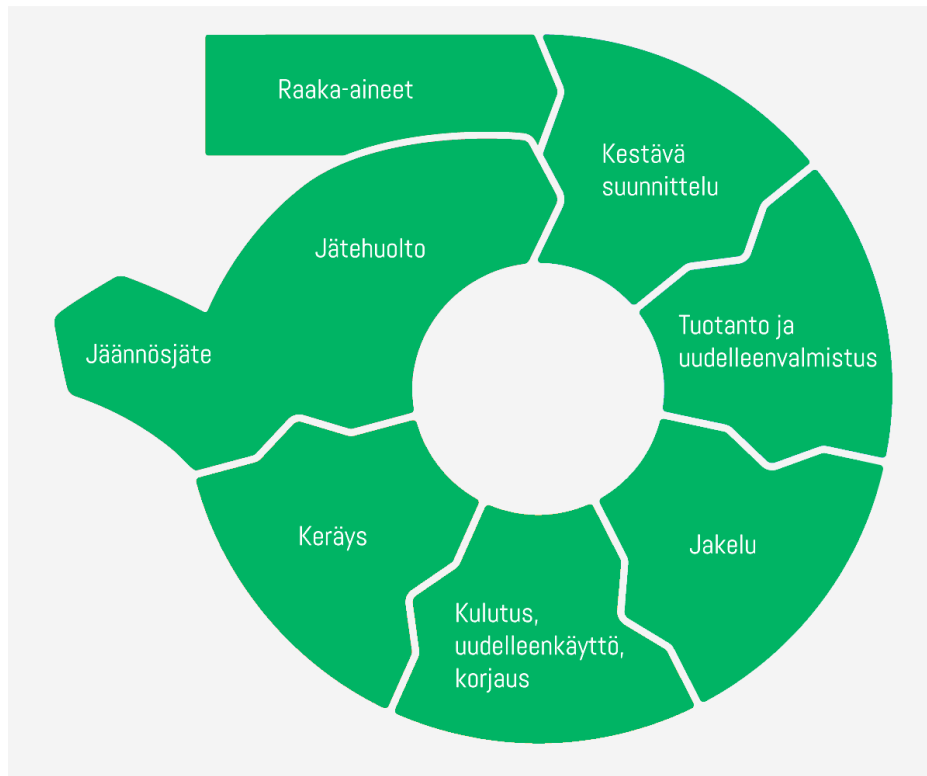
Projektin onnistumisella on suuri hyötynäkökulma. Sen onnistumisesta on taloudellista hyötyä Saint-Gobain Finlandille. Se edistää myös kiertotaloutta Suomessa ja EU:ssa. Suunniteltuja siiloja ja teräsrakennetta voidaan käyttää mallina vastaavanlaisissa projekteissa, joissa siilot tulee asentaa määrättyyn korkeuteen.

2 KIERTOTALOUS

2.1 Mitä kiertotalous on?

Kiertotalous on kulutusmalli, jossa tuotteiden elinkaari pitenee. Materiaaleja ja tuotteita käytetään uudelleen mahdollisimman pitkään. Kierrätys, korjaus, kunnostus, uudelleenkäyttö, lainaus ja vuokraus pidentävät tuotteen elinkaarta. Tuotteen saapuessa elinkaarensa päähän, sen materiaalit käytetään uudelleen. Näin materiaalit luovat lisäarvoa. Kun jätteen määrä minimoidaan, pystytään materiaalista uudelleenkäyttämään suurempi osuus. (Euroopan parlamentti 2023.)

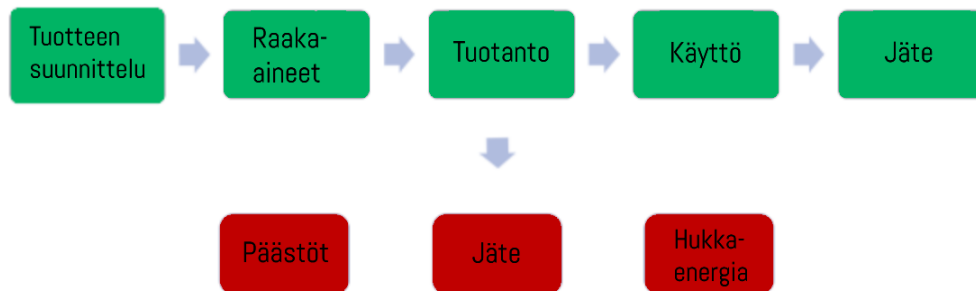
Kiertotaloudella tarkoitetaan talousmallia, joka vaikuttaa globaaleihin ongelmiin, kuten ilmastokriisiin, luontokatoon ja luonnonvarojen ylikulutukseen. Kiertotalouden avulla saadaan taloudellista hyötyä ja hyvinvointia ottamalla huomioon maapallon kantokyky. Kiertotalouden tavoitteena on talouskasvun kytkeminen irti neitseellisten luonnonvarojen käytöstä. Pitämällä resurssit, tuotteet ja materiaalit mahdollisimman pitkään talouden käytössä vähennetään neitseellisten luonnonvarojen kulutusta. Kuviossa 1 jätteen syntä vähennetään säilyttämällä resurssien arvo kierrosta toiseen. (Kiertotalous-Suomi 2024.)



Kuvio 1. Kiertotalous (mukaillen Euroopan Parlamentti 2023).

Kiertotaloutta pidetään laajana järjestelmätason ratkaisuna, jonka avulla torjutaan haasteita globaalilla tasolla. Haasteita ovat luontokato, jätteet, saastuminen ja ilmastonmuutos. Kiertotalouden suunnitteluperiaatteita ovat resurssien kierrättäminen, ympäristön elvyttäminen ja jätteiden ja saasteiden poistaminen. (Tilastokeskus 2024.)

Lineaaritalous



Kuvio 2. Lineaaritalous (mukaillen Kiertotalousosaamiskeskus 2024).

Kuviossa 2 näkyvää lineaarista talouden mallia voidaan pitää kierrätöksen vastakohtana. Lineaarisisessa talouden mallissa tuotteet heitetään pois valmistamisen ja kuluttamisen jälkeen. Tuotannon ja kuluttamisen tarpeet tyydytetään luonnonvaroilla kertaluontoisesti. Tämä vaatii suurta määrää halpoja raaka-aineita ja energiaa. Tuotteiden suunnittelulla vanhenemisella tarkoitetaan tuotteen käyttöiän tarkoituksellista rajaamista. Tämän on tarkoitus johtaa uuden tuotteen ostoon vanhan tilalle. Euroopan parlamentti toimii kyseistä käytäntöä vastaan. (Euroopan parlamentti 2023; Kiertotalousosaamiskeskus 2024.)

2.2 Mihin kierrätöksen tarvitaan?

Raaka-aineiden ja muiden resurssien kysyntä lisääntyy maailman väestönkasvun seurauksena. Raaka-aineiden määrä on kuitenkin rajallinen. EU:n kannalta tämä tarkoittaa tuontiriippuvuutta. Jotkin EU-maat saavat tarvitsemansa raaka-aineet muista maista. Ympäristöön kohdistuu suuri vaikutus raaka-aineiden louhinnasta ja käytöstä. Hiilidioksidipäästöt ja energiankulutus lisääntyvät. Hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää raaka-aineiden suunnitelmallisella käytöllä. Vuosittaisia kasvihuonekaasupäästöjä pystytään vähentämään jätteen syntymisen ehkäisemisellä, ekosuunnittelulla ja käyttämällä materiaaleja uudelleen. Tämä voi mahdollisesti tuoda EU:n yrityksille säästöjä. 45 prosenttia hiilidioksidipäästöistä johtuu käytettävien materiaalien tuotannosta. Siirtymällä

kiertotalouteen vuoteen 2030 mennessä voidaan EU:n sisällä saavuttaa 700000 uutta työpaikkaa. Myös ympäristön kuormitus vähenee, raaka-aineiden toimintavarmuus nousee, kilpailukyky lisääntyy, innovointi tehostuu ja talouskasvun odotetaan lisääntyvän 0,5 prosenttia bruttokansantuotteesta. Kuluttajat hyötyvät kiertotalouteen siirtymisestä. Tarjolla on parempi elämänlaatu ja edullisemmat ja kestävämmät tuotteet. (Euroopan parlamentti 2023.)

Kiertotaloudesta toivotaan ratkaisua neitseellisten raaka-aineiden ylikulutukseen, ilmastomuutokseen ja luontokatoon. Tarvitaan laaja järjestelmätason muutos, jotta ongelma saadaan ratkaistua. Perinteisestä lineaarisesta talousmallista siirytään kiertotalouteen kaikkialla yhteiskunnassa ja sen osa-alueilla. Hyödyt ovat sosiaalisia, ekologisia ja taloudellisia. Kiertotalouden kierrossa säilytetään mahdollisimman pitkään tavaroiden ja materiaalien arvo. Jätettä syntyy vähemmän ja luonnonvarojen kulutus pienenee valmistettaessa uusia tuotteita. (Tilastokeskus 2024.)

EU:n tavoitteena on siirtyä kiertotalouteen, jotta Euroopasta tulisi puhtaampi ja kilpailukykyisempi. Maapalloja on vain yksi, mutta vuonna 2050 maailma kuluttaa kolmen maapallon verran. Kiertotalouteen siirtyminen vähentää luonnonvaroihin kohdistuvaa painetta. Kestävä kasvu ja työpaikat ovat tarpeen EU:n vuoden 2050 ilmastoneutraaliustavoitteen saavuttamiseksi. Luonnon monimuotoisuuden köyhtyminen tulee pysäyttää. Resurssien kulutus on pidettävä planeetan rajoissa. Siirtyminen regeneratiiviseen kasvumalliin on välttämätöntä lineaarisen mallin sijaan. Niukkoihin luonnonvaroihin kohdistuu jatkuva tarve. Lineaarinen talous lisää tätä tarvetta. Kiertotalouden tavalla kuluttamalla on mahdollista minimoida taloudellisen toiminnan vaikutukset ympäristöön. (Euroopan komissio 2024.)

Jopa 90% luonnon monimuotoisuuden köyhtymisestä johtuu luonnonvarojen hyödyntämisestä ja jalostamisesta. 80% tuotteiden ympäristövaikutuksista määritetään suunnitteluvaiheessa. EU:ssa kiertotaloudessa olevien materiaalien määrä on 11,8%. Kiertotalous auttaa suojelemaan Euroopan luonnonvaroja ja edistämään kestävästä kasvusta. Euroopan unioni tulee kaksinkertaistamaan kiertotalouteen perustuvan materiaalien käytöasteensa seuraavan vuosikymmenen aikana. Kiertotalous vähentää päästöjä, jotta EU:sta tulee ensimmäinen ilmastoneutraali maanos. Luodaan uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja paikallisia työpaikkoja. Tavoitteena on myös mahdollistaa kestävämmät arvoketjut, mahdollistaa terveempi planeetta ja vähentää saastumista ja vähentää luonnonvaroihin kohdistuvia paineita. (Euroopan komissio 2024.)

Kasvanut talous ja raaka-aineiden kulutus on johtanut materiaalin ja energian tuontiriippuvuuteen. EU on tuonut noin 30% kaikista resursseista. Noin 42% maakaasusta, 56% hiilestä, 88% öljystä, 50% kuparista ja 89% raudasta ovat peräisin tuonnista. Toinen seuraamus kasvaneesta kulutuksesta on kasvanut jätteen määrä. Ainoastaan EU:n sisällä vuonna 2016 syntyi 1,8 tonnia jätettä asukasta kohti. Jättemäärät ovat haaste, mutta myös tilaisuus ratkaista erityisesti energian tuotantoon liittyviä ongelmia. Kierrättäminen on osoittautunut oikeaksi ratkaisuksi jätteiden kieltämisen sijaan. (Ragossnig & Schneider 2019.)

Tärkeästä roolista huolimatta Euroopan taloudessa teollisella toiminnalla on merkittäviä kielteisiä ympäristövaikutuksia. Huomattava osa kaikista epäpuhtauspäästöistä on suurimpien teollisuuslaitosten aiheuttamia. Ongelmana on myös niiden jätteentuotto ja suuri energiankulutus. Päästöt vaikuttavat veteen ja maaperään, ekosysteemit ja viljelykasvit vahingoittuvat ja rakennettu ympäristö joutuu uhan alle. EU:n laajuista lainsäädäntöä sovelletaan myös teollisuuslaitosten ympäristö- ja terveysvaikutuksiin. Lähes puolet kokonaispäästöistä on peräisin teollisesta toiminnasta. EU:n nykyisten sääntöjen soveltamisalaan kuuluvia teollisuuslaitoksia on yli 50000. EU:n tavoitteena on teollisen toiminnan aiheuttamien päästöjen sääntely, niiden ympäristövaikutusten vähentäminen, päästöjen haitallisten vaikutusten tietoisuuden lisääminen, vihreämmän teollisuuden edistäminen ja ehkäistä vaarallisten aineiden aiheuttamia suuronnettomuuksia. (European Environment Agency 2024.)

Teolliset prosessit saastuttavat vettä, ilmaa ja maata, sekä ihmisten terveyttä ja ympäristöä. Usein syynä ovat typen oksidi-, ammoniakki-, elohopea- ja hiilidioksidipäästöt. Saasteita ympäristöön aiheuttavat sementin valmistus, eläintuotanto, sähkön tuottaminen, jätteiden käsittely ja jätehuolto. Tästä seuraa terveysongelmia, kuten sydämen vajaatoimintaa, syöpää, astmaa ja keuhkoputkentulehduksia. Joka vuosi päästöt ovat syynä tuhansiin ennenaikaisiin kuolemiin. Teollisuuden päästöistä aiheutuvaa vahinkoa on arvioitu. Terveyteen ja ympäristöön kohdistuvat vahingot ovat 277-433 miljardia euroa vuodessa. Teollisuuspäästöjä torjutaan EU:n vahvistamalla säännöillä. Tärkein direktiivi on teollisuuden päästädirektiivi, johon kuuluu kiertotalouden käytäntöjen edistämiseksi myös suurimpien teollisuuslaitosten päästöjen ehkäiseminen, resurssien käytön minimointi, prosessien tehostaminen ja jätteiden syntymisen ehkäiseminen ja vähentäminen. (Eurooppa-neuvosto 2024.)

Kiertotaloudessa uudelleenkäyttö ja parempi suunnittelu voivat merkittävästi alentaa materiaalikustannuksia ja jätteenkäsittelykustannuksia. Kiertotalous vastaa talouden

pitkäaikaisiin haasteisiin, kuten paranneltuun materiaalin käyttöön, innovaatiomahdollisuuksiin ja siirtymistä massatuotannon työvoimasta osaavampaan työvoimaan. Nämä ovat kaikki hyötyjä, jotka parantavat talouden kestävyyttä. Muutoksen jälkeen on myös vaikeampaa siirtyä takaisin lineaariseen talousmalliin. Kiertotalous tarjoaa myös merkittävän hyödyn ilmastonmuutoksen torjumiseen ja itsenäisyyteen fossiilisissa polttoaineissa johtuen pienentyneestä materiaalitarpeesta ja tuotannosta, joka toimii uusiutuvalla energialla. Resurssien kesken loppuminen hidastuu kasvun ja resurssien tarpeen yhteisvaikutuksesta. Yritysten kannalta voittoa tapahtuu rakentamalla uusia kiertotoimintoja ja myös ratkomalla yritysten strategisia ongelmia. Yritykset, jotka tarjoavat kestäviä ratkaisuja saavat lisää kasvumahdollisuuksia. Voittavat yritykset ovat jo siirtyneet tukemaan kiertotaloutta. Uudelleen myymisellä ja komponenttien uudelleen käyttöön otolla voidaan pienentää yrityksen materiaalikustannuksia huomattavasti. (Ellen MacArthur Foundation 2013, 66, 68, 71.)

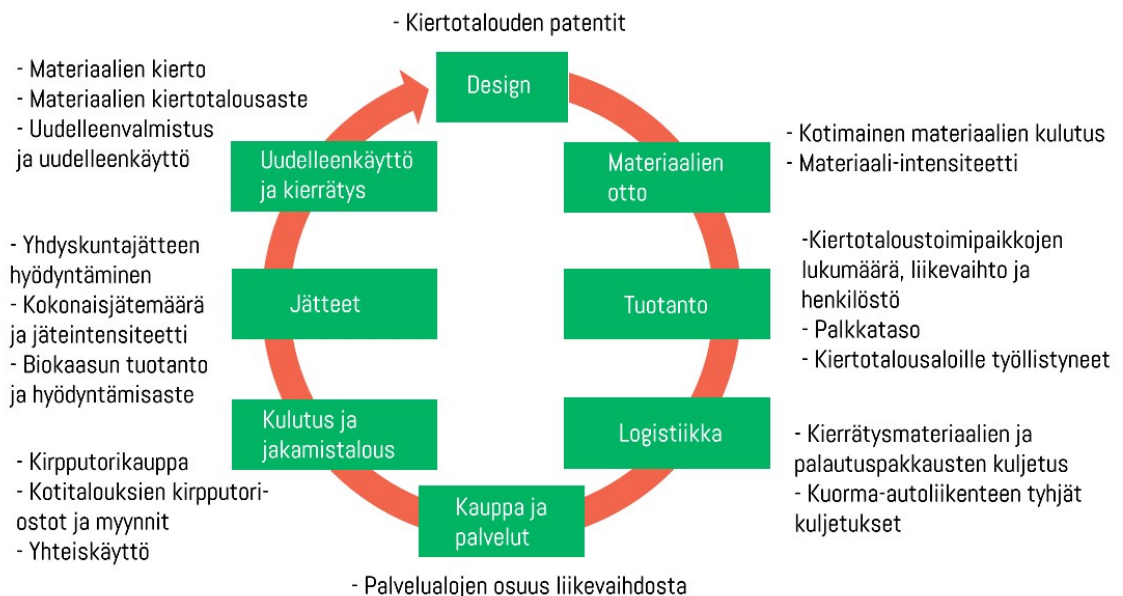
2.3 Kiertotalouden strateginen ohjelma ja indikaattorit

Uusi Uusi kiertotaloutta koskeva toimintasuunnitelma on uuden kestävä kasvun ohjelman tärkeimmistä rakennuspalikoista. Uudessa toimintasuunnitelmassa estetään jätteen syntymistä ja pidetään käytettyjä resursseja EU:n taloudessa mahdollisimman pitkään. Aloitteet kattavat tuotteiden koko elinkaaren kuten sen, miten tuotteet suunnitellaan, edistetään kiertotalouden prosesseja ja kannustetaan kestävään kulutukseen. Uuden toimintasuunnitelman toimenpiteillä pyritään varmistamaan, että jätettä syntyy vähemmän, saada kiertotalous hyödyttämään ihmisiä ja alueita ja johdetaan maailmanlaajuisia kiertotaloustoimia. Kestävästä tuotteista tehdään normi EU:ssa. Kuluttajien ja julkisten ostajien vaikutusmahdollisuuksia lisätään. (Euroopan komissio 2024.)

Kiertotaloutta koskeva toimintasuunnitelma esitettiin maaliskuussa 2020 Euroopan komissiossa. Se sisältää kestävämpää tuotesuunnittelua, jätteen vähentämistä ja kansalaisten vaikutusmahdollisuuksien lisäämistä. Erityishuomion kohteena ovat alat, joissa kulutetaan paljon resursseja, kuten muovit, tekstiilit, rakennusala, tieto- ja viestintätekniikka, sekä elektroniikka. Uusi päätöslauselma hyväksyttiin helmikuussa 2021, jossa lisätään toimia hiilineutraalin, kestävä ja myrkyttömän kiertotalouden saavuttamiseksi ennen vuotta 2050. Vuoteen 2030 mennessä materiaalien kulutukselle tullaan asettamaan sitovia tavoitteita ja kierrätyksen sääntöjä kiristetään. Ensimmäinen toimenpidepaketti julkaistiin maaliskuussa 2022. Tällä pyritään nostamaan vauhtia kohti

kiertotalouteen siirtymistä. Toimenpiteissä voimaannutetaan kuluttajia, tuetaan kestävämpiä tuotteita, päivitetään rakennustuotteita koskeva asetus ja kestäviä tekstiilejä koskeva strategia. Myös uusia sääntöjä esitettiin EU:n pakkauksille. Marraskuun 2022 esityksen tavoitteena parannetaan pakkausten suunnittelua uudelleenkäyttöä varten, pakkausjätettä vähennetään ja kierrätystä edistetään käyttämällä selkeämpiä merkintöjä. Kompostoitavien, biohajoavien ja biopohjaisten muovien käyttöä kannustetaan. (Euroopan parlamentti 2023.)

Suomen hallitusohjelmassa on huomioitu kiertotalouden edistäminen. Suomea tulee edistää kiertotalouden kärkimaana. Ohjelman mukaan talouteen on luotava uusi perusta vuoteen 2035 mennessä. Perustana on kiertotalous, joka noudattaa sen strategista ohjelmaa. Muutoksen aikaansaamiseksi ohjelmaan on asetettu tavoitteet ja kuinka niitä mitataan. Luonnonvarojen absoluuttiselle käytölle on asetettu katto. Suomen kiertotalousohjelma on pantu käytäntöön ensimmäisenä maailmassa. Linjauksiin kuuluu, että vuoden 2035 primääriraaka-aineiden kokonaiskulutus ei saa ylittää vuoden 2015 tasoa. Resurssituottavuuden on kaksinkertaistuttava vuoteen 2035 mennessä verrattuna vuoteen 2015. Myös materiaalien kiertotalousasteen on kaksinkertaistuttava vuoteen 2035 mennessä. Kiertotalousliiketoiminnan indikaattorit on tuotettu Tilastokeskuksessa. Niillä mitataan kiertotalouden edistymistä. (Tilastokeskus 2024.)



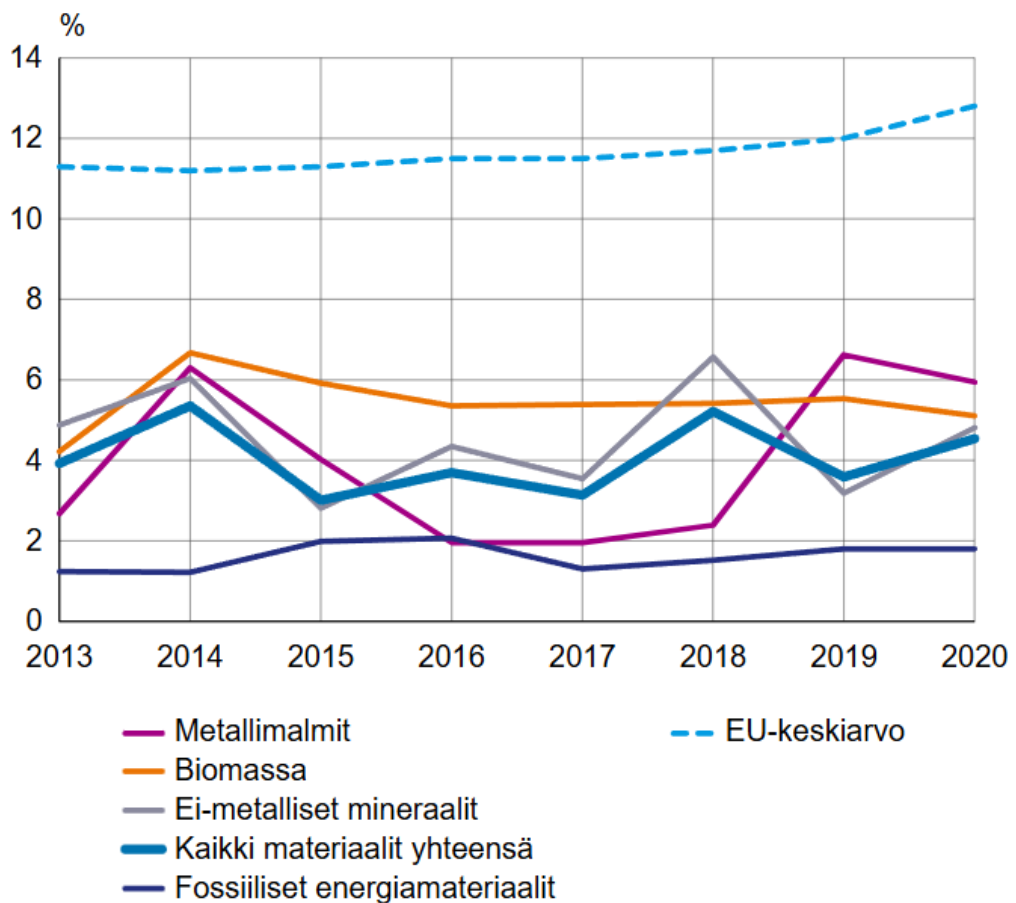
Kuvio 3. Toiminnot ja indikaattorit (mukaiillen Tilastokeskus indikaattorit 2024).

Kiertotalousindikaattoreihin kuuluu kotimainen materiaalien kulutus (DMC, Domestic Material Consumption). Tämä on Tilastokeskuksessa vuosittain julkaistu Materiaalitilinpidon

indikaattori. Ympäristöön kohdistuvia rasitteita kuvataan kotimaisella raaka-aineiden kulutuksella (RMC, Raw Material Consumption). Siinä mitataan raaka-aineiden loppukäyttöä Suomessa ja se sisältää kotimaiset ja tuonnin raaka-aineet. Kaikki tuontiin ja vientiin valmistettujen tuotteiden valmistukseen tarvittu materiaali otetaan huomioon. Resurssi-tuottavuudella tarkoitetaan bruttokansantuotetta, joka jaetaan kotimaisella raaka-aineiden kulutuksella. Kuviossa 3 näkyvällä CMU:lla, Circular Material Use Rate:lla tarkoitetaan materiaalien kiertotalousastetta. Tämä tuotetaan Tilastokeskukselta saaduista tilastoista. Tilastokeskuksen yritysten rakenne- ja tilinpäätöstiedot kertovat liikevaihdon ja yritysten määrän, jotka ovat mukana kiertotaloustoimialoilla. Ekoinnovaatiot kuvaavat EU-jäsenmaiden ekoinnovaatiotoimintaa, joihin kuuluu kuusitoista alaindikaattoria. Alaindikaattoriryhmiä ovat ekoinnovaatiotoiminta, ekoinnovaatiopanokset, ekoinnovaatiotuotokset, resurssitehokkuus ja sosioekonomiset vaikutukset. Alaindikaattorien keskiarvo kertoo indikaattorin arvon. Yksi Eurostatin kiertotalouden seurannan indikaattoreista on innovatiiviset julkiset hankinnat. Yhdyskunta- ja rakennusjätteen määrä tuotetaan osana jätetilastoa. ELY-keskus vastaa pakkausjätetietojen tilastoinnista ja raportoinnista EU:lle. Kiertotalousbarometri on kyselytutkimus, joka on suunnattu yrityksille ja kansalaisille. Kiertotalousbarometri selvittää kiertotalouteen liittyviä asenteita ja toimintaa. (Kaariaho & Pirtonen 2022.)

Suomi siirtyy kohti kiertotaloutta, mutta hitaalla vauhdilla perustuen kiertotalousindikaattoreiden tietoihin. 2010-lukuun verrattuna kotimainen materiaalien kulutus on silti korkeammalla tasolla. Kierrätysaste on Suomessa alle EU-keskiarvon. Myös materiaalien kiertotalousasteen kehitys on heikkoa. Ekoinnovaatioiden määrä kertoo kiertotalouden kehityksestä. Suomi on ollut tässä tilastossa Euroopan huippua yritystasolla. Suomi pyrkii kiertotalouden kärkimaaksi ennen vuotta 2035 kiertotalousohjelman mukaisesti. Valitut indikaattorit seuraavat edistymistä, joita tuottaa Tilastokeskus. Kiertotalouden talousmallissa hyödynnetään materiaaleja tehokkaasti ja kestävästi. Materiaalit pysyvät kierrossa mahdollisimman pitkään. Kokonaisvaltaista muutosta edellytetään koko järjestelmän tasolla siirryttäessä kiertotalouteen. Yhteiskunnan sääntöjä ja käytäntöjä tulee muuttaa. Muutoksia tulee kuluttajien ja yritysten käyttäytymiseen ja asenteisiin, sekä päätöksentekoon, suunnitteluun ja ohjaukseen. Taloudellinen toiminta ja uusiutumattomat resurssit kytetään irti toisistaan. Ideologisella tasolla talouskasvu tapahtuu uusiutumattomien resurssien käyttöä kasvattamatta. Kyseessä on laaja muutos ja se hyödyttää yhteiskuntaa tarjoamalla taloudellisia mahdollisuuksia ja hyödyttämällä ympäristöä. (Kaariaho & Pirtonen 2022.)

Senkkakuonalla tarkoitetaan terästeollisuuden sivuvirtana syntyvää poltettua kalkkia. Senkkakuonan kannalta oleellinen indikaattori on materiaalien kiertotalousaste. Tilastojen mukaan materiaalien kiertotalousaste on laskenut kauemmas tavoitteesta. Tuotteiden kiertäminen taloudessa mahdollisimman pitkään on edellytys raaka-aineiden kulutuksen vähentämiselle. Kun materiaaleja hyödynnetään tehokkaammin ja käytetään uudelleen vähenee neitseellisten raaka-aineiden otto luonnosta. Kiertotalousaste (Circular Material Use Rate, CMU) kuvaa uudelleen käytön ja kulutuksen suhdetta. Kuviossa on esitetty kiertotalousaste vuosina 2013-2020. (Kaariaho & Pirtonen 2022.)



Kuvio 4. Materiaalien kiertotalousaste 2013-2020 (Kaariaho & Pirtonen 2022).

Kiertotalousaste mittaa kierrätetyn materiaalin osuuden kaiken materiaalin käytöstä. Mitä enemmän neitseellisten raaka-aineiden käyttöä on korvattu kierrätetyllä materiaalilla, sitä korkeampi CMU-arvo. Korkea CMU-arvo tarkoittaa pienempää ympäristöön kohdistunutta rasitetta. Kuten kuviossa 4 on nähtävissä, Suomen kiertotalousaste on huomattavasti alemmalla tasolla verrattuna EU-keskiarvoon. Tämä selittyy Suomen runsaalla

alkutuotannolla. Metsäteollisuus ja kaivostuotanto alentavat kiertotalousastetta nostamalla kotimaista materiaalien kulutusta. Kiertotalousohjelman mukaan materiaalien kiertotalousasteen on kaksinkertaistuttava vuoteen 2035 mennessä. Kolmen prosenttiyksikön kasvu tarkoittaa tavoitteen saavuttamista. (Kaariaho & Pirtonen 2022.)

2.4 Teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen

Teollisen tuotannon sivuvirtojen paremmassa hyödyntämisessä on suuri potentiaali kiertotalouden edistämiseen. Ilmastohyötyjen odotetaan moninkertaistuvan teollisuuden jäte- ja sivuvirtojen käyttöönoton myötä. On mahdollista löytää suuria virtoja teollisen tuotannon jätteistä. Näitä voidaan hyödyntää ilmaston kannalta edullisesti. Hiilijalanjälkeä on mahdollista pienentää 90% betonin valmistuksessa ja maanrakentamisessa hyödynnettäessä sivuvirtoja. Toinen esimerkki liittyy tuhkan hyödyntämisessä metsälannoituksessa. Sen avulla voidaan saavuttaa 18000 henkilöauton päästöjen tasoinen säästö. Tässä kuitenkin keskitytään tarkemmin masuunikuonan ja terästeollisuuden kuonien hyödyntämiseen. Kuonia syntyy Suomen metalliteollisuudessa. Määrä on miljoonia tonneja vuodessa. Kun niitä aletaan hyödyntämään tehokkaasti saavutetaan merkittävä ilmastohyöty. Esimerkkinä voidaan pitää masuunikuonaa, jota on arvioitu syntyvän Suomen merkittävimmän terästeollisuuden yrityksen jätteenä puoli miljoonaa tonnia vuodessa. Puolet koko materiaalmäärästä hyödynnetään betoniteollisuudessa. Loput menevät maatalouden lannoitteeksi ja tienrakentamiseen. Masuunikuonan avulla on mahdollista korvata sementtiä, kalkkia ja neitseellistä kiviainesta. Neitseellinen tuotanto kuluttaa runsaasti energiaa ja tuottaa runsaasti kasvihuonepäästöjä. Siksi neitseellisten raaka-aineiden korvaaminen aikaansaa suuren ilmastohyödyn. Energiaintensiivisiä prosesseja ovat prosessointi, kuljetus ja louhiminen. Kuten mainittua betonin hiilijalanjälki laskee jopa 90%, kun betonin valmistukseen käytetään sementin sijasta masuunikuonaa. Betoniteollisuuden arvioidaan aiheuttavan noin 8% koko maailman kasvihuonepäästöistä. Siksi saavutettavaa hyötyä pidetään erityisen merkittävänä. (Gaia Consulting 2020.)

Jotta masuunikuona voitaisiin ohjata betoniin tulee kuonien käyttöä kehittää. Ei ainoastaan masuunikuona, mutta myös muut betonikäyttöön soveltuvat kuonat voidaan ohjata betonin tuotantoon. Lannoituksessa, sekä maan- ja tienrakennuksessa käytettävät kuonat voivat soveltua betonin raaka-aineeksi. Siksi niitä tulisi korvata muilla kuonilla, tuhalla ja muilla käyttöön soveltuvilla teollisuuden sivuvirroilla. Näin betonin valmistukseen

soveltuva kuona voidaan ohjata betoniteollisuuden käyttöön. Esimerkkinä mainittakoon 0,7 miljoonaa tonnia vuodessa sivuvirtana tuotettu ferrokromikuona. Sitä voidaan käyttää myös betonin tuottamiseen. Senkkakuonan käyttöä, johon projekti liittyy, voidaan edistää huomattavasti. Muita kuonia ovat konverterikuona, rikinpoistokuona, muut terästeollisuudessa syntyvät kuonat ja jätteenpolton pohjakuonat. On arvioitu, että näiden kuonien kokonaismäärä on noin miljoona tonnia ja niitä ei vielä hyödynnetä tarpeeksi tehokkaasti. Jotta kuonia pystytään hyödyntämään, tulee niiden varastointia, logistiikkaa, prosessointia ja tuotteistamista kehittää. (Gaia Consulting 2020.)

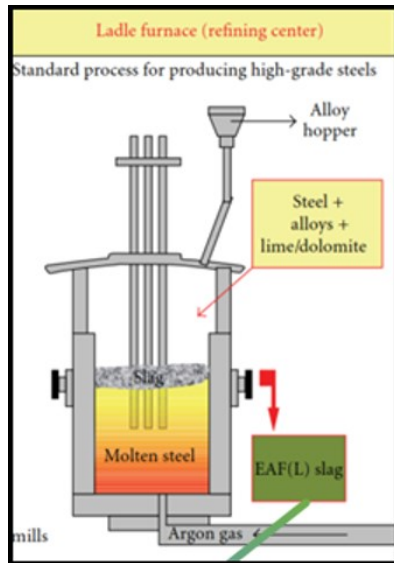
Toinen merkittävä teollisuuden sivuvirta on biomassan polton seurauksena syntyvä tuhka, jota voidaan käyttää biotalouden raaka-aineena. Tuhkaa syntyy vuositasolla noin puolitoista miljoonaa tonnia. Mikäli ne pystytään hyödyntämään, saadaan aikaiseksi taloudellista hyötyä sekä ilmastohyötyä. Tuhkaa syntyy erityisesti sähkön- ja lämmöntuotannosta. Hyötykäyttömahdollisuuksiin vaikuttavat tuhkan ominaisuudet ja haitta-ainepitoisuus. Hyödyntämiskohteita löytyy korvaamalla luonnonkiviaines maan- ja tienrakennuksessa. Myös kivihiilen polton seurauksena syntyvä lentotuhka voidaan käyttää betonin raaka-aineena. Kasvihuonepäästöt vähenevät, kun tarve kuljetuksille ja louhinnalle pienenee, koska neitseelliset raaka-aineet on korvattu. Metsien lannoitukseen käytetään puuperäistä tuhkaa, joka sisältää fosforia ja kaliumia. Sen avulla voidaan edistää puuston kasvua taloudellisesti. Tuhkalannoituksella pystytään korvaamaan vesistövaikutuksia, jotka liittyvät kunnostusojitukseen. Tuhkalannoitus tuottaa myös merkittävämmän kasvulisän verrattuna kunnostusojitukseen. Siksi tuhkalannoitus on tehokas vaihtoehto kunnostusojitukselle ja toimii kiertotalouden edistäjänä. On arvioitu, että optimaalisia tuhkalannoituskohteita olisi kuusinkertainen määrä nykyiseen verrattuna. Nykyinen tuhkalannoituksen vuositaso on noin 10000 hehtaaria. Kuusinkertainen määrä vastaa 18000 henkilöauton vuosittaisia päästöjä. Puupohjaista tuhkaa käytetään maan- ja tienrakennuksessa ja paperiteollisuuden jätteiden stabilointiaineena. Käyttötarkoitukseen soveltuisivat myös muutkin vaikeammin hyödynnettävät tuhkat. Tuhkaa pystytään käyttämään hyödyllisemmin. Puupohjaista tuhkaa voidaan käyttää lannoitukseen. Vaikeammin hyödynnettäviä tuhkia voidaan käyttää paperiteollisuuden jätteen stabilointiaineena, sekä maan- ja tienrakennukseen. Kiertotalouden edistämiseksi tulisi edistää puuperäisen tuhkan käyttöä lannoitteeksi. Myös jätteenpolton tuhkaa voidaan käyttää neitseellisten hiekka- ja sora-ainesten korvaajana tienrakentamisessa ja betoniteollisuudessa. Tämä kuitenkin edellyttää tuhkan prosessointia. (Gaia Consulting 2020.)

Valtaosa materiaaleista ja prosesseista ovat vakiintuneita, joka hidastaa niistä luopumista. Käytännöt ovat jäykkiä, vanhat menetelmät ovat iskostuneita, sekä näennäisesti helppoja ja edullisia. Sivuvirtojen uusilla käyttöratkaisuilla saavutetaan ilmastohyötyjen lisäksi materiaalille korkeampi jalostusarvo. Sivuvirtojen hyötykäyttöä pystytään edistämään sääntelyn kehittämisellä. Perinteisiin toimintamalleihin verrattuna uusiomateriaalin hyödyntäminen voi olla edullisempaa kokonaisuutena. Monilla sivuvirroilla on samoja käyttökohteita. Tietty sivuvirta voi usein linkittyä toisen sivuvirran hyödyntämiseen. Maan- ja tienrakentamisessa voidaan hyödyntää sekä tuhkaa, että kuonaa. Maa-ainejätteen syntyminen voidaan estää niiden käytöllä maan stabilointiaineeksi. Maa-ainejäte on yksi suurimmista jätteistä kaupungeissa. (Gaia Consulting 2020.)

2.5 Terästehtaan senkkakuona vaihtoehtoisena materiaalina

Tarkoituksena on jalostaa senkkakuonaa raaka-aineeksi rakennusmateriaalituotannolle. Jalostettu kuona korvaa osan raaka-aineista laasteissa ja tasoitteissa. Kuonan avulla edistetään kiertotaloutta ja alennetaan tuotannon hiilijalanjälkeä. Kuonajauheen ominaisuuksia on testattu laajasti ja se täyttää tekniset vaatimukset. Muita laasti- ja tasoitetuoteisiin käytettyjä raaka-aineita testataan vastaavalla tavalla. Suomessa ja Ranskassa sijaitsevat laboratoriot ovat tutkineet kuonan käyttöä. Käyttöön on myönnetty patentti vuonna 2022. Kuona vastaa kemiallisesti ja mineralogisesti sideainetta, jota käytetään rakennusmateriaaleissa. Käyttö ei aiheuta vaaraa terveydelle tai ympäristölle. (Raahen kaupunki 2023.)

Kuonanjalostuksen prosessin päävaiheisiin kuuluu kuumien n.400 asteisten kuonapatojen vastaanotto ja tyhjennys (kuvio 5). Kuona erotellaan kaivinkoneella ja seulonnalla. Suuret yli 100 mm:n kappaleet palautetaan terästehtaan tuotantoon. Hienompijakoinen aines siirretään jäädytykseen ja seulontaan, jonka jälkeen se siirretään välisiiloihin. Alle 8 mm:n kuonajauhe varastoidaan siiloihin. Yli 8mm kuona palautetaan terästehtaan tuotantoon. Jalostusprosessissa on useita murskaus-, jauhatus-, seulonta- ja metallinerotusvaiheita. Alle 2mm aines siirretään kuulamylyljauhaukseen. Erotettu metalli palautetaan terästehtaan tuotantoon. Valmis tuote on alle 1mm kokoista jauhetta ja siirretään siiloihin. Tuotetta kuljetetaan siiloista tehtaisiin Suomeen ja Ruotsiin. (Raahen kaupunki 2023.)



Kuvio 5. Senkkakuona teräksen jalostusprosessissa (Saint-Gobain Finland 2024).

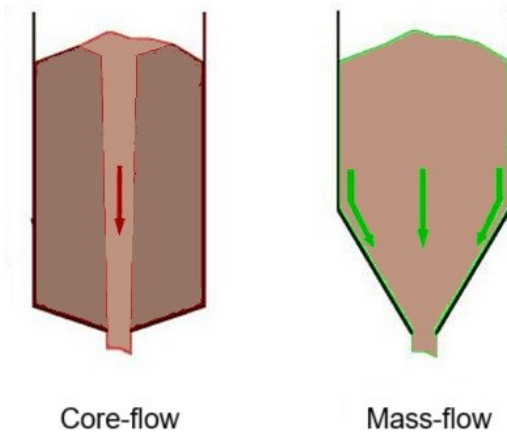
Kuona jäähdytetään merivedellä. Veden lämpötilan on arvioitu nousevan viisi astetta ennen palautusta altaaseen. Jäähdytys tehdään lämmönvaihtimella, joka estää veden saastumisen prosessissa. Jäähdytysveden tarve on ajoittainen ja maksimissaan noin 55 litraa sekunnissa. Kokonaistarve on noin 2000 kuutiota vuorokaudessa. (Raahen kaupunki 2023.)

3 KIERTOTALOUSSILOJEN SUUNNITTELU

3.1 Siilosuunnittelu

Materiaaleja käytetään jauhemuodossa lähes kaikissa teollisuuden aloilla ja niitä varastoidaan siloihin. Kun jauheella on riittävästi voluumeja luotetaan painovoiman avulla tuotettuun virtaukseen, koska se on taloudellisinta. Materiaalit kuten mineraalit ja sementti ovat jauheita ja niitä virtaa valtavia määriä vuosittain. (Jenike 1961, 1.) Virtausongelmia vältetään oikeaoppisella siilosuunnittelulla. Siloihin liittyvät ongelmat ovat materiaalin siltaus, suppilovirtaus, ratholing, kaareutuminen, segregatio ja rappeutuminen. Siilosuunnittelu poistaa materiaalin virtaukseen, ikääntymiseen ja hajoamiseen liittyvät ongelmat. Siilosuunnittelussa oleellista on kartion kulma, jota myös kutsutaan nimellä Hopper angle, sekä suuaukon halkaisija. Näihin muuttujiin vaikuttavat jauheen ominaisuudet. Nämä ovat seinän kitka, jauheen sisäinen kitka ja kaareutumisominaisuudet. (Bulk Solids Portal 2020.)

Jauheiden on virrattava helposti siloissa, jotta vältetään jauheen siltaus silon sisällä. Siltaus johtaa epäsäännölliseen virtaukseen ja jauheen segregatioon. Fluidisoinnissa ongelma estetään puhaltamalla paineilmaa silon kartion seinämiin, joka aikaansaa jauheen virtauksen yhtenäisenä massana. Fluidisoinnissakin on mahdollista, että epätäydellinen jauheen virtaus aikaansaa kanavoitumista, kasaantumista ja paakkuuntumista ja joskus jopa täydellisen virtaamattomuuden. Siksi jauheen pitää laajentua tasaisesti fluidisointikaasun osuessa siihen. Tuotteeseen saattaa muodostua epätasainen ja epähomogeeninen koostumus kasaantumisen seurauksena, kun kasaantunut jauhe siirtyy eteenpäin. (Krantz, Zhang & Zhu 2009, 239-245.)



Kuvio 6. Ydinvirtaus ja massavirtaus (mukaillen Bulk Solids Portal 2020).

On olemassa kahden tyyppistä virtausta: ydinvirtaus ja massavirtaus (kuvio 6). Ydinvirtauksessa jauhe virtaa ulos kanavaa pitkin suuaukon yläpuolelta. Jauhe virtaa kanavaan jauhemassan yläosasta jättäen reuna-alueilla olevan jauheen paikalleen. Tällä periaatteella ensimmäisenä sisään mennyt jauhe tulee viimeisenä ulos. Jauhe on jumittunut seiniin, kunnes koko siilo on tyhjennetty. Mikäli jauhe on huonosti virtavaa tai sen virtausaika pitää saada asetettuihin rajoihin, massavirta on suositeltavaa. Massavirtauksessa ensimmäisenä siiloon mennyt jauhe tulee myös ensimmäisenä ulos, koska jauhe virtaa ulos yhtenäisenä massana (Jenike 1961, 10.) Jotta tämä saavutettaisiin, pitää jauheen seinäkitkan olla alle kriittisen arvon. Tämä vaatii riittävän jyrkkää kartiokulmaa ja tasaista kartion seinämää. Myös jauheen on pystyttävä virtaamaan läpi koko suuaukon. Tämä vaatii oikeantyyppistä venttiiliä. Seinäkitkatestaus antaa arvion siitä, tukeeko kartion geometria massavirtausta. Mikäli halutaan tarkka tulos tarvitaan sekä seinäkitka, että Flow-funktio-testaus. (Operating Instructions Manual, 36.)

Siilo koostuu sylinteristä ja kartiosta. Jauhe siirtyy kartion kautta suuaukkoon. Kartion kulma aiheuttaa suurimman osan siiloihin liittyvistä ongelmista. (Bulk Solids Portal 2020.) Siilon virtaus pystytään optimoimaan valitsemalla oikea kartiokulma ja suuaukon halkaisija. Haluttu tilanne on massavirtaus, koska se ei jätä jauhetta siilon seinämille, toisin kuin ydinvirtauksessa (Lauren 2017, 42.) Massavirtauksen hyötyjä on ennustettavissa oleva tyhjeneminen ja koko siilon volyymin käyttöön saaminen. Tämä johtuu materiaalin minimaalisesta kasaantumisesta. Massavirtauksen minimikulma tarkoittaa kartion kulmaa, jossa sivuilla oleva materiaali pystyy vielä liikkumaan. Ideaalitalanteessa halutaan saavuttaa jauheen tasainen virtausnopeus. Tämän vuoksi kartion kulmaa pitää

pienentää huomattavasti minimikulmasta. (Lauren 2017, 43.) Kuten jo edellä mainittua suurin mahdollinen kulma massavirtauksen kannalta riippuu jauheen ominaisuuksista ja siilon seinämään kohdistuvasta kitkasta. Jotta massavirtauksen raja-arvot pystyttäisiin määrittämään pitää laskea jauheen virtausominaisuudet ja rasiustila kartiossa.

3.2 Jauheen raejakauman mittaukseen käytettävät menetelmät

Raejakauma on statistinen konsepti. Se kertoo tietyn kokoisten partikkeleiden esiintyvyyden näytteessä. Monet jauheen ominaisuudet liittyvät raejakaumaan. Materiaalin raejakaumamittaus on tärkeä mittausarvo, johon perustuvat esimerkiksi laadunhallintaprosessit ja tutkimussovellukset. Raejakauman vaikutuksen alla on monia ominaisuuksia. Virtaus ja materiaalin käyttäytyminen kuljetuksessa, reaktiivisuus, hankaavuus ja koonpuristuvuus riippuvat raejakaumasta. Dynaamista kuva-analyysia (DIA) käytetään raejakauman mittaamiseen. Mittaustuloksessa prosentit ilmaistaan kirjaimella d, jonka jälkeen kirjoitetaan prosenttiarvo. D50 arvoa kutsutaan mediaaniksi, koska silloin raejakaumassa on yhtä paljon pienempiä ja suurempia partikkeleita. Yleisimmin raejakaumamittauksessa ilmoitetaan d10, d50 ja d90 arvot. Esimerkiksi d10 = 100 µm, d50 = 300 µm ja d90 = 1500 µm. Tämä tarkoittaa, että 10% näytteestä on pienempää kuin 100 µm, 50% on pienempää kuin 300 µm ja 90% on pienempää kuin 1500 µm. Toisin sanoen ilmaistaan seulan koko, josta tietty prosenttiosuus menee läpi. Jaottelu antaa hyvän yleiskatsauksen jauheen käyttäytymisestä. (Microtrac Particle Characterization 2024.)

Hiukkasten koonjakaumaa ja muodon parametrejä määritetään dynaamisella kuva-analyysillä (DIA). Se on nykyaikainen menetelmä ja sillä saavutetaan nopeita, tarkkoja ja toistettavissa olevia analyysijä laajalla mittausalueella. Monissa sovelluksissa hiukkasten koko ja muoto ovat tärkeitä prosessin ja laadun mittareita. Dynaaminen kuvan analyysi on ISO 13322-2 -standardin mukainen. Se antaa kattavan analyysin näytteen tärkeistä materiaaliominaisuuksista. Dynaamisessa kuvan analyysissä hiukkaset liikkuvat kamerajärjestelmän analysoidessa niitä. Hiukkaset ovat liikkeessä kuvan ottamisen aikana. Usein hiukkaskuvat tallennetaan varjoprojektioina, kun hiukkasvirta valaistaan yhdeltä puolelta. Analyysissä hiukkaset voivat liikkua vapaassa pudotuksessa, nesteessä tai ilmapirrassa riippuen näytteestä. Staattisen ja dynaamisen kuva-analyysin välillä on merkittävä ero. Staattisessa kuva-analyysissä partikkelit ovat paikallaan alustalla eivätkä liiku kameran suhteen kuvanottohetkellä. Staattista kuva-analyysiä käytetään pääasiassa kapeiden kokojakaumien mittaamiseen, erityisesti erittäin hienojen partikkelien

luonnehtimiseen. Sitä kuitenkin käytetään enimmäkseen tutkimus- ja kehitystyössä, joissa erittäin tarkat partikkelikuvat ovat tarpeen ja hiukkasten koko ja muoto määritetään erityisen tarkasti. (Microtrac 2024.)

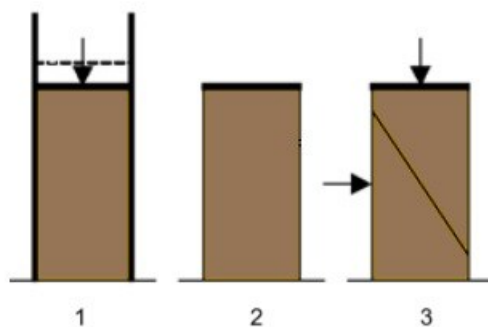
Dynaaminen kuva-analyysi on erinomainen vaihtoehto rutiininomaisiin mittauksiin. Tähän kuuluvat joukko- ja jauhemateriaalit, rakeet sekä suspensiot. Käytettäessä kahta kameraa samanaikaisesti laajennetaan mittausalueita. Esimerkiksi CAMSIZER-laitteen kaksi kameraa on optimoitu eri kokoalueille: ZOOM-kamera käytetään tallentamaan pienemmät hiukkaset. Sillä saavutetaan korkea resoluutio. BASIC-kamera tallentaa suurempia hiukkasia ja siinä käytetään laajempaa kenttänäkökulmaa. Käyttämällä kahta kameraa mahdollistetaan paremmat mittausolosuhteet eri kokoalueille. Kun ZOOM- ja BASIC-kameroiden tuottamat tiedot yhdistetään, saadaan kokonaistulos. (Microtrac 2024.) Kahden kameran menetelmän merkittävä etu on laaja dynaaminen mittausalue, jossa ala- ja ylärajojen välillä on jopa 10 000 kertainen ero ilman optisten komponenttien säätöä. (Arora, Kumar & Singal 2022, 2-3.)

Camsizer XT hyödyntää dynaamista kuvan analyysiä. Laitteella tuotetaan hiukkasten virtaus ja se tallennetaan kamerajärjestelmällä. Käytössä on edellä mainitut kaksi kameraa ja ne on optimoitu eri kokoalueille. Hiukkasen mittaaminen riippuen näytteestä kestää 1–5 minuuttia. Mittauksessa tunnistetaan tuhansia tai jopa miljoonia hiukkasia. Camsizer XT mittaa hiukkasen koon välillä 0 ja 3000 µm sekä erilaisia muotoon liittyviä parametreja. Menetelmällä saadaan toistettavia tuloksia samasta materiaalista. Toistettavuus ilmaistaan suhteellisena keskihajontana. (Arora ym. 2022, 2-3.)

3.3 Jauheen virtausominaisuuksien mittaukseen käytettävät menetelmät

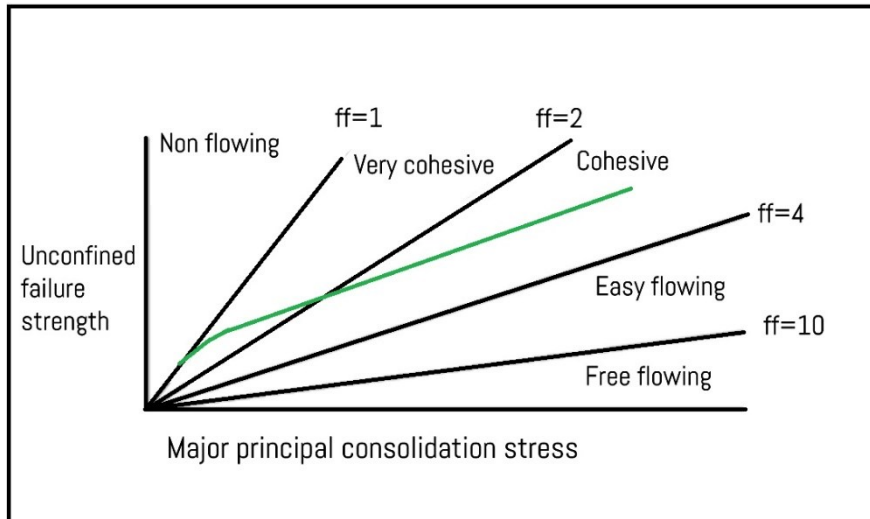
PFT eli Powder Flow Tester analysoi jauheen käyttäytymistä teollisissa prosessilaitteissa. Teollisessa toiminnassa syntyy kustannuksia, kun jauhe virtaa kartiosta ei-halutulla tavalla. Analysoimalla jauheen käyttäytymistä pystytään määrittämään optimaalinen kartio käytettävälle materiaalille. Seinäkitkatestaus antaa tiedon siitä, pystyykö annettu kartion muoto mahdollistamaan massavirtauksen. Tarkkaan laskelmaan kartiokulmasta vaaditaan seinäkitkan testaus ja myös Flow-funktio testaus. On olemassa kaksi erityyppistä tilannetta, jotka estävät jauheen virtausta: rat-holing ja arching. Rat-holingilla tarkoitetaan virtauksen häiriintymistä ydinvirtaussiilossa, jossa ainoastaan suuaukon yläpuolinen käytävä virtautuu jättäen koko muun jauhemassan paikalleen. Archingilla tarkoitetaan häiriötä massavirtaussiilossa, jossa virtauksen estää suuaukon yläpuolelle

muodostunut stabiili jauhekaari. (Operating Instructions Manual, 36.) Jauheesta riippuen määritetään suuaukon mitoitus, jonka tulee olla riittävän suuri varmistamaan luotettava virtaus. Brookfield Engineeringin Powder Flow Tester tekee Flow-funktio mittauksen ja laskee sen perusteella tarvittavat mitat. Seinäkitkatestausta tarvitaan tarkempaan mittaukseen. Flow-funktiolla mitataan jauheen virtaavuutta. Tämä on materiaalin murtumislujuus pintaa vastaan, jota määritellään eri stressitasoilla (kuvio 7). Flow-funktio testissä mitataan jauhetornin lujuutta yksiakselisessa murtumistestissä. (Operating Instructions Manual, 38.)



Kuvio 7. Jauheen murtumistesti (mukaan Operating Instructions Manual, 38).

Jauheen murtumistestissä jauhe asetetaan soluun ja se puristetaan kasaan normaalistressiä vastaavalla tasolla. Seuraavassa vaiheessa solu poistetaan jättäen jäljelle jauheen. Tämän jälkeen jauheeseen kohdistettavaa normaalistressiä lisätään asteittain, kunnes jauhetorni murtuu. Murtumishetkellä tapahtunut normaalistressi tallennetaan ja sitä käytetään jauheen analysoimiseen. Yksiakselinen murtumistesti tehdään käyttäen monia kokoonpuristuskuormituksia. Flow-funktio rakennetaan vertaamalla murtumislujuutta kokoonpuristuskuormitukseen. Jauhe on virtaavampaa suuremmalla flow factor-arvolla. (Operating Instructions Manual, 38.)



Kuvio 8. Jauheen virtaavuus (mukailien Operating Instructions Manual, 39).

Kuviossa 8 on esitetty jauheen virtaus perustuen Flow-funktio arvoon. Mikäli $ff < 1$ voidaan jauhetta pitää virtaamattomana. $1 < ff < 2$ on erittäin koossapysyvä. $2 < ff < 4$ on koossapysyvä. $4 < ff < 10$ on helposti virtaava. $10 < ff$ on vapaasti virtaava. (Operating Instructions Manual, 39.)

Merkittävä vaikutus siilojen kuormitusjakaumaan on jauheen ja seinän välisellä kitkalla. Suuremmalla seinäkitkalla jauheen paino siirtyy siilon seinämiin alla olevan jauheen puristamisen sijaan. Mikäli seinäkitka on pieni siirtyy jauheen paino alla olevan jauheen puristamiseen alaspäin. Seinäkitkan laskemiseen käytetään mittauksia jauheen tiheydestä, seinäkitkasta, sisäisestä kitkasta ja siilon halkaisijasta. Seinäkitkakulma tarkoittaa kulmaa, joka aiheuttaa jauheen liukumisen. Tämä on tyypillisesti 10 ja 45 asteen välissä. Jauheen irtotiheyden mittaus tarkoittaa jauheen omaa painoa suhteessa sen tilavuuteen. Mitä tiheämpää jauhe on, sitä enemmän se painaa tilavuusyksikköä kohti. Jauheen tiheys vaikuttaa jauheeseen kohdistuvaan kuormitukseen virtauksessa tai staattisessa tilassa siilon sisällä, koska siihen kohdistuu suurempi paino. Flow-funktio testauksessa mitataan myös jauheen irtotiheys ja sitä käytetään suuaukon halkaisijan määrittämiseen. Jauheen irtotiheys voidaan esittää graafina. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä vapaammin virtaavaa jauhe on, sitä vähemmän se puristuu kasaan kuormituksen alaisena. Mitä huonommin virtaavaa jauhe on, sitä enemmän jauheen tiheys kasvaa kuormituksen kasvaessa. (Brookfield Engineering 2024.)

Brookfieldin Powder Flow Testerillä voidaan suorittaa neljä erilaista testausta. Flow-funktio testausta käytetään määrittämään jauheen virtauksen voimakkuutta, sekä jauheiden

taipumusta archingiin ja rat-holingiin. Seinäkitkatestausta käytetään määrittämään mas-savirtaukseen tarvittava kartiokulma ja painovoimavirtauksen laskukulma. Siinä mitataan jauheen ja seinämän välistä kitkaa ja jauheen tiheyden funktiota. On olemassa myös ajallinen Flow-funktio testaus. Siinä mitataan samoja arvoja kuin tavallisessa Flow-funktio testauksessa, mutta siinä käytetään jauheen säilytystä määrättyllä aikajaksolla. Jauheen tiheysmittauksessa mitataan graafi jauheen tiheydestä suhteessa kuormitukseen. Tämä kertoo jauheen tiheyden muutoksesta kuormituksen lisääntyessä, toisin sanoen jauheen ominaisuudesta puristua kasaan. (Brookfield Engineering 2024.)

Toimiva ei-laskennallinen menetelmä virtauksen testaamiseen on manuaalinen sillojen testaus, jossa jauheen virtaus testataan kokeellisesti eri mittaisista silloista. Menetelmä on käytössä, mikäli laskennallisia menetelmiä ei ole mahdollista toteuttaa tai niitä ei haluta käyttää. Haittapuolena on menetelmän hitaus ja suuri kustannus, koska silot pitää rakentaa testausta varten. Menetelmän hyvänä puolena on varmuus tuloksesta, koska menetelmä simuloi realistisia olosuhteita tarkimmalla mahdollisella tavalla.

3.4 Teräsrakennesuunnittelussa käytettävät menetelmät

Computer-aided design (CAD) on tietokonejärjestelmien käyttöä suunnittelussa. Sitä käytetään optimointiin, luomiseen tai analyysiin. CAD:iin tarvittava laitteisto tyypillisesti sisältää tietokoneen ja tarvittavat laitteet, kuten näytöt, näppäimistön ja muita laitteita. Ohjelmisto koostuu tietokoneohjelmistoista ja sovelluksista. Tietokoneavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan kaikentyyppistä suunnittelua, joka käyttää apunaan tietokoneita analysointiin, muokkaamiseen tai kehittämiseen. (Sarcar, Rao & Narayan 2008, 3.)

Tietokoneavusteinen suunnittelu nostaa suunnittelijan tuottavuutta verrattuna manuaaliseen suunnitteluun. Tuote ja sen osat on helpompi visualisoida. Tämän seurauksena analysointiin ja dokumentointiin vaadittava aika vähenee. Suunnittelusta tulee halvemman hintainen ja myös nopeampi projektin läpäisyajan kannalta. Työtä on mahdollista analysoida syvällisemmin ja lyhyemmässä ajassa. Myös eri suunnitteluvaihtoehtojen vertailu onnistuu nopeammin. Suunnitteluvirheiden määrä laskee johtuen siitä, että järjestelmällä on mahdollista suorittaa sisäisiä tarkastuksia. Tämä johtaa parempaan laatuun ja tarkkuuteen. Myös kommunikaatio projektissa mukana olevan henkilöstön välillä paranee dokumentaation vuoksi. CAD:in avulla on mahdollista tuottaa parempia ja paremmin standardisoituja piirustuksia, paremmin dokumentoituna ja vähemmällä virheillä. Suuri osa ohjelmistoilla tuotetuista tuotteista voidaan soveltaa Computer-aided

manufacturing (CIM) sovelluksiin, kuten CNC-koneistukseen ja robotteihin. (Sarcar ym. 2008, 5.)

Suunnittelu on mahdollista tehdä myös manuaalisesti piirtämällä. Menetelmä oli käytössä ennen tietokoneavusteiseen suunnitteluun siirtymistä. Käytännössä tämä tarkoittaa objektin viivaimella ja eri apuvälineillä mittaamista ja kynällä piirtämistä paperille. Käsin tehtävää teknistä piirtämistä tapahtuu nykyisin silti luonnosteluvaiheessa.

3D-skannaus on menetelmä, joka tallentaa tarkasti geometrian digitaaliseen muotoon. 3D-skannauksessa hyödynnetään valoa tai lasertekniikkaa, jotta saadaan yksityiskohtaista tietoa esineiden tai ympäristön muodosta tai koosta. Laserin avulla luodaan piste-pilvi tai datajoukko, joka kuvaa esineen ominaisuudet geometrisissä muodoissa. Skannausta käytetään työkaluna suunnittelussa ja tuotannossa. Se mahdollistaa tarkan arvioinnin yksityiskohdista, muotojen tallentamisen ja tietojen tarjoamisen suunnittelutyöhön. Markkinoilla on laaja valikoima 3D-skannereita erilaisilla ominaisuuksilla, kuten eri resoluutioilla. Kehittyneemmät skannerit pystyvät myös värillisiin skannauksiin ja tarkkojen yksityiskohtien tallentamiseen. Laitteille on asetettu laatuvaatimuksia teollisuudessa. Laserskannereiden kehitys pyrkii vastaamaan näihin laatuvaatimuksiin. 3D-skannereilla pystytään keräämään tarvittavat tiedot nopeasti ja tarkasti. Tämän vuoksi niitä käytetään teollisessa suunnittelussa, insinööritieteissä ja tuotannossa. Jos verrataan vanhanaikaisia manuaalisia menetelmiä 3D-skannaukseen, ne ovat kalliita ja aikaa vieviä vaihtoehtoja. 3D-skannausteknologiat ovat tehostaneet työtä merkittävästi kaikissa tuotteen suunnittelun, testauksen, kehityksen, lanseerauksen ja myös niiden jälkeisissä vaiheissa. Niitä käyttämällä estetään kalliita virheitä ja lisätään tuottavuutta. (Haleem, Javaid, Singh, Shanay, Suman, Kumar, Khan 2022.)

3D-skannerit mittaavat nopeasti ja tarkasti monimutkaisia kohteita mikä parantaa suunnittelun tuottavuutta merkittävästi. 3D-skannausteknologiaa voi hyödyntää kaikissa tuotannon vaiheissa. Uusien tuotteiden luominen tai olemassa olevien muokkaaminen skannatun datan pohjalta on suhteellisen helppoa. Esineiden digitalisointi ja niiden käyttö konseptivaiheessa säästää aikaa, vaivaa ja kustannuksia. Uusimpia skannereita käyttämällä voidaan suunnittelusyklin kustannuksia vähentää useita kymmeniä prosentteja. 3D-skannaus tarjoaa tarkempaa dataa kuin oikeiden esineiden kerääminen. Tämän vuoksi tarvitaan vähemmän prototyyppisiä tuotteita uudelleensuunnittelua varten. Käyttäjät voivat skannata geometrioita ja muuntaa fyysiset esineet digitaaliseen muotoon saadakseen tietoa yksittäisille malleille. Niitä voidaan käyttää monilla eri aloilla. (Haleem ym. 2022.)

3D-laserskannerit lyhentävät tarvittavaa aikaa tilan kartoittamiseen ja skannaamiseen, parantavat suunnitteluprosessia ja vähentävät virheiden määrää tietojen keräämisessä. Tutkijat käyttävät laserskannereita rakennusten ja niiden sisätilojen kartoittamiseen ja tarkastamiseen. Rakennussuunnittelijoiden kannalta tämä on tärkeää. Tarvitaan systemaattista ja luotettavaa tiedonkeruuta ennen rakennustöiden aloittamista. Laserlaitteet sijoitetaan erilaisiin skannauskohteisiin tarkan laserskannauksen varmistamiseksi. Skanneri tallentaa nopeasti esineiden, rakennusten ja ympäristöjen pinnat ottamalla etäisyydenmittauksia kaikkiin suuntiin. (Javaid, Haleem, Singh & Suman 2021.)

Monet skannaustekniikat hyödyntävät lasertriangulaatiota. Yksittäinen pistelaserskanneri kerää esineen etäisyystiedot. Valokeilalaser luo profiilin ja simuloitu kuviolaser tuottaa pistepilvitiedot. Lasertriangulaatiossa kohdistetaan lasersäde pinnalle ja heijastunut säde havaitaan sensorin avulla. Mittaamalla heijastuneen säteen kulma voidaan laskea etäisyys pintaan. Menetelmä on erittäin tarkka ja sitä voidaan käyttää syvyysmittauksiin. 3D-skannerit ovat luotettavampia, nopeampia, tarkempia ja kattavampia kuin perinteiset käsin tehtävät mittausmenetelmät. Ne keräävät mittausdatan esineen pinnalta, varmistaen komponentin sopivuuden CAD-malliin. 3D-skannerit pystyvät nopeuttamaan suunnitteluprosessia. (Javaid ym. 2021.)

Skannaus lisää tehokkuutta ja vähentää työvoimakustannuksia, mikä lisää arvoa koko rakennusprosessin ajan. 3D-skannaus on edistyksellinen tekniikka, joka tallentaa digitaalisesti oikeiden esineiden muodot laservalon avulla. Laserskanneri tallentaa yksityiskohdat, muodot ja ulkomuodot. Sen jälkeen skannatut tiedot voidaan muuntaa digitaalisesti kolmiulotteisiksi esineiksi, kuten esimerkiksi täysin teksturoituiksi malleiksi, suunnitelmiksi ja korkeusmittauksiksi. Laserskanneri sijoitetaan työmaalle tai rakennuksen sisälle. Tietopisteet tallennetaan ja kenttädata muunnetaan digitaalisesti tarvittavan kuvan luomiseksi ohjelmiston avulla. Tämä auttaa tehostamaan perinteisten menetelmien nopeutta ja tarkkuutta. (Haleem ym. 2022.)

3D-skannaus on menetelmä tutkia komponentin rakennetta ja pintaa. 3D-skannereissa voidaan käyttää laser-, valo- tai röntgentekniikkaa esineiden mittasuhteiden tallentamiseen. Tietoa käytetään digitaalisen 3D-mallin luomiseen yhdessä ohjelmiston kanssa. 3D-tietoja on hyödynnetty monilla eri aloilla, kuten animoinnissa, visualisoinnissa, teollisessa suunnittelussa ja testauksessa. Teknologia on tuonut suunnittelun ja valmistuksen lähemmäs toisiaan tarjoamalla monia mahdollisuuksia muokata, kehittää, sopeuttaa ja kuvata aihetta digitaalisessa muodossa. Lasertriangulaatio suoritetaan erittäin nopeasti ja skanneri siirtää lasersäteen automaattisesti jokaiseen ympäröivään

näkökulmaan. Tätä lähestymistapaa käytetään yleisesti ympäristö- tai kartoituskannauksessa. Sillä on kyky skannata keskipitkiä ja pitkiä etäisyyksiä. Skannaus pystyy tunnistamaan virheet ja säilyttämään toimivan osan muuttamalla osia, jotka aiheuttavat ongelmia. (Haleem ym. 2022.)

Joissakin tilanteissa kiiltävät materiaalit, kuten kiillotettu metalli, voivat aiheuttaa ongelmia skannauksessa, koska ne saattavat vääristää esineen valoa ja valo saattaa heijastua ennen kuin kamerat pystyvät lukemaan sen kunnolla. Hyvin tummat pinnat voivat imeä valoa, mikä tarkoittaa, ettei tietoa tallennu. Läpinäkyvät materiaalit, kuten lasi, voivat sallia valon kulkea läpi, mikä tekee lisätietojen tallentamisesta mahdotonta. Näköyhteys on yksi merkittävimmistä rajoituksista 3D-skannauksessa. 3D-laserskannaus perustuu optiseen tekniikkaan. Skanneri ei pysty mittaamaan pintoja, jotka eivät ole sen näkökentässä. Tämän vuoksi piilotettuja tai sisäisiä geometrioita ei voida mitata. Skannaukset tehdään eri kulmista, jotta saadaan aikaan kokonainen malli. Monimutkainen geometria, kuten esimerkiksi reiät tai kierteet, voivat silti aiheuttaa haasteita. (Haleem ym. 2022.)

Ympäristön valolla on myös tärkeä vaikutus 3D-skannauksessa. 3D-laserskannerissa tiedot tallennetaan lukemalla esineen valoa. Ympäristön valo voi sekoittaa laserin kanssa ja aiheuttaa epätarkkuuksia skannauksessa. Riippuen siitä, kuinka paljon ympäristön valo vaikuttaa skannaukseen, skannaus voi olla osittain luettavissa tai lukukelvoton. Tämän vuoksi osat tulisi skannata hallitussa valaistuksessa ja erillisessä tilassa. Lämpötila ja kosteus voivat myös vaikeuttaa laadukkaiden skannausten saamista ulkoikäytössä. Kustannukset ovat myös merkittävä rajoitus nykyaikaisille 3D-skannereille. Teollisuuden 3D-laserskannerit voivat maksaa tuhansia euroja. Lisäksi tarvitaan asennustarvikkeita ja käyttäjien koulutusta. Ulkoistaminen voi kuitenkin olla kalliimpaa kuin skannerin hankinta ja oman henkilökunnan kouluttaminen skannerin ja ohjelmiston käyttöön. (Haleem ym. 2022.)

Pistepilven lukemiseen ja mittausten suorittamiseen voidaan käyttää Autodesk Navisworks Manage- ja Simulate-ohjelmistoja. Navisworks-ohjelmistoa käytetään parantamaan koordinaatiota rakennusten tietomallintamisessa (Building Information Modeling/BIM). Tietomallintaminen on rakennusten kolmiulotteista mallintamista käyttäen tietomalliohjelmia (Autodesk 2024). Tietomallia tarkennetaan tuomalla siihen lisää informaatiota, kuten sovittamalla siihen CAD-malleja.

3.5 Lujuustarkastelussa käytettävät menetelmät

Jotta kiertotaloussiilot saadaan asennettua luotettavasti ja oikeaan korkeuteen, vaatii tämä siiloja tukevan teräsrakenteen suunnittelua. Siilot kohdistavat teräsrakenteeseen merkittävän rasituksen. Rakenteen tulee kestää siilojen aiheuttama rasitus. Tähän käytetään lujuuslaskentaa.

Kappaleen sisällä olevia vastavaikutusvoimia kutsutaan sisäisiksi rasituksiksi. Ulkoiset voimat vaikuttavat kappaleeseen kosketusvoimien tai hitausvoimien muodossa. Sisäiset rasitukset syntyvät, kun kappaletta kuormitetaan. Lujuusoppiin kuuluu sisäisen rasituksen aiheuttaman jännityksen määrittäminen. Mikäli jännitys on liian suuri seurauksena on kappaleen rikkoutuminen. Kappaleeseen syntyy muodonmuutoksia, kun sitä rasittavat ulkoiset voimat. Toinen lujuusopin tehtävistä on tutkia voimien aiheuttamien muodonmuutosten suuruuksia. Ehkä tärkeimpänä tehtävänä on kappaleen mitoittaminen. Kappale pyritään tekemään sellaiseksi, että sisäinen rasitus ja muodonmuutokset eivät kasva liian suureksi tietyllä kuormituksella. Sisäiset rasitukset syntyvät kappaleeseen ulkoisten voimien toimesta. Kappale voidaan aina jakaa kahteen osaan, koska sisäisten rasitusten voidaan katsoa kohdistuvan tasopintaan. Leikkauspintaan kohdistuu sisäinen rasitus voiman tai momentin muodossa. Tämä voi olla jossakin kappaleessa tuhoisa kestävyden kannalta. Toisessa tapauksessa se voi olla vaaraton. (Saarineva 1989, 1.2.)

Teräsrakenteen lujuuslaskennan suorittamiseen käytetään COMSOL Multiphysics 5.4 tietokoneohjelmaa. Ohjelmaa käytetään insinöörien ja tiedemiesten toimesta simuloimaan suunniteltuja rakenteita, laitteita ja prosesseja kaikilla tiedealoilla (COMSOL Multiphysics 2024). Simulaatioalustalla pystytään laskemaan fysiikkaa ja mallintamaan kohde. Model Builderilla voidaan mallintaa geometria simulaatioon, mutta se voidaan tehdä myös käyttämällä muita ohjelmia, kuten CAD-ohjelmia. Geometria voidaan tehdä Solidworks 2020-ohjelmalla. Solidworks-mallia voidaan muokata ohjelman sisällä käyttäen Model Builderia (COMSOL Multiphysics Model Builder 2024). Multiphysics-mallinnus tuottaa tarkkoja tuloksia. Mallinnus on hyödyllistä prosessien optimoinnin kannalta, koska se on tehokkaampaa ja tarkempaa kuin prototyyppien testaus ja kokeellisten menetelmien käyttäminen. Designista ja prosessista saadaan syvällisempi ymmärrys, kun sitä voidaan tutkia käytännöllisemmin laboratorioon verrattuna. Tarkat multiphysics-mallit ottavat huomioon suuren määrän käyttöolosuhteita ja fysikaalisia vaikutuksia. Projektin kohdalla tämä merkitsee erilaisten sääolosuhteiden, kuten lumikuorman ja erityisesti

tuulen vaikutuksen huomioonottamista rakenteen rasitusmallinnuksessa. Mallia voidaan optimoida realistisissa olosuhteissa. (COMSOL Multiphysics 2024.)

Lujuuslaskenta voidaan suorittaa myös manuaalisesti. Mekaniikan mallien eli hypoteettisten mallien avulla kuvataan lujuusopissa todellista kohdetta. Laskentaa yksinkertaistetaan mallin vastatessa riittävän hyvin todellisuutta. On olemassa huomattava määrä erilaisia standardeja, ohjeita ja asetuksia, jotka helpottavat mallin muodostamista. Mallin muodostamisessa on olemassa pääkohtia, kuten geometrian yksinkertaistaminen kapaleessa tai rakenteessa, kuormitusten idealisoiminen ja materiaaliominaisuuksien yksinkertaistaminen. Mallinnettaessa todellista rakennetta geometria vaatii aina kolmiulotteisen mallin käyttämistä. Usein vain oleelliset asiat otetaan mukaan. Tämä yksinkertaistaa tilannetta. Lujuusopissa abstrakteilla palkeilla korvataan todellisia palkkeja. Ne eivät ole täydellisiä kopioita todellisista palkeista, vaan vastaavat todellista rakennetta tietyllä tarkkuudella. Usein käytetään myös idealisoituja kuormituksia, tasaisia kuormituksia ja viiva- ja pistekuormituksia todellisten kuormitusten sijasta. Todelliset kuormitukset ovat usein tilastollisia. Yksinkertaistavia malleja käytetään myös kuvaamaan materiaaliominaisuuksia. Mallin käyttökelpoisuus todennetaan kokeellisesti. Mikäli lujuusopillisesti tärkeät ominaisuudet vastaavat riittävän hyvin, voidaan käyttää yksinkertaistavia malleja. Ongelma muodostuu monimutkaisemmaksi ja työläämmäksi mitä tarkemmin todellisuutta vastaavaksi malli muodostetaan. Ratkaiseminen muuttuu kalliimmaksi suuremman työkuorman vuoksi. Lujuusopillisessa ongelmassa mekaniikan malli saattaa olla niin mutkikas, että matemaattisesti ongelmaa ei voida enää tarkasti ratkaista. Tällaisessa tapauksessa muodostetaan laskentamalli. Mekaanisella mallilla saatuja tuloksia sovelletaan todelliseen tilanteeseen. (Outinen, Salmi & Vulli 2007, 16)

4 TUTKIMUSASETELMAN JA MENETELMIEN VALINTA

4.1 Tutkimusasetelma

Projekti on tarkoituksenmukainen kiertotalouden kannalta. Siitä saatavat hiilidioksidipäästöjen vähennykset ovat korkealla tasolla verrattuna muihin kiertotalouden vaihtoehtoihin. Projektin tutkimusongelmana on kiertotalousmateriaalien virtausongelmat siilostossa, sen teräsrakenteen mahdollinen pettäminen ja asentamisen epäonnistuminen. On mahdollista, että jauheen virtaus häiriintyy vääränlaisen suunnittelun seurauksena. On myös mahdollista, että siilostoa ei saada asetettua oikeaan korkeuteen ja ei saada luotua kulkua siiloston hoitotasolle. Yksi suurimmista tutkimusongelmista on teräsrakenteen kestävyys ja mitoitus, jotta se saadaan sovitettua tehtaan kylkeen ahtaassa ympäristössä. On mahdollista, että tilanpuutteen vuoksi riittävän kestävää teräsrakennetta ja syöttölaitteistoa ei saada asennettua. Projektin tutkimuskysymys on siis minkälainen siilosto ja teräsrakenne tarvitaan siiloston toiminnallisuuteen?

4.2 Tutkimusmenetelmien valinta

Siilosuunnittelussa tulee ehkäistä ydinvirtauksen muodostuminen ja jauheen jumiutuminen siilon seinille, sekä jauheen kaareutuminen suuaukon yläpuolelle. Ongelman ratkaisemiseksi on määritettävä oikea kartion kulma ja suuaukon koko (Bulk Solids Portal 2020). On myös mahdollista käyttää fluidisointia, jossa siilon kartion seinämiin puhalletaan paineilmaa estäen jauheen kasaantumisen (Krantz, M. Zhang H. & Zhu, J. 2009). Jauheen virtausominaisuudet vaikuttavat mittojen ja mahdollisen fluidisoinnin valintaan (Bulk Solids Portal 2020). Tutkimusmenetelmäksi valittiin jauheen virtauksen simulointi Camsizer XT- ja Powder Flow Tester-mittalaitteilla. Camsizer XT antaa tuloksen jauheen raejakaumasta ja sen käyttäytymisestä. Tulosta voidaan verrata muihin vastaaviin materiaaleihin. Mikäli uusilla kiertotalousmateriaaleilla on samankaltainen raejakauma jo käytössä olevien materiaalien kanssa voidaan niiden olettaa käyttäyvän samalla tavalla. Lisäksi Powder Flow Tester laskee vaaditun kartiokulman ja suuaukon koon automaattisesti jauheen virtausominaisuuksien testauksen jälkeen. Menetelmä on käytössä Saint-Gobainin aikaisemmissa siilosuunniteluissa. Menetelmä on nopea, luotettava ja kustannustehokas verrattuna siilojen kokeelliseen testaamiseen. Tämän vuoksi menetelmäksi valittiin Camsizer XT:n ja Powder Flow Testerin käyttö.

Teräsrakennesuunnittelussa tulee teräsrakenne paikoittaa tarkasti ja laskea rakenteen kestävyys kaikissa olosuhteissa, jotta rakenne saadaan sovitettua tehdasympäristöön onnistuneesti ja välttämään teräsrakenteen pettämiseltä. Nykyaikaisena menetelmänä käytetään tehdasympäristön laserskannausta ja teräsrakenteen mallintamista tehdasympäristöön tietokoneavusteisesti. Menetelmä simuloi teräsrakennetta kolmiulotteisesti laserskannauksen tuottamassa datajoukossa. Tämä on nopeampaa, tarkempaa ja kustannustehokkaampaa verrattuna manuaaliseen mittaamiseen ja käsin piirtämiseen (Javaid, ym. 2021). Tämän vuoksi tehdasympäristön mallintamiseen valittiin RIEGL VZ-400i ja Navisworks Simulate-ohjelmisto. Teräsrakennesuunnitteluun valittiin Solidworks 2020. Menetelmä on myös käytössä suunnittelutoimistossa, joissa suunnittelu toteutettiin ja se on todettu parhaaksi vaihtoehdoksi monissa vastaavanlaisissa projekteissa.

Lujuuslaskentaan valittiin Comsol Multiphysics 5.4-ohjelmisto. Ohjelma simuloi teräsrakennetta erilaisissa olosuhteissa ja sitä pidetään nykyaikaisena menetelmänä suunnittelutoimistoissa. Laskenta on nopeampaa, halvempaa ja luotettavampaa verrattuna manuaaliseen laskemiseen. Lisäksi saadaan luotettava tulos simuloidessa ääriolosuhteita, kuten tuulta ja lumikuormaa. Ohjelmisto paikantaa kohdat rakenteessa, joissa rasitus on suurin. Tämä tekee tarvittavien muutosten suunnittelusta nopeaa verrattuna muihin menetelmiin. Laskenta suoritettiin ja rakenteen kestävyys varmistettiin yhteistyössä ammattilaisten kanssa.

4.3 Prosessi

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa tutustutaan siilosuunnittelun ja teräsrakennesuunnittelun teoriaan, laitteisiin ja ohjelmistoihin. Jotta suunnittelu voidaan toteuttaa onnistuneesti, pitää taustalla oleva teoria ymmärtää perusteellisesti. Myös tarvittavia laitteita ja ohjelmistoja pitää osata käyttää virheiden välttämiseksi.

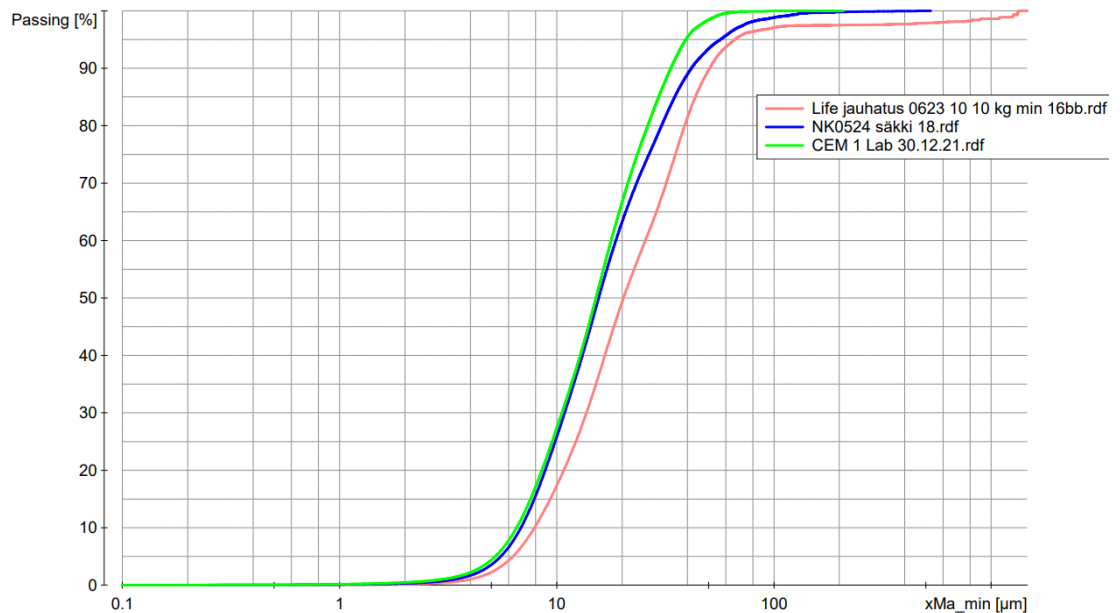
Seuraavassa vaiheessa käydään mittaamassa senkkakuonan ja kivimurskeen virtausominaisuudet Camsizer XT- ja Powder Flow Tester-mittalaitteilla Weberin Paraisten laboratoriossa. Tulosten ja annettujen lähtötietojen perusteella suunnitellaan sillojen kartiokulma ja suuaukon koko.

Tämän jälkeen suoritetaan tehdasympäristön laserskannaus. Tehdasympäristöstä luodaan 3D-malli Navisworks Simulate-ohjelmistoon. Teräsrakenteesta luodaan

prototyyppi ja se liitetään 3D-malliin. Prototyypille suoritetaan lujuuslaskenta ja tehdään tarvittavat muutostyöt.

5 KUONAJAUHEEN JA KIVIMURSKEEN MITTAUS JA TULOKSET

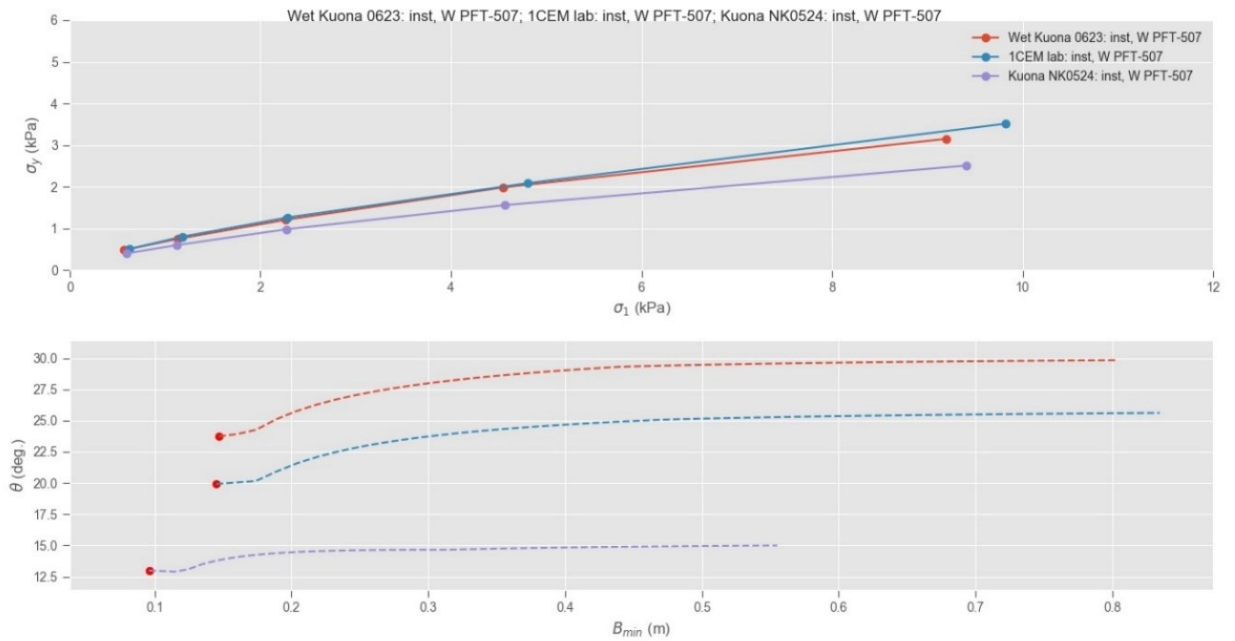
5.1 Kuonan mittaus ja tulokset Camsizer XT:llä



Kuvio 9. Laboratoriomittauksen tulokset Camsizer XT:llä.

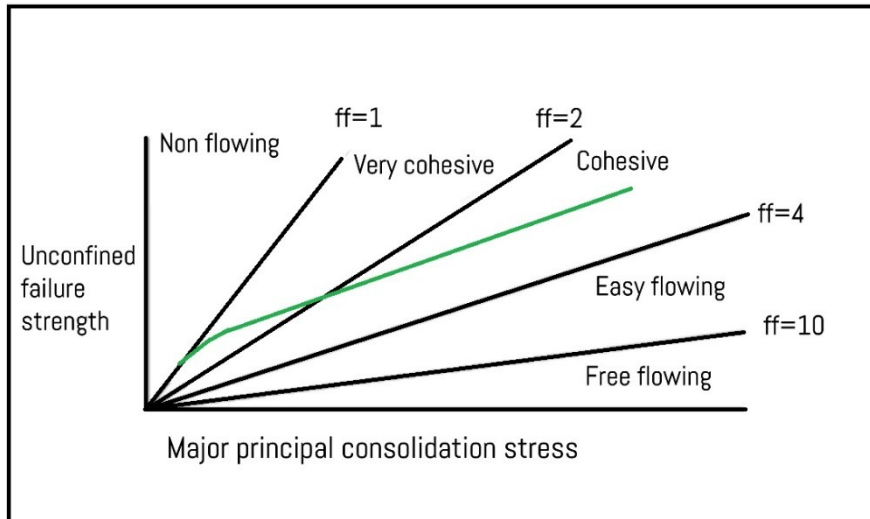
Mittaukset suoritettiin Saint-Gobainin laboratoriossa Paraisilla. Kuviossa 9 näkyy Camsizer XT:n mittaustulokset. Graafin vihreä viiva tarkoittaa CEM 1:stä, sininen tarkoittaa kuivakuonaa ja punainen tarkoittaa märkäkuonaa. 10% läpäisevyydessä CEM 1 on 6,4 mikrometriä, kuivakuona 6,8 mikrometriä ja märkäkuona 8,0 mikrometriä. 50% läpäisevyydessä CEM 1 on 15 mikrometriä, kuivakuona 15,7 mikrometriä ja märkäkuona 20,2 mikrometriä. 90% läpäisevyydessä CEM 1 on 33 mikrometriä, kuivakuona on 41 mikrometriä ja märkäkuona on 50 mikrometriä. Raejakauman perusteella kuonalla on samankaltainen rakenne CEM 1:n kanssa. CEM 1 vaatii jyrkemmän kartiokulman kuin kuona, joten samankaltainen siilo toimii myös kuonan kanssa.

5.2 Kuonan ja betonimurskeen mittaus ja tulokset Powder Flow Testerillä



Kuvio 10. Laboratoriomittauksen tulokset Powder Flow Testerillä.

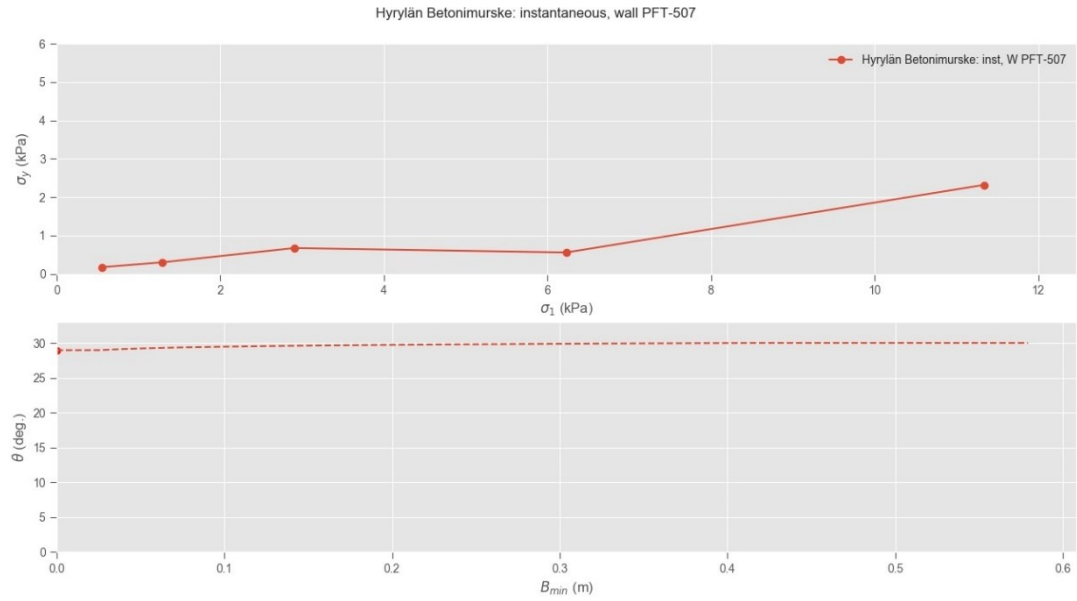
Ylemmässä graafissa (kuvio 10) on esitetty Flow-funktio. Y-akselilla on rajaton murtumislujuus kilopascalina. Tällä tarkoitetaan kuormitusta, joka aikaansaa jauheen virtauksen kuormittamattomalla tasolla sen jälkeen, kun se on puristettu kasaan tietyllä voimakkuudella. X-akselilla on kokoonpuristumiskuormitus kilopascalina. Mitä helpommin jauheen rakenne murtuu, sitä vapaammin virtaavaa se on. Tämä tarkoittaa matalaa käyrää ja korkeampaa Flow-funktio arvoa. Oranssilla viivalla tarkoitetaan märkäkuonaa, sinisellä tarkoitetaan CEM 1:stä ja lilalla tarkoitetaan kuonaa.



Kuvio 11. Jauheen virtaavuus (mukailien Operating Instructions Manual, 39).

Kuviossa 11 on esitetty jauheen virtaus perustuen Flow-funktio arvoon. Mikäli $ff < 1$ voidaan jauhetta pitää virtaamattomana. $1 < ff < 2$ on erittäin koossapysyvä. $2 < ff < 4$ on koossapysyvä. $4 < ff < 10$ on helposti virtaava. $10 < ff$ on vapaasti virtaava. (Operating Instructions Manual, 39.) Flow-funktion perusteella voidaan todeta, että kaikilla jauheilla on suuri ff -arvo ja ovat helposti virtaavia. Erityisesti kuona on helposti virtaavaa, koska sen ff -arvo on suurempi kuin märkäkuonalla ja CEM 1:llä.

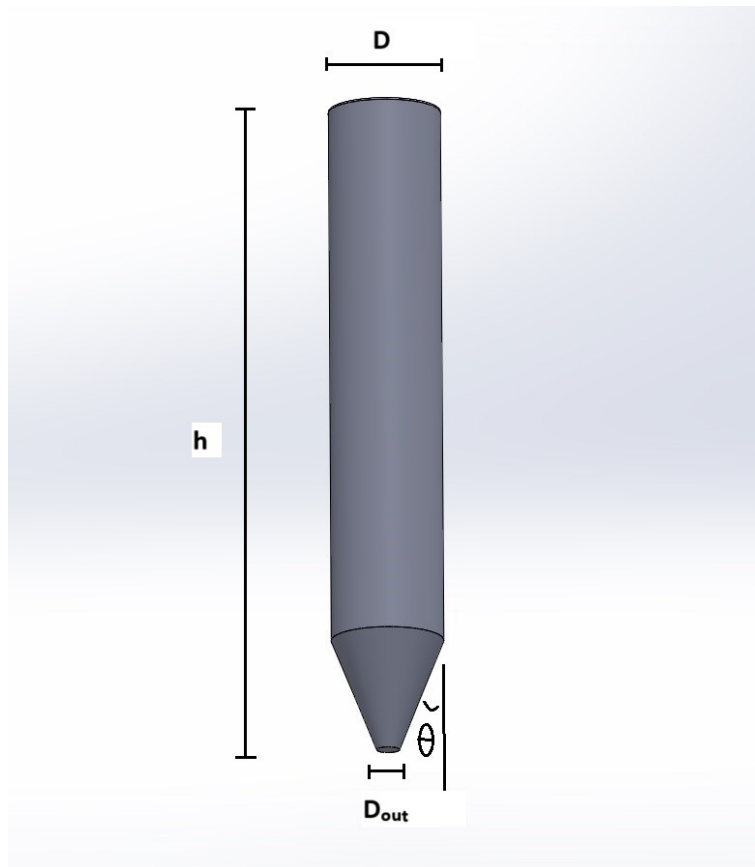
Alemmassa graafissa (kuva 10) y-akselilla on esitetty siilon kartion kulma mitattuna vaakatasosta. X-akselilla on esitetty suuaukon koko. Mikäli suuaukon koko nostetaan kuivakuonalla 20 sentistä 30 senttiin, kartion kulmalla ei ole vaikutusta. 10 sentistä 20 senttiin kartion kulmalla on vaikutusta. Graafin perusteella kuivakuona vaatii 15 asteen siilokulman. CEM 1 vaatii 25 asteen kulman ja märkäkuona 28 asteen kulman.



Kuvio 12. Laboratoriomittauksen tulokset Powder Flow Testerillä.

Viimeisissä graafeissa (kuvio 12) on esitetty Hyrylän betonimurskeen Flow-funktio ja kartion kulma suhteessa suuaukon kokoon. Graafin perusteella voidaan sanoa, että kivi-murske on hyvin virtaavaa. Kartion kulma on pidettävä 30 asteessa ja suuaukon koko minimissään 0,20m. Ohjeistuksen mukaan tulisi rakentaa kaksi samanlaista silloa. Tämän vuoksi kummankin silon kartiokulman tulisi olla 30 astetta vaakatasosta mitattuna.

5.3 Tulosten hyödyntäminen siilosuunnittelussa



Kuvio 13. Siilon mitat Solidworks 2020-ohjelmassa.

Siilolle aikaisemmin määritetyt arvot olivat 3m halkaisija ja noin 100 kuution tilavuus. Kartion kulmaksi määriteltiin minimissään 30 astetta vaakatasosta mitattuna. Tämä on 60 astetta suhteessa y-akseliin. Tasaisen massavirtauksen saavuttamiseksi kulman on kuitenkin oltava huomattavasti jyrkempi kuin mitä testeissä on määritelty minimikulmaksi (kuvio 13). Standardina voidaan käyttää 22,5 asteen kulmaa. Itse siilon tilavuudeksi on annettu noin 100 kuutiota. Tämä tarkoittaa noin 14 metrin lieriön korkeutta. Koko siilon korkeudeksi arvioidaan noin 17 metriä. Korkeus tarkentuu tehtäseen sovittamisen kautta. Suuaukon halkaisijaksi on määritelty vähintään 0,20m, mutta tämä riippuu asennettavan ruuvikuljettimen koosta.

6 TERÄSRAKENNESUUNNITTELU

6.1 Lähtötiedot

Tarkoituksena on suunnitella siilot ja raaka-aineen syöttö- ja annostelulaitteisto vaihtoehtoisten materiaalien tuotantoon. Tehdas ja sen ympäristö mallinnetaan Solidworks- ja BricsCAD-ohjelmistoilla. Mitat saadaan tehtaan 3D-laserskannauksesta. Kun tehdas ja sen ympäristö on tarkasti mitoitettu, saadaan siilot suunniteltua paikoilleen ilman virheitä. Mikäli mallinnuksessa on virheitä vaikuttaa tämä asennuksen tarkkuuteen ja sen onnistumiseen. Rakenteen lujuus lasketaan COMSOL Multiphysics-ohjelmistolla.

Tehdasta lähdettiin mallintamaan vanhojen piirustusten pohjalta. Rakennuksen korkeus on 42 metriä, leveys 16,8 metriä ja pituus 29 metriä. Siilojen ruuvin alaosa tulee kolmannen kerroksen tasolle 15 metriin. Siilon maksimikorkeus on noin 23 metriä sisältäen pohjakartion ja ruuvin, sekä kulun huoltotasoon ylhäältä. Siilon halkaisijaa kavennettiin 3,5 metristä 3 metriin. Näin siilosta saadaan pidemmän mallinen. Tilavuudeksi on suunniteltu noin 100 kuutiota. Siilon maksimihalkaisijaksi on määritelty 4,8 metriä, joka on leveän kuljetuksen raja. Tämä leveys ei ole kuitenkaan tarpeellista, koska pienempikin leveys riittää saavuttamaan halutun sadan kuution tilavuuden. Parempi vaihtoehto on rakentaa kapeampi ja pidempi siilo tehtaan kylkeen. Mikäli lieriön halkaisija on 3 metriä ja korkeus 15 metriä, saadaan tilavuudeksi 106 kuutiota. Jos lieriön korkeus nostetaan 17 metriin, tilavuudeksi tulisi noin 120 kuutiota. Tämä tilavuus on kuitenkin ylimitoitettu. Rakennuksen ylimmistä kerroksista on kuitenkin oltava kulku siilojen katolle hoitotasolle. Kerroksen korkeus on 32 metriä. Koska syöttö siiloista vaa'alle tapahtuu 15 metrin korkeudesta ja kulku ylemmälle hoitotasolle on 34,6 metrin korkeudessa, tulee siilojen korkeudeksi 17,45 metriä. Tämä korkeus mahdollistaa kulun ylemmälle hoitotasolle. Näin ollen siilojen lieriön tilavuudeksi tulee suunniteltu noin 100 kuutiota.

Siilot tulee asentaa vierekkäin annettuun tilaan. Kummankin siilon halkaisija on 3 metriä ja lieriön korkeus 14,45 metriä. Siilojen teräsrakenteet tulee pultata paikan päällä yhteen hitsauksen sijaan. Siilojen täyttö tapahtuu niiden vierestä säiliöautolla, joka pumppaa lisää raaka-ainetta siiloihin syöttöputkien kautta. Teräsrakennetta voidaan madaltaa, mutta korkeus tulee olla suurempi kuin säiliöautolla, jotta pumppaus voidaan suorittaa onnistuneesti. Säiliöauton korkeus purkutilanteessa on 12 metriä ja sen täytyy mahtua esteettömästi teräsrakenteen alle. Syöttöputken tulee olla kaareva, jotta virtaus putkessa

ei häiriinny. Äkkinäiset, suuret erot kaarevuudessa aiheuttavat virtauksen häiriintymisen. Virtaus säiliöautosta tapahtuu paineilmalla. Ylipaineventtiili estää paineen kasaantumisen silloon. Mikäli paine pääsee kasaantumaan aiheuttaa tämä vaaratilanteen. On mahdollista, että silon seinärakenteet pettävät paineen alla ja sillo räjähtää sisäisen paineen vuoksi. Ylipaineventtiiliä käytettäessä tätä ei tapahdu. Mikäli silloon kasaantuu ylipainetta purkautuu se automaattisesti venttiilin kautta. Venttiilin mitoitus määräytyy pumppausnopeuden ja säiliön tilavuuden mukaan. Mitä suurempi pumppausnopeus ja mitä pienempi säiliön tilavuus, sitä suurempi ylipaineventtiili.

Tehtaaseen on tehty samankaltainen muutostyö aikaisemmin, jossa silot asennettiin rakennuksen pätyyn. Uusien sillojen vierestä on pääsy vanhojen sillojen hoitotasolle, sekä vanhojen sillojen hoitotasolle suoraan ulospäin seinästä. Kulkuväylällä ei ole muuta tehtävää, mutta sillojen sovittaminen portaiden viereen on ongelmallista. Kulkutien säilyttäminen uusille silloille ei ole ongelma, mutta kulkuväylä vanhoille silloille osuu suunniteltuun siilostoon ja teräsrakenteeseen. Kuljetin on koko rakennuksen katolle kiertävä kauhakuljetin. Teräsrakenne ei osu kauhakuljettimeen. Sen avulla täytetään muita rakennuksen sisällä olevia silloja.

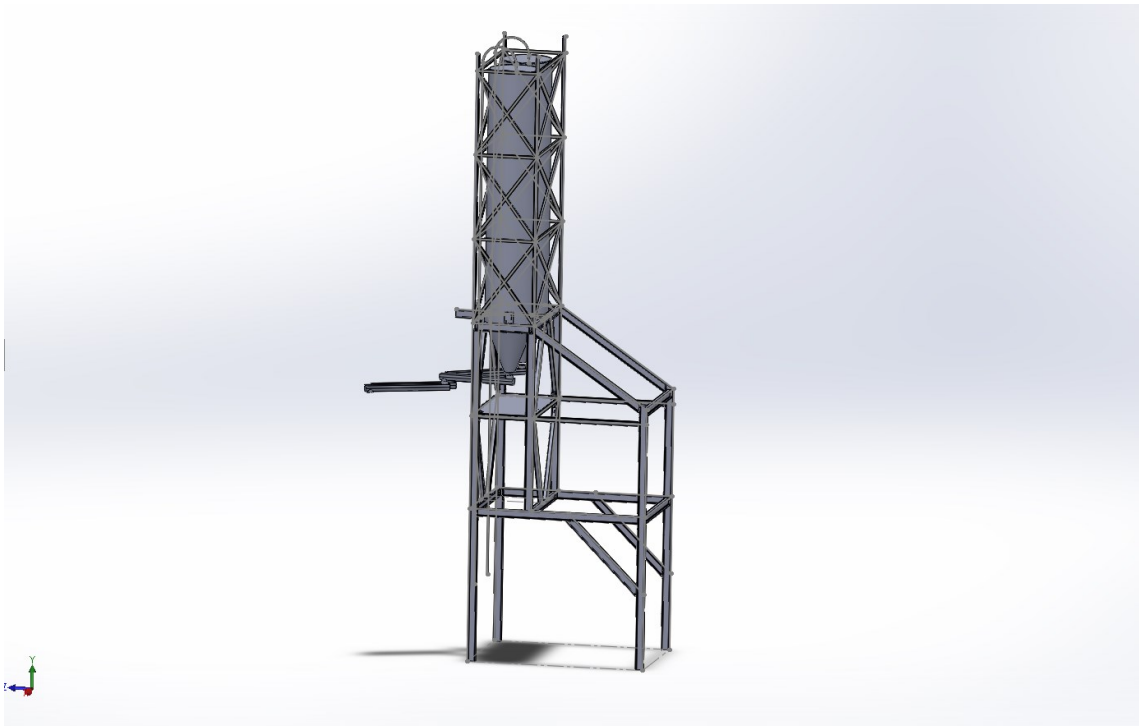
Raaka-aine siirretään uusista kiertotaloussiiloista punnitukseen ruuvikuljettimella. Ruuvikuljettimen nopeus on 15kg sekunnissa. Kiviaineen karkeus on 0-3mm, kuonan karkeus on 0-50 myy. Kummankin silon ruuvit voidaan siis suunnitella 3mm kiviainekselle. Kuljetinruuvissa on oltava välystä sen verran, ettei materiaali kiilaudu ruovin ja putken väliin. Materiaalin tiheys on 1,4-1,7kg/dm³. Etäisyys silon suuaukosta vaa'alle on 8,7m. Ruuvit asennetaan tehtaaseen seinän läpi ja muiden laitteiden ohitse, joten todellinen etäisyys on suurempi. Arvioitu todellinen etäisyys on noin 10m. Kuljetus voidaan suorittaa neljällä erillisellä ruuvilla. Navisworks-mittausten perusteella tarvitaan kaksi 5m ja kaksi 4,5m pitkää kuljetinruuvia. Ruuvikuljettimista tehtiin tarjouspyyntö. Tarjouksen mukaan 5,0m ruovin ja 4,5m ruovin yhteishinnaksi tulisi 44000€. Näin ollen neljän ruovin yhteishinta olisi 88000€.

Teräsrakenteessa on hintaeroja eri palkkien välillä. Palkin tulee olla S355J2 hiiliterästä. IPE 200-palkki maksaa 85,548€/m. Vastaava HEA 200-palkki maksaa 121,972€/m. HEB 200-palkin hinta on 113,673€/m, joten HEA on kaikista palkkeista kallein (Cronvall Oy). IPE-palkki on huomattavasti halvempaa kuin muut vaihtoehdot. Rakenteessa päätettiin kuitenkin käyttää HEA-palkkia, koska siihen on helpompaa liittää kiinnityslappuja ja porata reikiä kiinnitystä varten. Teräsrakenteessa käytetään HEA 450-palkkeja, 250x250x8 putkipalkkeja ja 100x100x5 putkipalkkeja. HEA 450-palkin hinnaksi tulee 252,463€/m,

250x250x8 putkipalkin hinta on 106,10€/m ja 100x100x5 putkipalkin hinta on 24,10€/m (Cronvall Oy). Lisäksi teräsrakenteen yläosassa käytetään HEB 200-palkkeja, joiden hinta on 113,673€/m (Cronvall Oy). Lisävaatimuksena on, että koko rakenne tulee olla tehty pulttiliitoksilla. Tämä tarkoittaa kiinnityslappujen liittämistä rakenteisiin ja niiden pulttaamista yhteen M36-pulteilla.

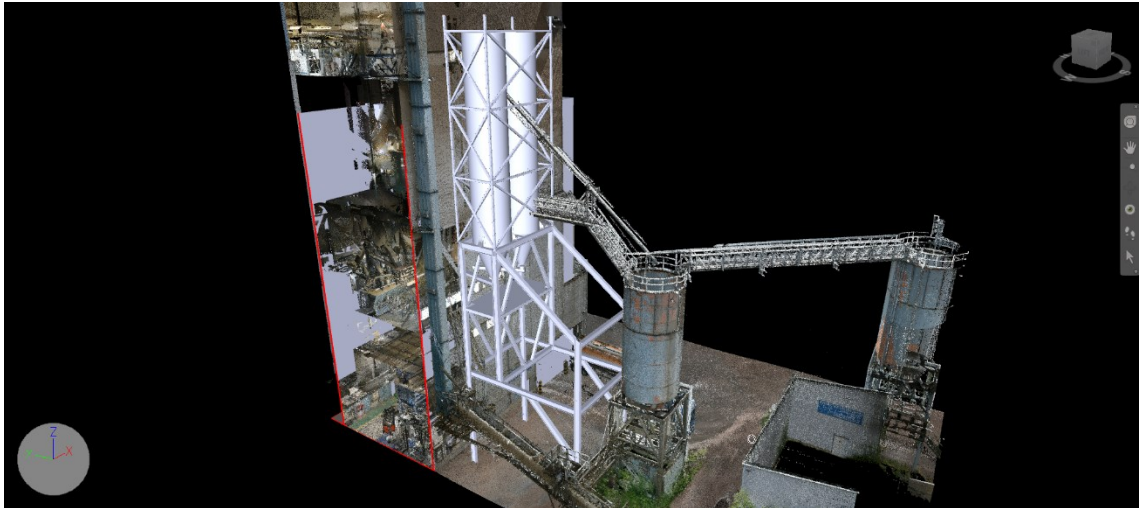
6.2 Suunnittelun eteneminen

Ensimmäisessä vaiheessa suunniteltiin teräsrakenne, joka asettaa siilot oikeaan korkeuteen. Siilojen yläpuolelle huoltotasolle ja ruuvikuljettimiin tulee olla kulku tehtaan sisätiloista.



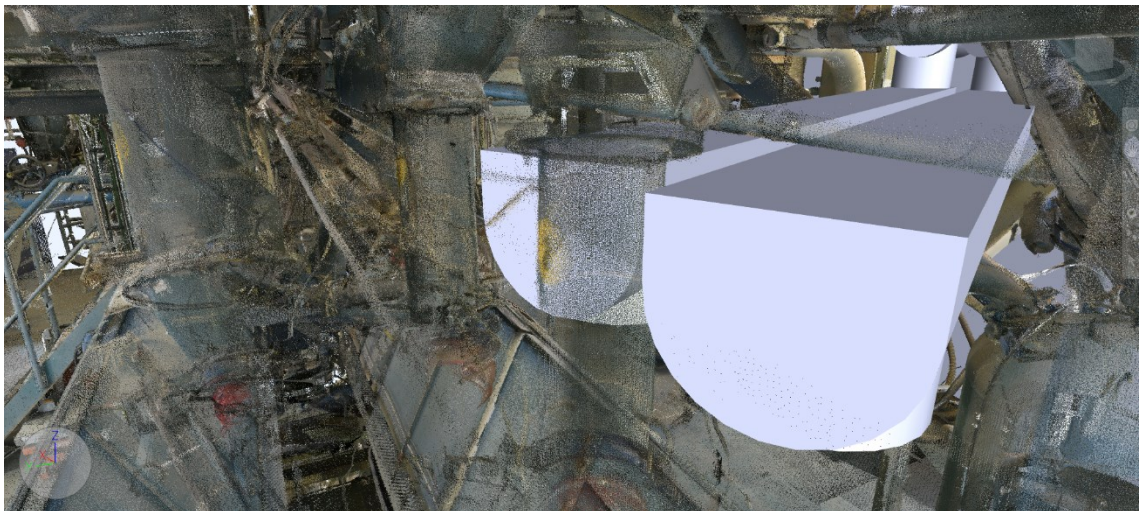
Kuva 1. Ensimmäisiä Solidworks-kokoonpanoja siiloista ja teräsrakenteesta.

Kuvassa 1 teräsrakennetta lähdettiin mallintamaan prototyypin pohjalta, jossa hoitotasot ja ruuvikuljettimet asetettiin oikeaan korkeuteen.



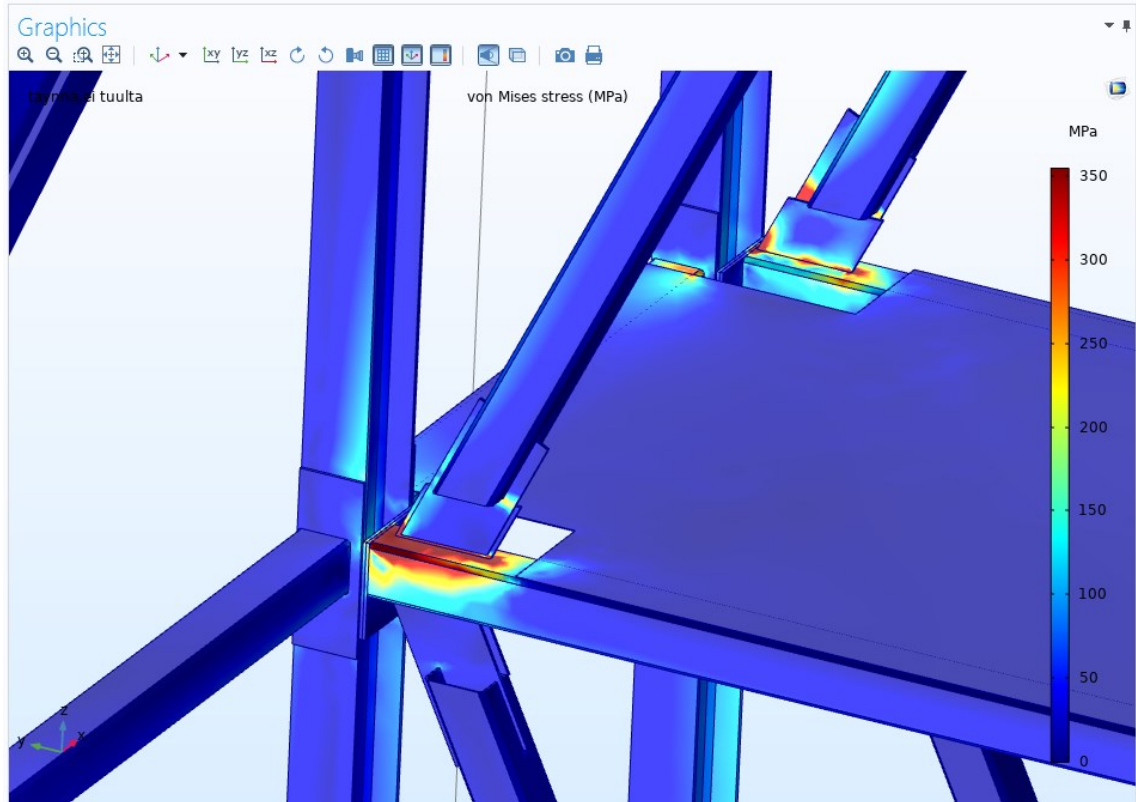
Kuva 2. Tehtaan laserskannauksesta saatu pistepilvi Navisworks-ohjelmassa.

Kuvassa 2 Solidworks-malli teräsrakenteesta ja siloista on liitetty pistepilveen ja asetettu kohdilleen tehtaan kylkeen.



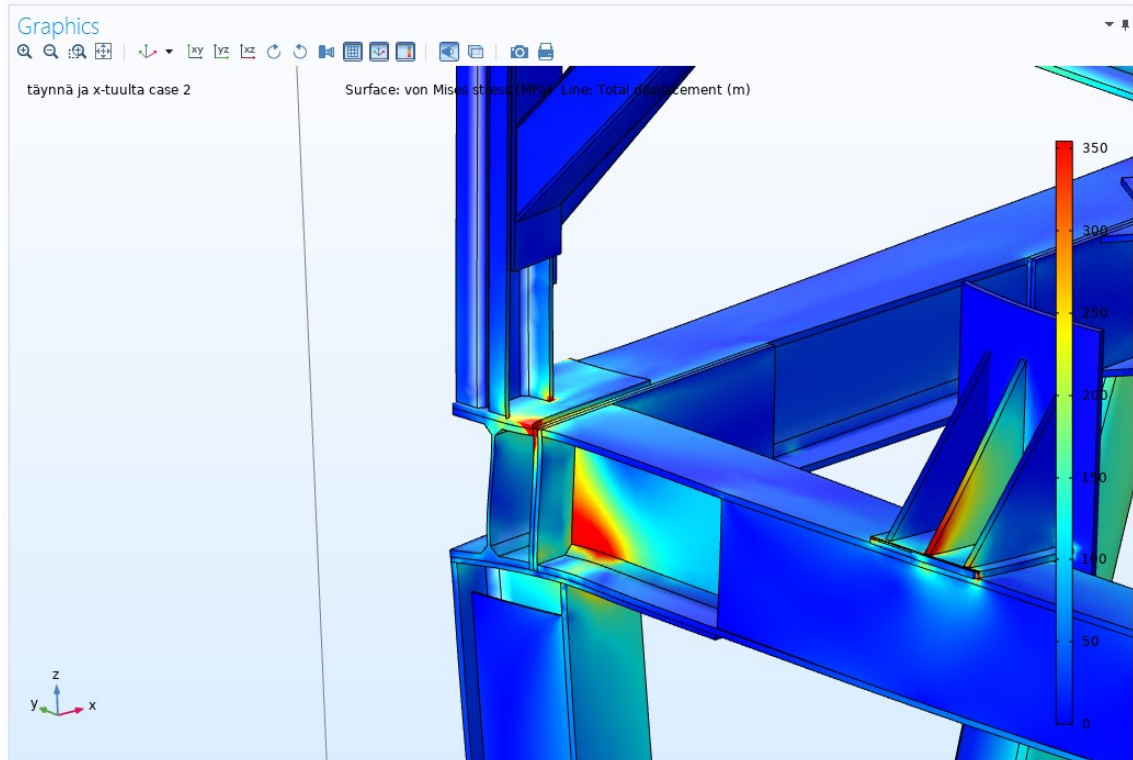
Kuva 3. Ruuvikuljettimien asettelu.

Kuvassa 3 ensimmäiset kuljettimet tuodaan läpi tehtaan ulkoseinästä ja toiset jatkavat materiaalin kuljetusta vaa'alle. Kerros, jossa vaaka sijaitsee on täynnä putkia ja säiliöitä. Kyseinen valinta ruuvikuljettimien asennukseen on ainoa vaihtoehto ilman suurempia muutostöitä.



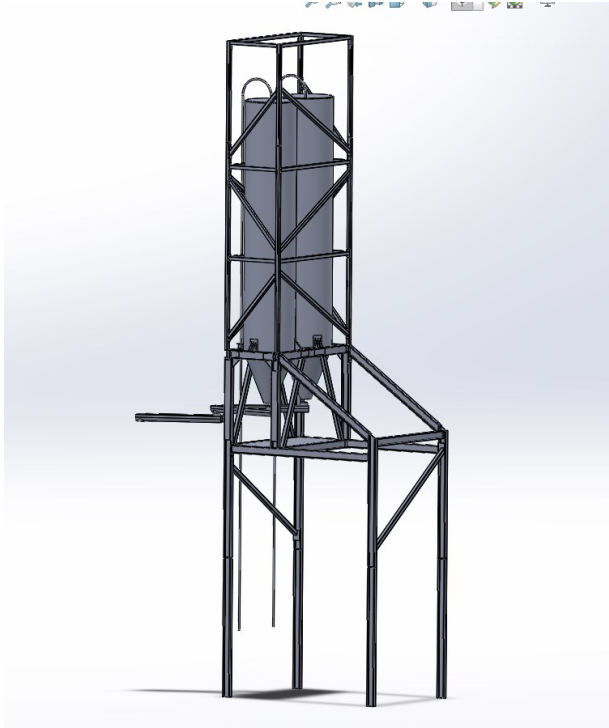
Kuva 4. Välipalkit Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 4 välipalkkien lappuliitântä todettiin kestävämmäksi lujuuslaskennassa. Kun siilot ovat täynnä ja rakenteeseen ei kohdistu tuulta, laskentaohjelma ilmoitti lappujen ja palkin välisen liitântään kohdistuvan 350MPa rasituksen, joka ylittää sallitun rajan. Muutostyönä palkkien liitântä asetettiin lähtemään suoraan vaakapalkista.



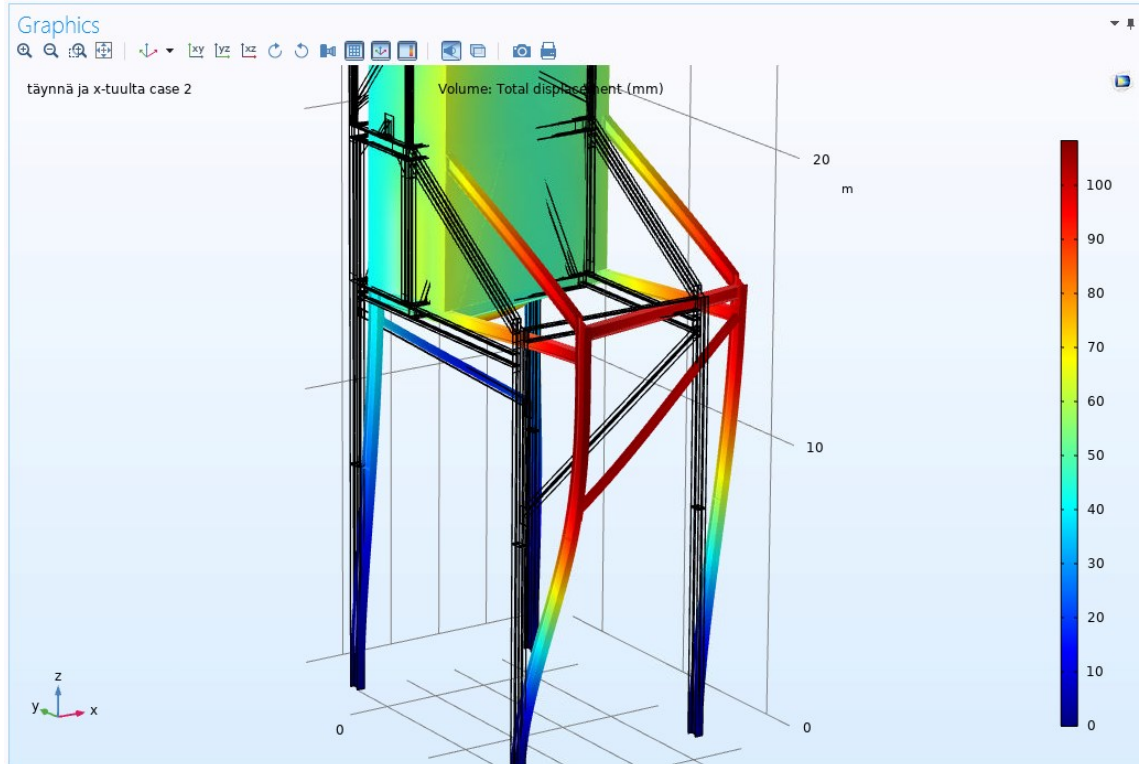
Kuva 5. Yläkulman vinopalkki Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 5 toinen sallitun rajan ylittävä rasitus kohdistui teräsrakenteen yläkulmasta lähtevään vinopalkkiin. Ratkaisuna palkin alapuolelle asennettiin 15mm paksuinen kolmiotuki, jonka todettiin toimivan erinomaisesti.



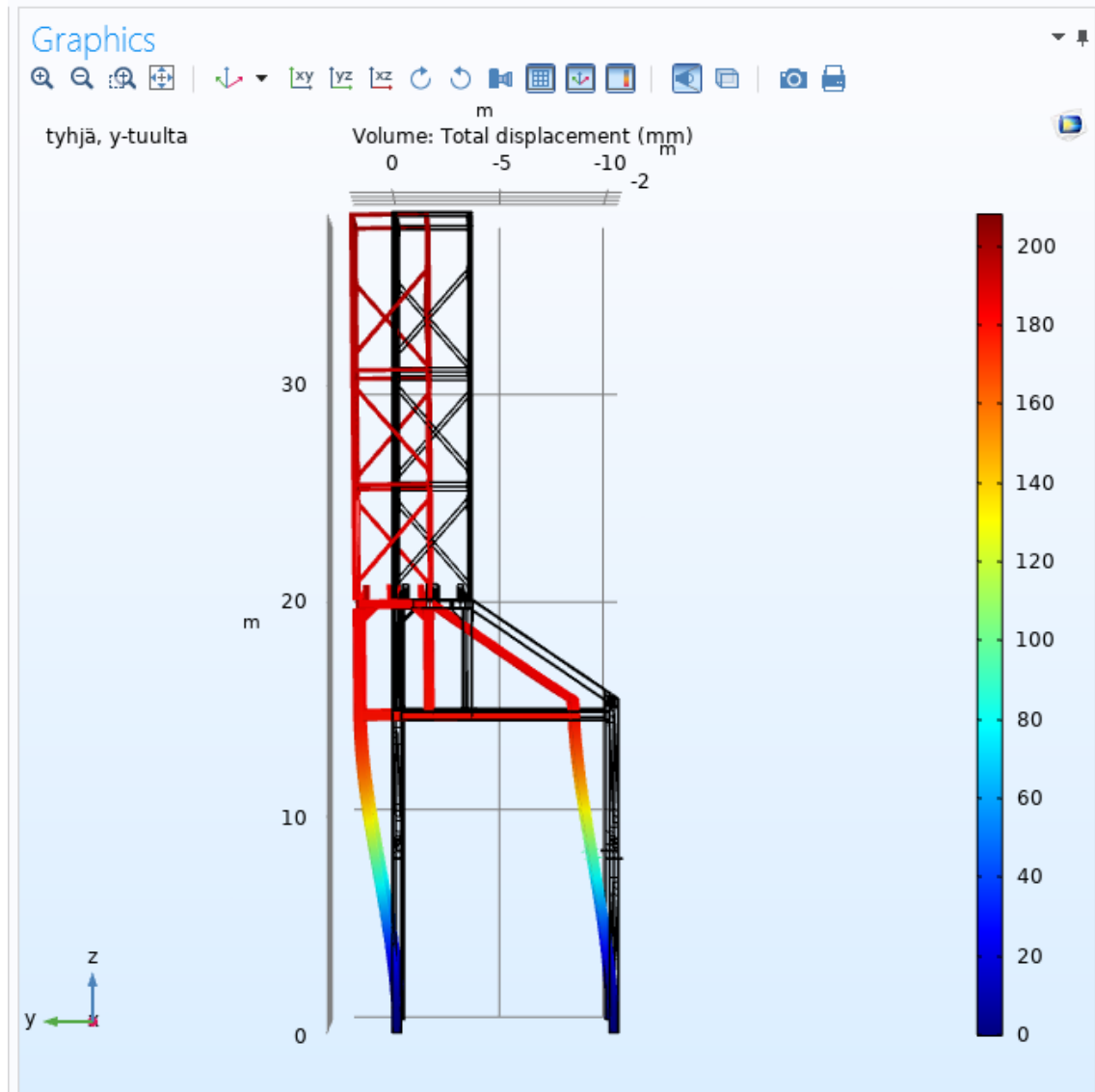
Kuva 6. Teräsrakenteen Solidworks-kokoonpano välivaiheessa.

Kuvassa 6 näkyy vaihe, jossa rakenteen jalkojen väliset tuet jouduttiin poistamaan y-suunnassa säiliöauton purkukorkeuden vuoksi (12m). Laskennassa todettiin, että jalkojen maksimivienymä väheni 140mm -> 110mm vinotukien lisäämisen seurauksena. Jalcoihin lisätään vaakapalkit ja sen lisäksi vinopalkki vaakapalkin alapuolelle.



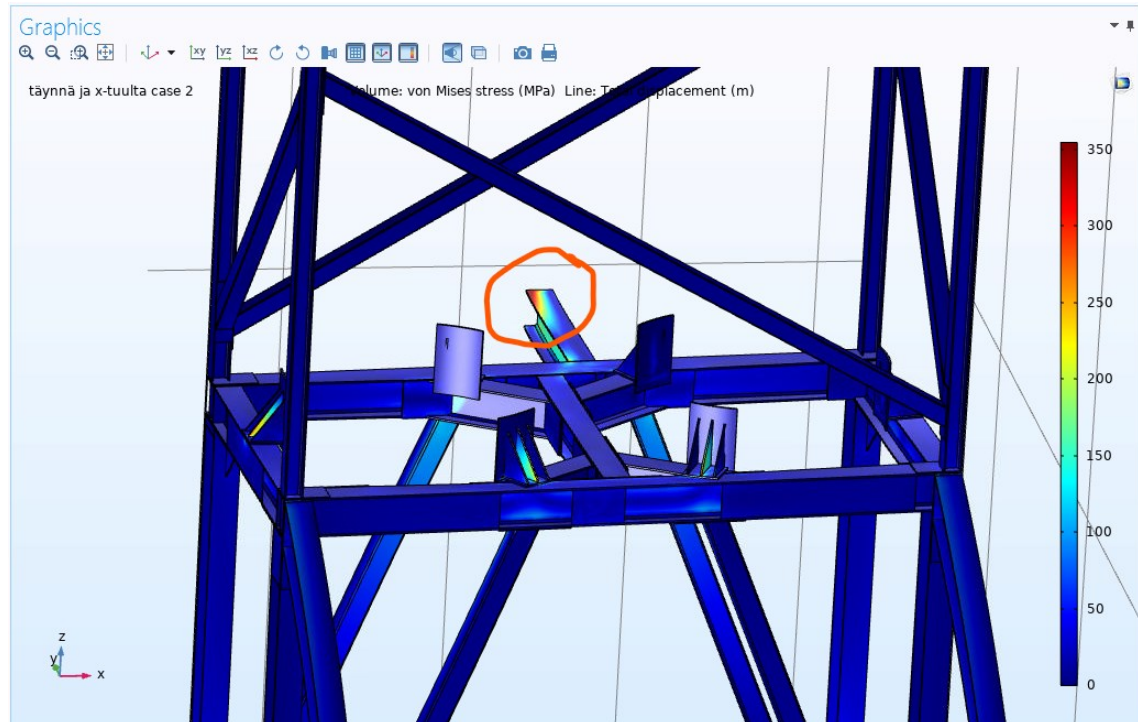
Kuva 7. X-suuntainen tuuli Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 7 ongelmaksi kuitenkin muodostui x-suuntainen tuuli, joka aiheutti jalkojen yläosaan huomattavaa yli 100mm venymää. Tämä on yli sallitun rajan.



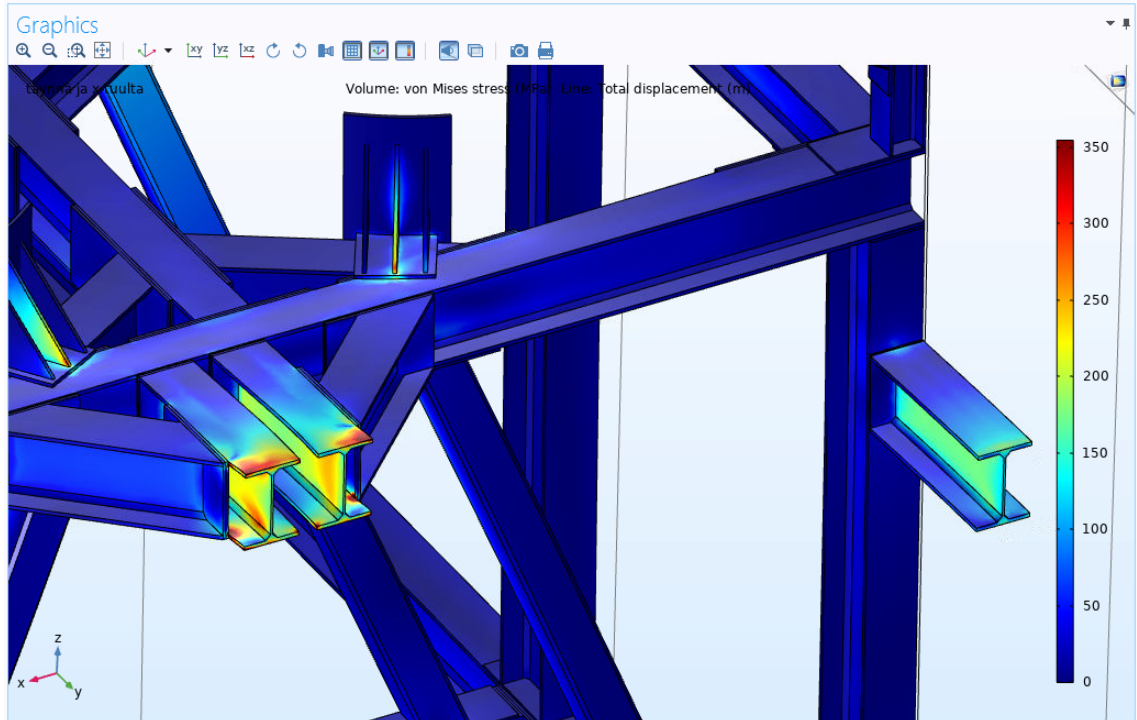
Kuva 8. Y-suuntainen tuuli Cmsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Sama huomattiin myös kuvassa 8 y-suuntaisen tuulen osuessa rakenteeseen. Venymä on y-suunnassa yhteensä noin 200mm, joka on yli sallitun rajan.



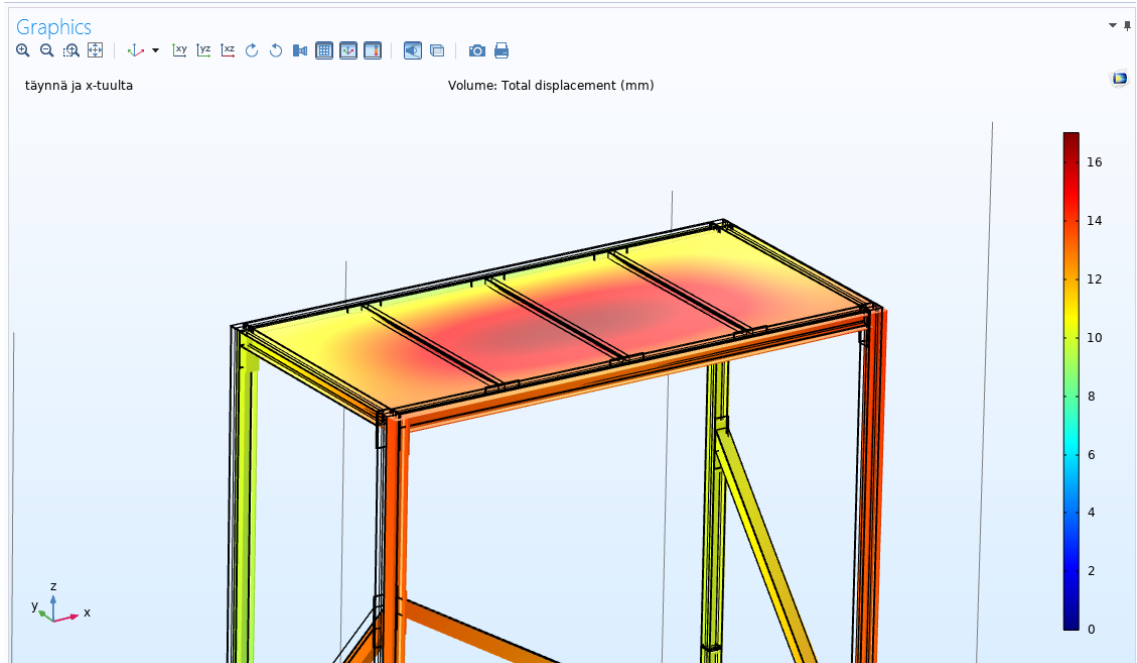
Kuva 9. Tukipalkki Comsol Multiphysics 54-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 9 ratkaisuksi yritettiin tukea teräsrakenne tehtaan seinän sisällä olevaan pystypalkkiin. Todettiin, että rakenne kestää. Maksimivenymä laski 30 millimetriin. Rakenteseen ei kohdistu merkittävää rasiutusta. Seinätuki esti venymän syntymisen tehokkaasti, mutta palkki, joka oli hitsattu seinän pystypalkkiin ei kestänyt rasiutusta. Tuloksena 350MPa rasiutus, joka on kestäättömällä tasolla.



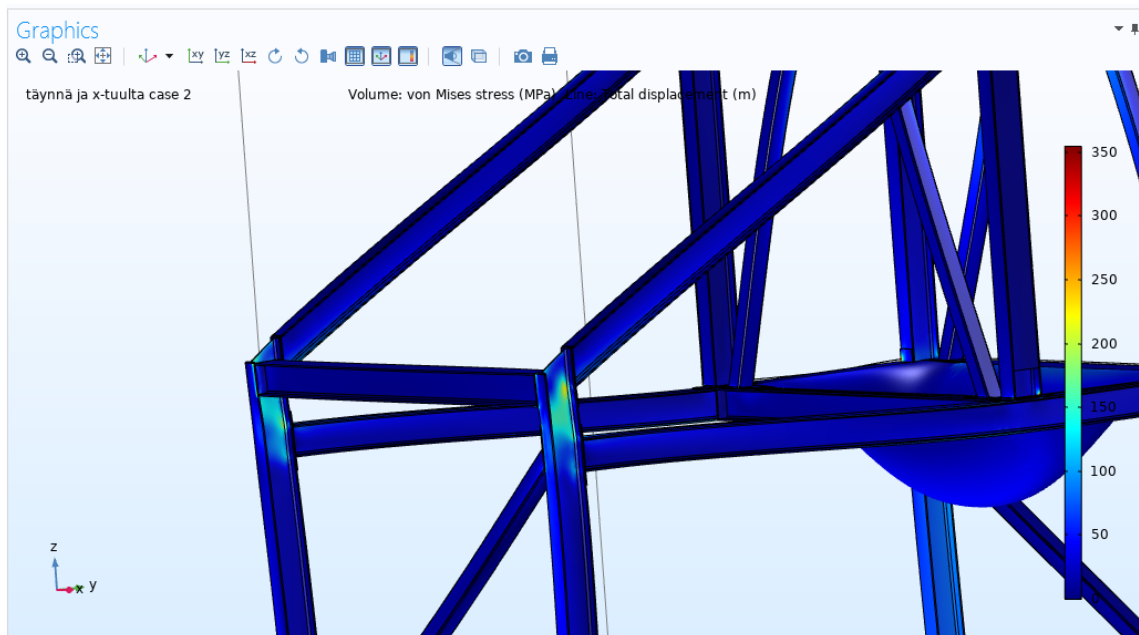
Kuva 10. Tukipalkit Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 10 tilannetta yritettiin korjata asentamalla tuplasti palkkeja ja niihin vinopalkit, sekä ylimääräinen palkki(oikealla) toiseen seinän sisäiseen palkkiin rasituksen jakamiseksi. Myöskään tämä ei kestänyt liitántään kohdistuvaa vetoa. Laskennan mukaan liitántään kohdistuu yli 30 tonnin veto. Rasitus on kestämatön ja ainut ratkaisu oli luopua tuennasta tehtaan seinän sisäiseen pystypalkkiin. Teräsrakenteen on pystyttävä kannattelemaan itsensä, koska liitos seinän pystypalkkiin ei ole mahdollista kestävyiden kannalta. On myös erittäin kyseenalaista, kestääkö tehtaan seinän pystypalkki 30 tonnin vetoa. On mahdollista, että veto aiheuttaa vaurion tehtaan rakenteisiin.



Kuva 11. Teräsrakenteen katto Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa

Lujuuslaskennassa huomattiin, että teräsrakenteen katto ei kestä talvisin aiheutuvaa lumikuormaa (kuva 11). Lumimassa aiheuttaa huomattavaa venymää ja painuu katosta läpi. Ratkaisuksi lisättiin vinopalkkien määrää katolle ja tämä korjasi tilanteen. Lisäksi alempi hoitotaso tuetaan vinopalkeilla.



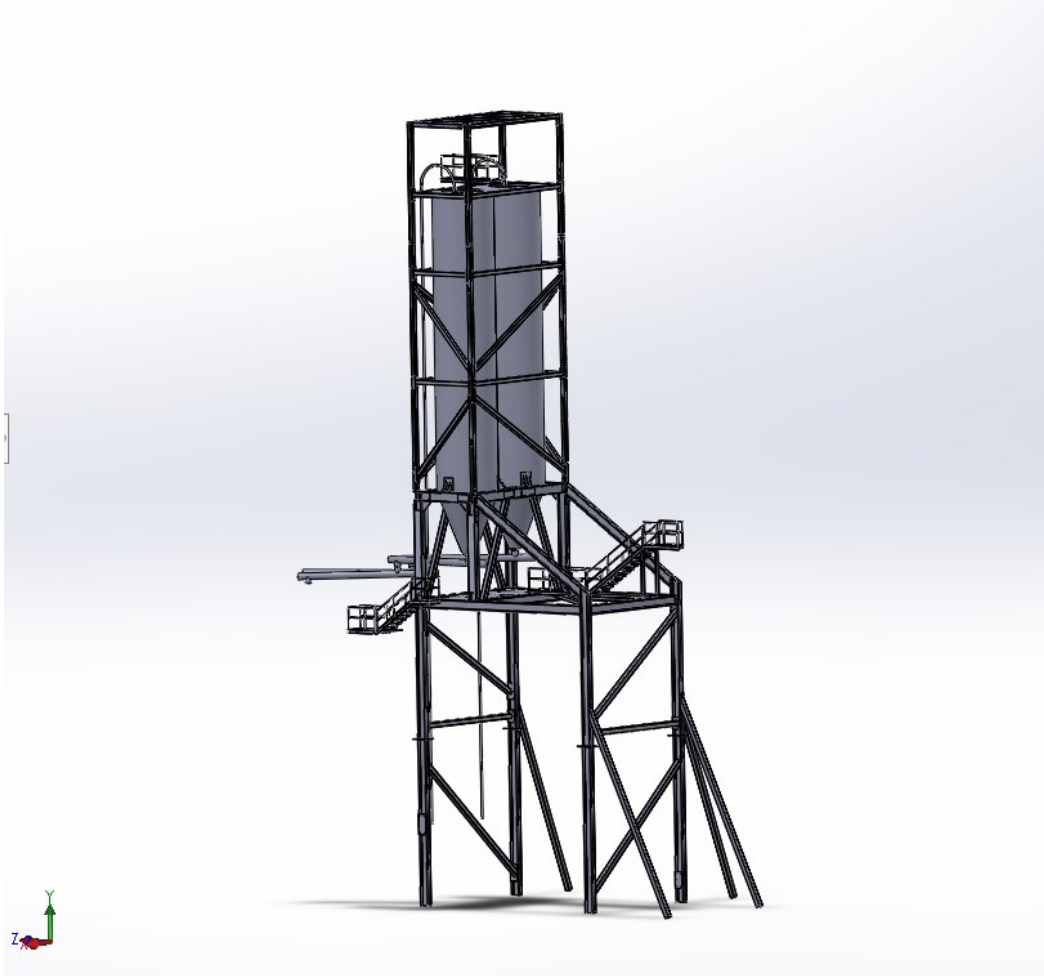
Kuva 12. Teräsrakenteen etukulma Comsol Multiphysics 5.4-lujuustarkastelussa.

Kuvassa 12 rasitusta kohdistui myös kaukaisimpaan etukulmaan. Ratkaisuksi pienennettiin kulman palkkien välistä etäisyyttä. Lisäksi kiinnityslappuja paranneltiin suunnitelmalla pulttikiinnitys palkin molemmille puolille. Tuloksena kaukaisempaan etukulmaan kohdistuva rasitus väheni huomattavasti.



Kuva 13. Päivitetty Solidworks-kokoonpano teräsrakenteesta.

Päivityksessä teräsrakenteessa näkyvät muutokset, kuten vinotukien lisäys jaloista maahan (kuva 13). Tämä estää rakenteen venymää sivuille tuulikuormassa. Rakenne kantaa itsensä ja on todettu kestäväksi laskennassa. Rakenteen kokonaiskorkeus on 38015mm eli noin 38 metriä. Leveys x-suunnassa on 16045mm eli noin 16 metriä. Pituus z-suunnassa on 15164mm eli noin 15 metriä. Siilojen päälle suunniteltiin hoitotason kävelyalusta. Myös jalkojen välisiä tukipalkkeja on lisätty x-suunnassa kolme kummallekin puolelle. Tämä ei estä rekan kuorman purkamista rakenteen alapuolella. Lisäksi jalat jaettiin kahteen osaan lappuliitoksilla, jotta palkit pystytään kuljettamaan tehtaalle normaalilla pitkällä kuljetuksella.



Kuva 14. Teräsrakenteen lopullinen Solidworks-kokoonpano.

Lopullisessa versiossa teräsrakenteeseen asetettiin syöttöputket oikeille paikoilleen ja lisättiin kulkuväylät hoitotasolle (kuva 14). Ylimmälle hoitotasolle kulku tapahtuu tehtaan ylimmästä kerroksesta. Alemmalle hoitotasolle pääsee tehtaan kolmannesta kerroksesta, jossa vaakakin sijaitsee. Vasemman takajalan vinotuki jouduttiin tilanpuutteen vuoksi poistamaan, mutta se ei vaikuttanut ratkaisevasti rakenteen lujuuteen. Lisäksi etummaisten jalkojen vinotuki käännettiin toisinpäin, jotta se ei häiritse kulkua edessä olevasta tilasta.



Kuva 15. Valmis teräsrakenne Navisworks-ohjelmassa.

Kuvassa 15 on valmis teräsrakenne sijoitettuna tehtaan kylkeen Navisworks-ohjelmassa. Vanha kulkusilta keskellä näkyvän siilon hoitotasolle puretaan ja tilalle asennetaan uusi kulkusilta teräsrakenteesta. Kulkutasojen tulee olla toisesta päästä vapaasti liikkuvia teräsrakenteessa äärimmäisessä tuulessa esiintyvän venymän vuoksi, joka on maksimissaan 112mm. Kiinteä liitântä ei kestä heilahduksen aiheuttamaa voimaa. Lisäksi siilosto ja hoitotasot muutetaan sisätilaksi vuoraamalla tila Ruukin Sandwich-paneelilla.



Kuva 16. Valmis teräs rakenne Navisworks-ohjelmassa.

Kuvassa 16 valmis teräs rakenne ja siilosto hieman ylempää kuvakulmasta.

7 PROJEKTIN LOPPUTULOS

Opinnäytetyössä tuotiin esiin kiertotalouden mahdollisuuksia ja teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämistä. Erityisesti paneuduttiin erilaisten kuona-aineiden uudelleenkäyttömahdollisuuksiin. Projektin kannalta oleellinen kuona-aine oli terästehtaan senkkakuona, joka vähentää huomattavasti sementin valmistuksessa syntyviä kasvihuonepäästöjä. Kuonajauheen ja kivimurskeen ominaisuuksien testauksessa saatiin mielenkiintoisia tuloksia. Kuonajauhe on selkeästi paremmin virtaavaa verrattuna muihin materiaaleihin. Tulosten pohjalta suunniteltiin kuonajauheelle ja kivimurskeelle oikeaoppinen siilosto. Tämän lisäksi tutustuttiin teräsrakennesuunnittelussa käytettyihin ohjelmistoihin ja itse suunnittelua päästiin seuraamaan vaihe vaiheelta. Lujuuslaskennassa huomattiin monia liiallisen kuormituksen alaisena olevia rakenteita, joita suunniteltiin uudestaan projektin edetessä.

Projektin tutkimuskysymyksiin pystyttiin vastaamaan erinomaisesti. Tehtaaseen on mahdollista liittää toimiva kiertotaloussiilosto. Suunnittelu toteutettiin käyttämällä jauheen virtausta simuloivia menetelmiä laboratorio-olosuhteissa, joiden avulla määriteltiin siilosten oikea mitoitus. Teräsrakennesuunnitteluun käytettiin tietokoneavusteisia menetelmiä. Tehtaan 3D-laserskannukseen kului noin kuusi tuntia ja tehdasympäristö saatiin kuvattua kaikista kerroksista ja useista kuvakulmista. Suurin haaste oli teräsrakennesuunnittelussa, jonka avulla siilosto asetettiin oikeaan korkeuteen. Prototyyppeihin tehtiin useita muutoksia projektin edetessä, jotta se saatiin kestäväksi lujuustarkastelussa. Tulokset ja niistä saatava taloudellinen hyöty olivat erinomaisia.

Tuloksia voidaan vastaisuudessa hyödyntää kaikissa vastaavaa kuonajauhetta tai kivimursketta käyttävissä siiloissa. Lisäksi suunniteltua teräsrakennetta voidaan käyttää mallina kaikissa rakennuksen kylkeen liitettävissä siilostoissa. Lisää tutkimus- ja kehittämistyötä tarvitaan teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämiseksi kiertotaloudessa. On olemassa sivuvirtoja, joita ei vielä mahdollisesti ole löydetty ja joita ei vielä pystytä täysin hyödyntämään.

LÄHTEET

Euroopan parlamentti 2023. Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä? Viitattu 16.8.2024. <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>.

Kiertotalous-Suomi 2024. Kiertotalous vie yhteiskuntaa kestäväen kehityksen polulle. Viitattu 16.8.2024. <https://kiertotaloussuomi.fi/tieto/kiertotalous/>.

Tilastokeskus 2024. Kiertotalous. Viitattu 16.8.2024. <https://stat.fi/tup/kiertotalous/index.html>.

Kiertotalousosaamiskeskus 2024. Yleistä kiertotaloudesta. Viitattu 16.8.2024. <https://www.kiertotalousosaamiskeskus.fi/mita-kiertotalous-on/>.

Euroopan komissio 2024. Circular economy. Viitattu 16.8.2024. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.

Ragossnig A. M. & Schneider D. R. 2019. Circular economy, recycling and end-of-waste. Volume 37, Issue 2. Sage Journals. Viitattu 19.8.2024. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X19826776?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:cross-ref.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed.

European Environment Agency 2024. Teollisuus. Viitattu 16.8.2024. <https://www.eea.europa.eu/fi/themes/industry/intro>.

Eurooppa-neuvosto 2024. Teollisuuden päästöt. Viitattu 16.8.2024. <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/industrial-emissions/>.

Ellen MacArthur Foundation 2013. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation.

Tilastokeskus 2024. Kiertotalousliiketoiminnan indikaattorit. Viitattu 15.8.2024. <https://stat.fi/tup/kiertotalous/kiertotalousliiketoiminnan-indikaattorit.html>.

Kaariaho T. & Pirtonen H. 2022. Kiertotalous edistyy Suomessa hitaasti – merkittävimmät askeleet kohti asetettuja tavoitteita ovat vielä ottamatta. Tilastokeskus. Viitattu 13.9.2024. <https://stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2022/kiertotalous-edistyy-suomessa-hitaasti-merkittavimmat-askeleet-kohti-asetettuja-tavoitteita-ovat-viela-ottamatta>.

Gaia Consulting 2020. Teollisen tuotannon sivuvirtojen potentiaali kiertotaloudessa. Kierrätysteollisuus. Viitattu 14.8.2024. https://kierratysteollisuus.fi/wp-content/uploads/2020/09/Raportti_-_Teollisuuden_sivuvirtojen_potentiaali_kiertotaloudessa.pdf.

Raahen kaupunki 2023. Saint-Gobain Finland Oy:n Raahen kuonanjalostustehtaan ympäristön-suojelulain mukainen lupahakemus. Raahen kaupunki.

Saint-Gobain Finland 2024. Sisäinen esitys senkkakuonan jalostuksesta. Saint-Gobain Finland Oy.

Jenike, A.W.: Gravity Flow of Bulk Solids. University of Utah Engineering Experiment Station, Bulletin No. 108, 1961

Bulk Solids Portal 2020. SILO DESIGN: AVOIDING FLOW PROBLEMS THROUGH ADEQUATE DESIGN. Viitattu 15.8.2024. <https://www.bulksolids-portal.com/article/8408/silo-design-avoiding-flow-problems-through-adequate-design.html#:~:text=To%20prevent%20flow%20problems%20in%20a%20silo%2C%20proper,hopper%20lets%20the%20product%20converge%20to%20the%20opening>.

Krantz, M. Zhang H. & Zhu, J. 2009. Characterization of powder flow: Static and dynamic testing. Powder Technology Volume 194, Issue 3, Pages 239-245. Department of Chemical and Biochemical Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada: Elsevier. Viitattu 25.8.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591009003064>.

Brookfield Engineering 2024. What is Powder Flow Analysis? Viitattu 21.8.2024. <https://www.brookfieldengineering.com/brookfield-university/learning-center/learn-about-powder-flow-analysis/what-is-powder-flow-analysis>.

Brookfield Powder Flow Tester Operating Instructions 2024. Manual No. M09-1200. Brookfield Engineering.

Lauren, W. 2017. Powder characterization and silo design. Master's thesis. Faculty of Science and Engineering. Turku, Åbo Akademi University.

Microtrac Particle Characterization 2024. Analysis of Particle Size Distribution. Viitattu 23.8.2024. <https://www.microtrac.com/knowledge/particle-size-distribution/>.

Microtrac 2024. Dynamic image analysis. Viitattu 18.3.2024. <https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/dynamic-image-analysis/>.

Arora, N.; Kumar, A. & Singal, K. 2022. Measurement of sediment particle size distribution and shape using dynamic imaging analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Purpose-Led Publishing. Viitattu 25.9.2024. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1079/1/012063/pdf>.

Sarcar, M. M. M.; Rao, K. M. & Narayan, K. L. 2008. Computer Aided Design and Manufacturing. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited. Viitattu 10.9.2024. https://books.google.fi/books?hl=en&lr=&id=zXdivq93WIUC&oi=fnd&pg=PR23&dq=cad+computer+aided+design&ots=sk6QJ8qbBd&sig=g--0kZIBz3n70MA_I0t_YFjs9Fw&redir_esc=y#v=onepage&q=cad%20computer%20aided%20design&f=false.

Haleem, A.; Javaid, M.; Singh, R.; Shanay, R.; Suman, R.; Kumar, L. & Khan, I. 2022. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. International Journal of Cognitive Computing in Engineering Volume 3, June 2022, Pages 161-171. Chinese Roots Global Impact. Viitattu 11.9.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666307422000171>.

Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R. & Suman, R. 2021. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications. Sensors International Volume 2. Chinese Roots Global Impact. Viitattu 3.9.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666351121000358>.

Autodesk Navisworks 2024. Navisworks: 3D model review, coordination, and clash detection. Viitattu 26.8.2024. <https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.

Saarineva, J. 1989. Lujuusoppi. Tampere: Tampereen Pikakopio Oy.

COMSOL Multiphysics Simulation Software 2024, Understand, Predict, and Optimize Real-World Designs, Devices, and Processes with Simulation. Viitattu 3.9.2024. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.

COMSOL Multiphysics Model Builder 2024. Model Builder Features and Functionality. Viitattu 3.9.2024. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics/model-builder>.

Outinen, H. Salmi, T. & Vulli, P. 2007. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy.

Cronvall Oy 2024. HEA 450 Palkki S355J2 Hiiliteräs. Viitattu: 1.9.2024. https://www.cronvall.fi/ep-ages/CronvallShop.sf/fi_FI/?ObjectID=712419.

Cronvall Oy 2024. Putkipalkki S355J2H (RHS) 250x250x8mm. Viitattu 1.9.2024. https://www.cronvall.fi/epages/CronvallShop.sf/fi_FI/?ObjectID=714693.

Cronvall Oy 2024. Putkipalkki S355J2H (RHS) 100x100x5mm. Viitattu 1.9.2024. https://www.cronvall.fi/epages/CronvallShop.sf/fi_FI/?ObjectID=683525.

Cronvall Oy 2024. HEB 200 Palkki S355J2 Hiiliteräs. Viitattu 1.9.2024. https://www.cronvall.fi/epages/CronvallShop.sf/fi_FI/?ObjectID=68314