

Modulaaristen kannakkeiden vaikutus suunnittelun ja asennuksen tehokkuuteen prosessilaitosprojekteissa

Turun yliopisto

Kone- ja materiaalitekniikan laitos

Konetekniikka

Diplomityö

Laatija:

Kristian Suominen, BEng

Ohjaajat:

Jussi Kantola, PhD (IE), DSc, Turun yliopisto

Sönke Peschka, MSc, Valmet Technologies Oy

30.1.2026

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Diplomityö
Kone- ja materiaalitekniikan laitos, Teknillinen tiedekunta
Turun yliopisto

Koulutus: Konetekniikka
Tekijä: Kristian Suominen, BEng
Otsikko: Modulaaristen kannakkeiden vaikutus suunnittelun ja asennuksen tehokkuuteen prosessilaitosprojekteissa
Ohjaajat: Jussi Kantola, PhD (IE), DSc, Turun yliopisto
Sönke Peschka, MSc, Valmet Technologies Oy
Sivumäärä: 82 sivua, joista lähteet 6 sivua, liitteet 6 sivua
Päivämäärä: 30.1.2026

Prosessilaitosprojekteissa putkistojen kannakointi on keskeinen osa laitossuunnittelua, ja erityisesti sekundäärikannakeratkaisujen valinnalla on vaikutuksia suunnittelun tehokkuuteen, toteutettavuuteen ja projektin kokonaiskustannuksiin. Perinteisesti sekundäärikannakkeet on toteutettu rakenneteräksestä hitsattuina, mutta modulaariset kannakeratkaisut ovat yleistyneet vaihtoehtoiseksi toteutustavaksi. Tässä diplomityössä tarkastellaan, voidaanko modulaaristen kannakeratkaisujen avulla parantaa suunnittelun tehokkuutta, laatua ja taloudellisuutta sekä vähentää rakennusvaiheen korjaustyön tarvetta ja tehostaa asennusta prosessilaitosprojekteissa.

Tutkimus toteutettiin sekamenetelmällisenä tutkimuksena, jossa yhdistettiin määrällisiä ja laadullisia aineistoja. Määrällinen aineisto kerättiin kontrolloitujen suunnittelu-aikakokeiden avulla, joissa mitattiin kannakekokonaisuuksien mallinnukseen ja piirustusten laatimiseen kuluvaa aikaa eri suunnittelumenetelmillä. Mittausten luotettavuutta arvioitiin intraluokkaisen korrelaatiokertoimen avulla. Laadullinen aineisto koostui suunnittelijoille suunnatusta kyselystä sekä asiantuntijahavainnoista, joiden avulla kartoitettiin kokemuksia modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen käytöstä. Aineistot analysoitiin erikseen ja yhdistettiin triangulaation avulla.

Tulokset osoittavat, että modulaarisiin ratkaisuihin perustuvat suunnittelumenetelmät voivat tehostaa suunnittelua erityisesti sekundäärikannakkeiden osalta. Suunnittelu-aikakokeissa havaittiin systemaattisia aikasäästöjä, ja mittausten toistettavuus osoittautui korkeaksi. Laadullinen aineisto tukee näitä havaintoja tuomalla esiin modulaaristen ratkaisujen joustavuuden ja muunneltavuuden erityisesti rakennusvaiheen muutostilanteissa. Taloudellisesta näkökulmasta tutkimus osoittaa, että modulaaristen ratkaisujen arviointi pelkkien materiaalikustannusten perusteella on riittämätöntä, ja kokonaiskustannusten tarkastelu edellyttää huomion kiinnittämistä myös suunnitteluun, asennukseen ja korjaustöihin liittyviin tekijöihin.

Johtopäätöksenä todetaan, että modulaariset kannakeratkaisut eivät ole yleispätevä korvaaja perinteisille ratkaisuille, vaan ne soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa muutosten todennäköisyys on korkea ja aikataulullinen joustavuus on kriittistä. Tutkimus tarjoaa käytännönläheistä tietoa modulaaristen kannakeratkaisujen hyödyntämisestä ja muodostaa perustan jatkotutkimukselle, jossa tarkastellaan ratkaisujen elinkaarikustannuksia, standardointia ja soveltuvuutta laajemmissa projektikonteksteissa.

Avainsanat: Laitossuunnittelu, putkistosuunnittelu, kannakointi, sekundäärikannakointi, sekamenetelmätutkimus, AVEVA E3D, modulaarisuus, hitsaus

Master's thesis
Department of Mechanical and Materials Engineering, Faculty of Technology
University of Turku

Subject: Mechanical Engineering
Author: Kristian Suominen, BEng
Title: The Impact of Modular Support Systems on Design and Installation
Efficiency in Process Plant Projects
Instructors: Jussi Kantola, PhD (IE), DSc, University of Turku
Sönke Peschka, MSc, Valmet Technologies Oy
Pages: 82 pages, including 6 pages of references and 6 pages of appendices
Date: 30 January 2026

In process plant projects, piping support systems constitute a fundamental part of plant design, and the selection of secondary support solutions in particular has a significant impact on design efficiency, constructability, and overall project costs. Traditionally, secondary pipe supports have been implemented as welded structural steel constructions, but modular support solutions have increasingly emerged as an alternative approach. This master's thesis investigates whether modular pipe support solutions can improve design efficiency, quality, and cost-effectiveness, as well as reduce the need for rework during the construction phase and enhance installation efficiency in process plant projects.

The study was conducted using a mixed methods research approach, combining quantitative and qualitative data. Quantitative data were collected through controlled design time experiments, in which the time required for modelling pipe support assemblies and producing drawings was measured using different design methods. The reliability of the measurements was evaluated using the intraclass correlation coefficient. Qualitative data consisted of a questionnaire directed at designers and expert observations, aiming to capture experiences and perceptions related to the use of modular and traditional pipe support solutions. The datasets were analysed separately and subsequently integrated through triangulation.

The results indicate that design methods based on modular solutions can improve design efficiency, particularly in the case of secondary pipe supports. The design time experiments revealed systematic time savings, and the repeatability of the measurements was found to be high. The qualitative findings support these results by highlighting the flexibility and adaptability of modular solutions, especially in situations involving changes during the construction phase. From an economic perspective, the study demonstrates that evaluating modular solutions solely based on material costs is insufficient, and that a comprehensive cost assessment must also consider design, installation, and rework-related factors.

In conclusion, modular pipe support solutions are not a universal replacement for traditional approaches but are best suited to projects characterised by a high likelihood of changes and a strong need for schedule flexibility. The study provides practical insights into the application of modular pipe support solutions and establishes a foundation for further research into lifecycle costs, standardisation, and applicability in broader project contexts.

Keywords: Plant design, piping design, pipe support design, secondary pipe support structures, mixed methods research, AVEVA E3D, modularity, welding

Kiitokset

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa professori Jussi Kantolaa mielenkiintoisista luennoista opintojen varrella sekä erinomaisesta ohjauksesta tämän diplomityön aikana. Hänen aktiivinen, kannustava ja ymmärtäväinen ohjausotteensa on ollut merkittävä tuki koko diplomityöprosessin ajan.

Kiitän diplomityön toimeksiantajaa ja esihenkilöäni Sönke Peschkaa Valmet Technologies Oy:stä mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö Valmetille. Lisäksi haluan kiittää häntä erittäin kannustavasta ja mukavasta työympäristöstä sekä jatkuvasta tuesta ja rohkaisusta työn eri vaiheissa. Herzlichen Dank für die großartige Unterstützung und das Vertrauen.

Haluan myös kiittää Heidi Myllymäkeä arvokkaasta avusta suunnitteluaikaan suunnittelussa ja toteutuksessa sekä erinomaisesta asiantuntijuudesta putkistosuunnitteluun liittyvissä kysymyksissä. Hänen panoksensa oli keskeinen tutkimuksen käytännön toteutuksen ja tulosten luotettavuuden kannalta.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni sekä rakasta puolisoani Emmaa, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua koko opintojeni ajan ja työntäneet minua eteenpäin silloinkin, kun oma usko on ollut koetuksella. Ilman teitä en olisi tässä pisteessä.

Kaikesta tuesta polun varrella kiitollisena



Kristian Suominen

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Toimeksiantaja	1
1.2	Tutkimuskysymykset ja -suunnitelma	2
1.3	Tutkimusote	4
1.4	Työn rakenne	5
2	Teoreettinen viitekehys	7
2.1	Laitossuunnittelu	7
2.1.1	Laitoksen määritelmä	7
2.1.2	Laitos- ja putkistosuunnittelu	9
2.1.3	Putkistokannakointi osana prosessilaitoksen elinkaarta	12
2.2	Putkiston kannakointi	14
2.3	Kannakointiratkaisut	16
2.3.1	Hitsatut sekundäärikannakkeet	16
2.3.2	Modulaariset sekundäärikannakkeet	21
2.4	Suunnitteluprosessin resurssit ja kustannukset	32
3	Menetelmät ja aineistot	34
3.1	Tutkimusprosessin eteneminen	34
3.2	Tutkimusmenetelmät ja aineisto	35
3.2.1	Aineistolähteet	35
3.2.2	Mittaus- ja haastattelumenetelmien kuvaus	35
3.3	Suunnittelun tehokkuus ja laatu	37
3.4	Kustannusvertailu	42
3.5	Asennus ja työmaa	44
3.5.1	Asennusaikavertailu	44
3.5.2	Asennusvirheet ja -haasteet	45
3.5.3	Rework- ja lisätyökustannukset	48
3.6	Suunnittelijoiden kokemukset	49
4	Tulokset, analyysi ja keskustelu	51
4.1	Määrälliset tulokset	51
4.2	Laadulliset tulokset	52

4.3	Yhdistetty analyysi ja triangulaatio	53
4.4	Tutkimuskysymysten analyysi tulosten perusteella	54
5	Tarkastelu, johtopäätökset ja jatkotutkimus	57
5.1	Tutkimuksen kriittinen tarkastelu	57
5.1.1	Tutkimuksen kontekstisidonnaisuus ja yleistettävyys	57
5.1.2	Tutkimusasetelman vaikutus havaintoihin	58
5.1.3	Mittausten luotettavuus ja mahdolliset vinoumat	59
5.1.4	Laadullisen aineiston tulkinnan epävarmuudet	60
5.1.5	Työn laatijan rooli ja tutkimuksen toteutukseen liittyvät valinnat	61
5.1.6	Johtopäätösten rajausta ja jatkotarkastelun tarpeet	62
5.2	Keskeiset johtopäätökset	63
5.3	Käytännön implikaatiot	64
5.4	Tutkimuskysymysten yhteenveto	65
5.5	Tutkimuksen rajoitteet	66
5.6	Jatkotutkimuksen suuntaviivat	67
	Hyödynnetyt digitaaliset työkalut	69
	Lähteet	70
	Liitteet	76
	Liite 1. Suunnitteluaiakoe, ohje	77
	Liite 2. Suunnitteluaiakoe, tulokset, VOF-support	78
	Liite 3. Suunnitteluaiakoe, tulokset, modulaariteräs	79
	Liite 4. Validointilaskelma, ICC 3,k	80
	Liite 5. Kannakesuunnittelukokeen kyselylomake	81
	Liite 6. Kysely toimeksiantajan putkisto-osaston suunnittelijoille	82

Kuvaluettelo

Kaikissa teknisissä piirustuksissa ja havainnekuivissa on käytetty yhden käännön menetelmää, ellei toisin mainittu.

Kuva 1. Lieriöllisen kattilan kattilakiertodiagrammi.....	8
Kuva 2. Kalvoseinä, ts. membraaniseinä. Poikkileikkaus	9
Kuva 3. Putki ja kannakoinnin komponentit havainnollistettuna.....	14
Kuva 4. PSK 7390 mukainen ulokekannake, rakenne A.....	16
Kuva 5. PSK 7390 mukainen porttikannake, rakenne A	17
Kuva 6. SFS-EN 10219 mukainen neliö- ja suorakaiderakenneputkien poikkileikkaukset	17
Kuva 7. SFS-EN 10219 viistolaippainen U- ja UPN- sekä tasalaippainen HE-profiili	18
Kuva 8. Sikla SiFramo-järjestelmä asennettuna putkien sekundäärikannakkeeksi	26
Kuva 9. Siklan kannake verrattuna hitsattuun kannakeratkaisuun kuuden vuoden vertailuvälillä	27
Kuva 10. Kuumagalvanoitu ja sinkkihiutalepinnoitettu kappale suolasumutestin jälkeen	27
Kuva 11. Kuumagalvanointi ja sinkki-magnesium (ZM) pinnoitteet, mikroskooppinäkyä	30
Kuva 12. itsekorjautuvuus havainnollistettuna viikon, 15 kuukauden ja 25 kuukauden jälkeen	31
Kuva 13. Puhdas sinkki ja sinkki-magnesium verrattuna 4 vuoden kuluttua	31
Kuva 14. Suunnitteluaiakokeiden keskiarvot.	38
Kuva 15. Modulaarisen sekundäärikannakkeen tartunta I-palkkiin.	46
Kuva 16. Virheellisesti asennettu tartuntakynsi.....	46

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Asennusaikavertailu.....	45
Taulukko 2. Vastaukset tutkimuskysymyksiin.	66

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

Vieraskieliset termit on esitetty kursiivilla ja suomenkielinen selitys niiden jälkeen.

3D	<i>Three dimensional</i> – kolmiulotteinen
AH	<i>Air Heater</i> – ilmanesilämmitin
ATEX	<i>Atmosphères Explosibles</i> – räjähdysvaarallinen tila
DFA	<i>Design For Assembly</i> – Kokoonpanon huomioiva suunnittelu
DFMA	<i>Design For Manufacturing and Assembly</i> – Valmistettavuuden ja kokoonpanon huomioiva suunnittelu
DN	<i>Diamètre nominal</i> – nimellishalkaisija
ECON	<i>Economizer</i> – ekonomaiseri
ETA	<i>European Technical Assessment</i> – rakennustuotteen tekninen arviointi silloin, kun sille ei ole harmonisoitua standardia
HCP	<i>High Corrosion Protection</i> . Siklan nimitys kuumagalvanoinnille ja muille korroosionestokäsittelyille.
ICC	<i>Intraclass Correlation Coefficient</i> – Intraluokkainen korrelaatiokerroin
<i>Offshore</i>	Merellinen ympäristö, suolainen meri-ilmasto
PA	<i>Primary Air</i> – primääri-ilma
PED	<i>Pressure Equipment Directive</i> – painelaitedirektiivi
PF	<i>Primary Fuel</i> – primääripolttoaine
PI	Putkisto- ja instrumentaatio
PSK	PSK Standardointiyhdistys ry (ent. Prosessiteollisuuden Standardisoimiskerho)
<i>Rework</i>	Korjaustyö
RH	<i>Reheat, Reheated</i> – uudelleenkuumennus, uudelleenkuumennettu
RHS	<i>Rectangle Hollow Section</i> – suorakulmainen ontto profiili, putkipalkki
SA	<i>Secondary Air</i> – sekundääri-ilma
SH	<i>Superheater</i> – tulistin
SHS	<i>Square Hollow Section</i> – ontto neliöprofiili, putkipalkki
TKI	Tutkimus, kehitys ja innovaatio
VOF	<i>Viewpoint Of Finland</i> – PDMS / E3D Käyttäjäyhteisö Suomessa

1 Johdanto

1.1 Toimeksiantaja

Valmet Technologies Oy (myöhemmin Valmet) toimi tämän diplomityön toimeksiantajana, ja työ on laadittu työsuhteessa yritykseen.

Valmet on globaali prosessiteollisuuden teknologioita ja palveluita suunnitteleva ja toimittava yritys, jolla on toimintaa yli neljässäkymmenessä maassa. Yrityksen liiketoiminta kattaa muun muassa sellu-, kartonki- ja paperiteollisuuden, pehmopaperiteollisuuden sekä energia- ja prosessiteollisuuden sovellukset. Valmetin liikevaihto vuonna 2024 oli noin 5,4 miljardia euroa, ja yritys työllisti yli 19 000 asiantuntijaa maailmanlaajuisesti. (Valmet, 2025a.)

Energiasektorilla Valmet toimittaa teknologioita ja kokonaisratkaisuja muun muassa kaukolämpö- ja voimalaitoksiin sekä prosessiteollisuuden energiantuotantoon. Yrityksen tarjontaan kuuluvat esimerkiksi kattilalaitokset, voimalaitosratkaisut, kaasuttimet, ympäristönsuojelujärjestelmät sekä näihin liittyvät elinkaaripalvelut. Lisäksi Valmet toimittaa automaatio- ja virtauksensäätöratkaisuja, joilla pyritään parantamaan energiatehokkuutta, käyttövarmuutta ja turvallisuutta. (Valmet, 2025b.)

Tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminta (TKI) on keskeinen osa Valmetin strategiaa. Yritys kehittää teknologioita, tuotteita ja palveluita, joilla pyritään tehostamaan raaka-aineiden, energian ja veden käyttöä sekä vähentämään ympäristövaikutuksia. Valmet toimii yhteistyössä useiden tutkimuslaitosten ja yliopistojen kanssa Suomessa ja kansainvälisesti, operoiden omia koelaitoksia uusien teknologioiden kehittämisen ja kaupallistamisen tueksi. (Valmet, 2025c.)

Kestävä kehitys on Valmetin liiketoimintastrategian keskiössä. Yritys pyrkii vähentämään toimintansa ympäristövaikutuksia koko arvoketjussa, edistämään kiertotaloutta sekä parantamaan työturvallisuutta ja sosiaalista vastuullisuutta. Valmetilla on ilmasto-ohjelma, joka sisältää tavoitteet päästöjen vähentämiseksi ja hiilineutraaliuden saavuttamiseksi pitkällä aikavälillä. (Valmet, 2025d.)

Valmetin vastuullisuustyö on saanut kansainvälistä tunnustusta. Vuonna 2025 yritykselle myönnettiin EcoVadis-arvioinnissa kultamitali, mikä sijoittaa sen maailmanlaajuisesti arvioitujen yritysten parhaan viiden prosentin joukkoon.

EcoVadis arvioi yritysten vastuullisuutta ympäristön, työ- ja ihmisoikeuksien, etiikan sekä kestävien hankintojen näkökulmista. (Valmet, 2025e; EcoVadis, 2025.)

Valmetin toimittamissa energia- ja prosessilaitosprojekteissa putkistosuunnittelu ja siihen liittyvät kannakointiratkaisut muodostavat merkittävän osan suunnittelu- ja toteutusvaiheen kokonaisuudesta. Projektit ovat usein mittavia, monialaista suunnittelua edellyttäviä kokonaisuuksia, joissa aikataulujen hallinta, muutosten hallinta sekä asennettavuus korostuvat. Näissä projekteissa modulaaristen ratkaisujen potentiaali liittyy erityisesti suunnittelun vakiointiin, asennustyön tehostamiseen ja rakennusvaiheen korjaustöiden vähentämiseen, mikä tekee aiheesta Valmetin liiketoiminnan näkökulmasta ajankohtaisen ja käytännönläheisen.

1.2 Tutkimuskysymykset ja -suunnitelma

Tässä diplomityössä tarkastellaan kaukolämpö- ja voimalaitoksiin (jäljempänä laitos) liittyviä putkistoja ja niiden kannakointiratkaisuja. Työn selkeyttämiseksi termillä laitos viitataan tässä tutkimuksessa kaukolämpö- ja voimalaitoksiin.

Tutkimuksen kohteena on modulaaristen kannakointiratkaisujen vertaaminen perinteisiin hitsattaviin ratkaisuihin sekä näiden vaikutusten arviointi suunnittelun ja asennustyön tehokkuuteen laitosprojekteissa. Modulaarisia kannakkeita on hyödynnetty aiemmin, mutta niiden käyttöönotto suunnittelun ja asennuksen tasolla on aiheuttanut toimeksiantajayrityksessä haasteita. Lisäksi modulaaristen kannakeratkaisujen valmistajakohtaiset erot suunnittelussa ja asennuksessa sekä toimitusmalleissa asettavat vaatimuksia suunnittelu-, asennus- ja toimitusprosessien yhteensovittamiselle.

Toimeksiantajan tarpeeseen pohjautuen diplomityölle asetettiin kaksi rajattua tutkimuskysymystä, jotka on jaettu alakysymyksiin.

1. Voiko modulaarisilla kannakkeilla mahdollistaa suunnittelua, joka on

1.1. Tehokkaampaa

1.2. Laadukkaampaa

Tässä tutkimuksessa tehokkaalla suunnittelulla tarkoitetaan prosessia, jossa suunnittelutyö tehdään mahdollisimman vähän toistoa tai virheitä sisältäen. Tässä korostuu iterointilooppien, suunnitteluvirheiden ja odotusajan minimointi. Mujumdar & Maheswari (2017) kuvaavat iteratiivista suunnittelua syklisteksi ja toistavaksi prosessiksi suunnitteluvaiheen aikana, jossa eri disipliinien suunnittelijat vaihtavat informaatiota keskenään epästrukturoidusti (s.321). Suunnittelun tehokkuutta voidaan mitata määrällisesti esimerkiksi mittaamalla suunnitteluun ja odotukseen käytettyä aikaa sekä iterointilooppien määrää. Mitä useammin sama asia joudutaan suunnittelemaan uudelleen, tai olemassa olevaa suunnitelmaa joudutaan muuttamaan, sitä tehottomampaa suunnittelu on.

Laadukkaalla suunnittelulla käsitetään ennakkoon asetetut määritelmät täyttävä toteutus, joka toteuttaa sille asetetun funktion eikä ylitä ennalta määriteltyjä raja-arvoja. Laadukas suunnittelu täyttää kaikki sen kohdetta koskevat viranomaisvaatimukset, määräykset ja lait. Laadukas suunnittelu mahdollistaa toteutuksen määritetyn budjetin ja aikataulun sisällä. (LA Bureau of Engineering, 2018.)

Tässä diplomityössä tutkitaan laadullisesti perinteisten (hitsattujen teräsrakenteiden) ja vaihtoehtoisten (modulaaristen teräsrakenteiden) putkistokannakointiratkaisujen suunnitteluprosesseja ja -tuloksia toimeksi antavassa yrityksessä.

2. Voidaanko modulaarisilla kannakkeilla vähentää

2.1. reworkin tarvetta rakennusvaiheessa

2.2. asennusaikaa ja helpottaa asennusta vähentäen kustannuksia

Love ym. (2019) kuvaa Reasonin (1990) esittämää mallia, jonka mukaan rework (*eng. korjaustyö*) on tyypillisesti seuraus inhimillisestä virheestä. Tällaiset virheet voivat johtua toiminnallisista lipsahduksista ja unohduksista, virheellisestä arvioinnista tai päätöksenteosta, kuten kognitiivisista vinoumista, tai tietoisista sääntöjen rikkomisista. Love kuvaa myös, kuinka korjaustyöstä aiheutuvaa hintaa on jokseenkin tuntematon, sillä monet organisaatiot eivät mittaa niitä suoraan. Love jatkaa Mooreen (2012) viitaten, kuinka yritykset pitävät korjaustyötä normaalina osana toimintoja, vaikka sillä on negatiivinen vaikutus projektin tehokkuuteen ja tuottavuuteen (s. 501–502).

laitosprojektien putkistojen kannakkeisiin liittyen korjaustyö voi olla esimerkiksi puuttuvien kannakkeiden valmistus ja kiinnitys tai väärin asennettujen kannakkeiden korjaus. Kannakesuunnittelussa Loven mainitsemia unohduksia, lipsahduksia, virhearviointeja ym. voi tapahtua esimerkiksi reitityksessä, esisuunnittelussa, detaljisuunnittelussa ja työmaalla asennuksen yhteydessä. Detaljisuunnittelu on suunnittelutyötä, jonka tuloksena syntyy laitoksen valmistukseen, asennukseen ja kunnossapitoon tarvittavia dokumentteja (Pere, 2016, kpl. 14, s. 16). Suunnittelu vaikuttaa huomattavasti myös kannakeratkaisun toteutuskelpoisuuteen ja asennusaikaan.

1.3 Tutkimusote

Tämä tutkimus on toteutettu sekamenetelmätutkimuksena (mixed methods research), jossa yhdistetään määrällistä ja laadullista tutkimusta. Sekamenetelmätutkimus on metodi, jossa yhdistetään vähintään yksi kvantitatiivinen ja yksi kvalitatiivinen metodi (Greene *ym.* 1989, s. 256). Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen tutkimus antavat erilaisia kuvia tai perspektiivejä ja kullakin on omat rajoitteensa (Creswell & Clark, 2019, s. 8). Johnson *ym.* (2007) taas kuvaa, kuinka sekamenetelmätutkimuksessa tutkija tai tutkijat yhdistelevät elementtejä sekä kvalitatiivisesta että kvantitatiivisesta tutkimussuunnasta laajentaakseen ja syventääkseen ymmärrystä (s. 123).

Sekamenetelmiä on hyödynnetty sekä perustutkimuksessa että soveltavassa tutkimuksessa, erityisesti arviointitutkimuksen alalla (Lund, 2012, s. 156). Lund (2012) mainitsee myös, kuinka laadullisia ja määrällisiä menetelmiä voidaan käyttää rinnakkain tai peräkkäin, ja niiden painotus sekä integroinnin laajuus voivat vaihdella tutkimuksen tavoitteiden mukaan (s. 156). Sekamenetelmätutkimuksen haasteina hän pitää suuria tutkimusohjelmia, joissa resurssitarve on usein suurempi, kuin pelkässä määrällisessä tai laadullisessa tutkimuksessa (s. 162).

Creswell & Clark (2019) tuovat ilmi, kuinka pragmatismi on yleinen tutkimusfilosofia, jota useat Sekamenetelmätutkimusta tekevät tutkijat seuraavat.

Sekamenetelmätutkimusta pidettiin tässä tutkimuksessa parhaana lähestymistapana, sillä tutkimusaineistoa on saatavilla laajasti sekä määrällisenä että laadullisena ja näitä yhdistämällä saadaan kokonaisvaltainen kuva tutkimuksen kohteena olevista järjestelmistä sekä niiden vaikutuksista. Johnson *ym.* (2007) näkevätkin pragmatismia kehittyneenä ja houkuttelevana tutkimusfilosofiana erilaisten näkökulmien ja lähestymistapojen yhdistämiseksi (s. 125).

Elgeddawy & Abouraja (2024) kuvaavat pragmatistisia tutkijoita joustavina ja käytännönläheisinä etsiessään toimivia ratkaisuja tutkittavaan ilmiöön tunnistuen, että tutkimusongelmien ratkaiseminen edellyttää useiden eri näkökulmien ja maailmankatsomusten huomioon ottamista. Heidän mukaansa pragmatistinen tutkija painottaa tutkimustulosten käytännön merkitystä ja ongelmanratkaisukykyä, sekä kuinka yhdistämällä määrälliset ja laadulliset lähestymistavat pragmatisti pyrkii muodostamaan kokonaisvaltaisen ymmärryksen ilmiöstä sen kontekstissa. He myös määrittelevät, että tällaisen tutkimuksen tavoitteena on tuottaa sovellettavaa tietoa, joka tukee päätöksentekoa ja käytännön kehittämistä, jolloin pragmatistisen ajattelun ytimessä on määrällisen ja laadullisen näkökulman yhdistyminen siten, että ne täydentävät toisiaan tutkimuskohteen tulkinnessa ja ymmärtämisessä (s. 71–72). Menetelmällinen pragmatisti pyrkii tunnistamaan ne lähestymistavat, jotka parhaiten soveltuvat tutkimustavoitteiden saavuttamiseen (Foster, 2023, s. 13).

1.4 Työn rakenne

Tämä diplomityö koostuu viidestä pääluvusta, jotka etenevät loogisesti tutkimusaiheen taustoituksesta empiiriseen tarkasteluun ja johtopäätöksiin. Työn rakenne on suunniteltu siten, että se tukee tutkimuskysymyksiin vastaamista ja mahdollistaa teoreettisen viitekehyksen, käytännön aineiston ja analyysin systemaattisen yhdistämisen.

Johdantoluvussa esitellään työn tausta, toimeksiantaja ja tutkimuksen lähtökohdat. Lisäksi luvussa määritellään tutkimuskysymykset, tutkimuksen rajaukset sekä keskeiset käsitteet, joiden avulla tarkasteltava ilmiö rajataan ja jäsennetään. Johdanto luo perustan koko tutkimukselle ja asettaa työn kontekstiin laitospöytäkirjojen putkistokannakointiin liittyvien haasteiden näkökulmasta.

Toisessa luvussa esitetään työn teoreettinen viitekehys. Luvussa käsitellään laitossuunnittelun ja putkistosuunnittelun peruseriaatteita, putkistokannakoinnin roolia osana laitossuunnittelua sekä kannakeratkaisuihin liittyviä teknisiä, standardiperusteisia ja käytännöllisiä näkökulmia. Lisäksi luvussa tarkastellaan hitsattuja ja modulaarisia sekundäärikannakeratkaisuja sekä niiden ominaispiirteitä, etuja ja rajoitteita. Teoreettinen viitekehys toimii perustana myöhemmälle empiriselle tarkastelulle ja tulosten tulkinnalle.

Kolmannessa luvussa kuvataan tutkimuksessa käytetyt menetelmät ja aineistot. Luvussa esitellään sekamenetelmällinen tutkimusote, aineistonkeruumenetelmät sekä määrällisen ja laadullisen aineiston analyysitavat. Lisäksi luvussa käsitellään tutkimuksen toteutukseen liittyviä valintoja, mittausten luotettavuutta sekä tutkimusasetelman keskeisiä rajoitteita. Menetelmäluke tarjoaa lukijalle edellytykset arvioida tutkimuksen luotettavuutta ja toistettavuutta.

Neljännessä luvussa esitetään tutkimuksen tulokset sekä niihin liittyvä analyysi ja keskustelu. Luvussa tarkastellaan erikseen määrällisiä ja laadullisia tuloksia, minkä jälkeen aineistot yhdistetään triangulaation avulla. Tuloksia analysoidaan suhteessa tutkimuskysymyksiin ja teoreettiseen viitekehukseen, ja luvussa pyritään tunnistamaan sekä modulaaristen että perinteisten kannakeratkaisujen vaikutuksia suunnittelun ja asennuksen tehokkuuteen.

Viidennessä luvussa esitetään työn johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset. Luvussa kootaan tutkimuksen keskeiset havainnot, vastataan tutkimuskysymyksiin ja tarkastellaan tulosten merkitystä käytännön laitossuunnittelun näkökulmasta. Lisäksi luvussa käsitellään tutkimuksen rajoitteita sekä esitetään suosituksia jatkotutkimukselle ja mahdollisille jatkokehitystoimenpiteille.

2 Teoreettinen viitekehys

Tässä työssä teoreettinen viitekehys rakentuu kolmesta toisiaan täydentävästä näkökulmasta:

- (1) Laitossuunnittelun ja putkistosuunnittelun prosessit
- (2) Putkistokannakoinnin tekniset ja rakenteelliset periaatteet
- (3) Suunnittelun ja asennuksen tehokkuuteen vaikuttavat resurssi- ja kustannustekijät

Näiden avulla muodostettiin analyysipohja, jonka perusteella modulaarisia ja hitsattuja sekundäärikannakeratkaisuja verrattiin suunnittelun tehokkuuden, laadun ja reworkin näkökulmista myöhemmissä kappaleissa.

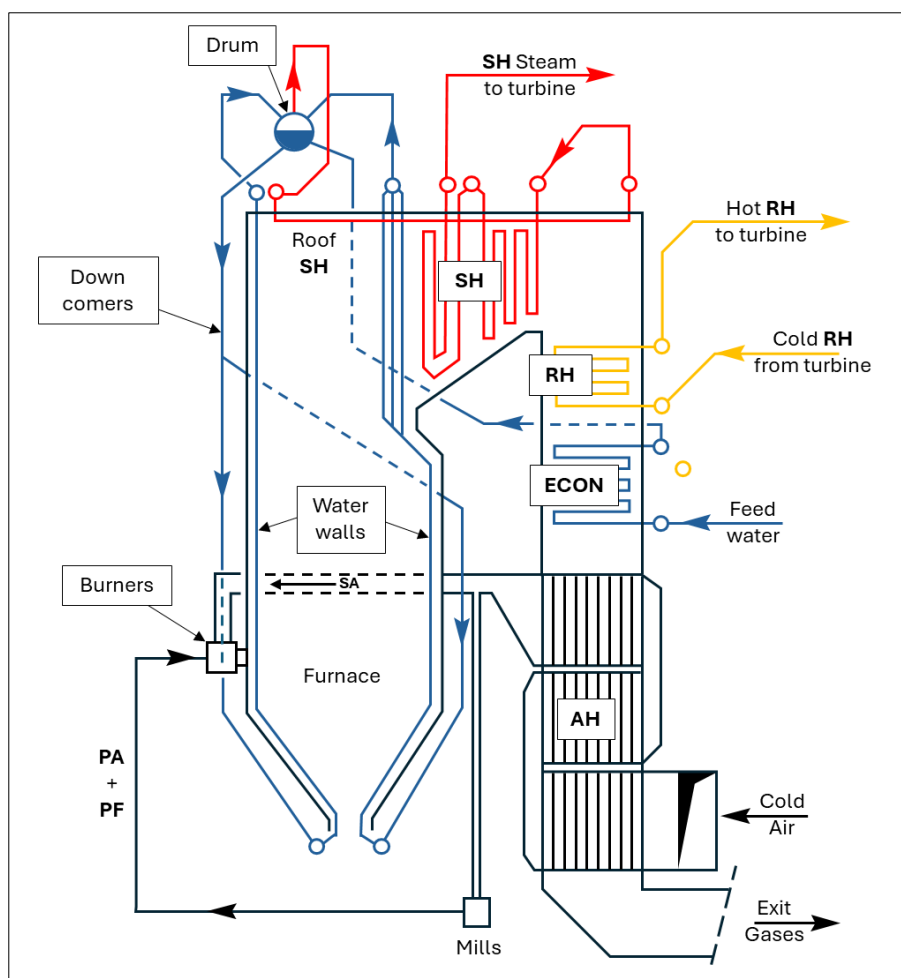
2.1 Laitossuunnittelu

2.1.1 Laitoksen määritelmä

Kaukolämpö- ja voimalaitoksien ytimessä toimii ns. kattila. Kattilaa voidaan kuvata laitteena, joka siirtää palamisella polttoaineeseen varastoidun energian lämpöenergiana vesihöyryyn, sekä palamisreaktiosta syntyvän palokaasun lämpöenergian vesihöyryyn (Rayaprolu, 2009, s. 3). Huhtinen ym. (1994) kuvaa höyrykattilaa laitteena, jossa tuotetaan höyryä kattilaan syötetystä vedestä syöttämällä sinne tarvittavat määrät polttoainetta ja palamisilma. Palamisreaktiossa syntyneeseen savukaasuun sitoutunut lämpöenergia hyödynnetään höyrytuotannon lämmönvaihtimissa, kuten tulistin, höyrystin, vedenesilämmitin ja palamisilman esilämmitin (s. 7).

Tämä tehostaa laitoksen toimintaa monella tapaa: esilämmitetty palamisilma auttaa puhtaamman ja tehokkaamman palamisreaktion aikaansaannissa ja ylläpidossa, kun taas esilämmitetty vesi saadaan kattilassa haluttuun höyrystymislämpötilaan tehokkaammin. Huhtinen ym. (1994) kuvaa kuinka lopulta tulistettu korkeapaineinen vesihöyry johtuu kattilalta turbiinille, paisuen lauhduttimen alhaisempaan paineeseen ja lämpötilaan, jolloin osa höyryn lämpöenergiasta muuttuu turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi, joka puolestaan tuottaa sähköenergiaa. Laitosta voidaan edelleen tehostaa hyödyntämällä lauhduttimessa vapautuva lämpöenergia esimerkiksi kaukolämpöverkon lämmittämiseen (s. 10).

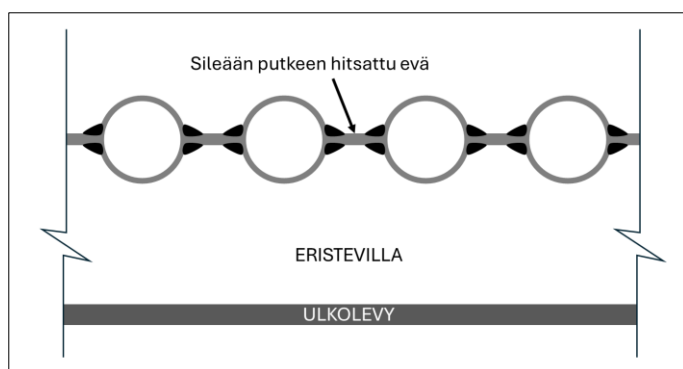
Kuva 1 havainnollistaa veden, ilman, polttoaineen ja syntyvän höyryn kiertokulun kattilassa, jossa on useita laitoksen tehokkuutta parantavia ominaisuuksia. Syöttövesi (*eng. feed water*) kulkee ekonomaiserin (*ECON*) läpi, jäädyttäen savukaasuja ja lämmittäen syöttövettä. Esilämmitetty syöttövesi kulkee syöttövesipumpun voimalla lieriöön (*eng. Drum*), josta se kulkee joko luonnonkierrolla tai pakkokierto-pumpun avulla laskuputkia (*eng. downcomer*) pitkin kattilan alaosaan, jossa se jaetaan kattilan sisäseinät muodostavaan keittoputkistoon (*eng. Water walls*).



Kuva 1. Lieriöllisen kattilan kattilakiertodiagrammi (tekijän itse laatima, pohjautuu Rayaprolu, 2009, Boiler Fundamentals, s. 12).

Keittoputkisto (Kuva 2) muodostuu nykyään usein membraanirakenteesta, jossa höyrystinputkien väliin on hitsattu teräslevyä, muodostaen putkista yhtenäisen, tiiviin seinämän (Huhtinen ym. 1994, s. 172). Höyrystinputkissa osa kattilan lämpöenergiasta siirtyy veteen, johon muodostuu sen johdosta höyryä.

Vesi nousee putkia pitkin takaisin lieriöön, jossa höyry erottuu vedestä ja jatkaa tulistimille (*eng. Superheater, SH*) ja siitä turbiinille, tai muulle prosessihyödykkeelle. Kattilalle saapuva ilma kulkee ensin ilmanesilämmittimen (*eng. Air Heater, AH*) jossa kattilan savukaasut esilämmittävät ilman. Tästä ilma ohjataan primääri- ja sekundääri-ilmana (*eng. Primary Air, PA. Secondary Air, SA*) polttimille (*eng. burners*) ja kattilaan. Primääri-ilma sekä polttoaine syötetään omia linjojaan pitkin kattilan alaosassa. Syöttötapa ja polttoaine riippuvat kattilalaitoksen toimintaperiaatteesta.



Kuva 2. Kalvoseinä, ts. membraaniseinä. Poikkileikkaus (tekijän itse laatima, pohjautuu Huhtinen ym. 1994, s.171).

2.1.2 Laitos- ja putkistosuunnittelu

Pere (2016) määrittää kaiken suunnittelun lähtökohdaksi prosessisuunnittelun, joka aloitetaan jo laitossuunnitteluprojektin alkuvaiheessa. Tätä jatketaan alustavien virtauskaavioiden ja tasapainolaskelmien laadinnalla, joita täydennettäessä instrumentoinnilla aletaan puhua PI (Putkisto- ja instrumentointi) kaaviosta. PI-kaaviot ovat putkistosuunnittelussa tärkein lähtökohta layoutin ohella. Suunnittelu aloitetaan halkaisijaltaan suurimmista putkista niiden ollessa tilavaraukseltaan oleelliset. (kpl 14, s. 38)

Putkisto- ja layoutsuunnittelua kuvatessaan Di Giacomo (2000) ohjeistaa, kuinka putket tulisi reitittää aina siten, että se on kannakoitavissa loogisesti ja luontevasti sitä ympäröiviin rakenteisiin (s. B 215). Tällöin olemassa olevaa teräs- ja betonirakennetta saadaan hyödynnettyä ja tarve kannakekohtaiselle tukirakenteelle on pienempi.

Laitos- ja laitesuunnittelua ohjaavat kansalliset ja kansainväliset direktiivit, lait ja säädökset. Euroopan parlamentin ja neuvoston painelaitedirektiivi (PED, Pressure Equipment Directive) soveltuu painelaitteisiin sekä painelaitteista koottuihin yhtenäisiin ja toiminnallisiin kokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine ylittää 0,5 bar. Direktiivi luokittelee painelaitteet vaarallisuuden perusteella luokkiin I–IV, joissa luokka IV edustaa korkeinta riskitasoa. (European Parliament and Council of the European Union, 2014, s. 165–182.)

Putkistot kuuluvat Euroopan Unionissa painelaitedirektiivin (PED) soveltamisalaan osana painelaitteista koottuja toiminnallisia kokonaisuuksia, joissa useat painetta kestävätkomponentit muodostavat integroidun järjestelmän nesteiden tai kaasujen siirtämiseksi (European Parliament and Council of the European Union, 2014, Article 2). Direktiivin mukaan painelaitteet ja niistä kootut kokonaisuudet on suunniteltava ja valmistettava siten, että ne ovat turvallisia koko käyttöikänsä ajan ennakoitavissa olevissa käyttöolosuhteissa (European Parliament and Council of the European Union, 2014, Annex I, Section 1). Olennaiset turvallisuusvaatimukset edellyttävät lisäksi, että painelaitteet kestävätkä kaikki ennakoitavissa olevat kuormitukset, mukaan lukien käyttö- ja ympäristökuormat, jotka vaikuttavat järjestelmän mekaaniseen lujuuteen (European Parliament and Council of the European Union, 2014, Annex I, Section 2.2.1).

Vaikka painelaitedirektiivissä ei erikseen määritellä putkistokannakointia tai siihen liittyviä sekundäärisiä teräsrakenteita, direktiivin lähestymistapa jättää teknisten ratkaisujen yksityiskohtaisen toteutuksen valmistajan ja suunnittelijan vastuulle, kunhan olennaiset turvallisuusvaatimukset täyttyvät (European Parliament and Council of the European Union, 2014, Annex I). Tässä työssä perehdyttiin EU:n sisäisiin käytänteisiin, joissa putkistokannakointi ja siihen liittyvät sekundäärirakenteet tulkitaan osaksi painelaitteesta muodostuvaa kokonaisuutta siltä osin kuin ne vaikuttavat putkiston kuormitusten hallintaan, mekaaniseen eheyteen ja siten koko järjestelmän turvalliseen käyttöön. Tämän tulkinnan mukaan putkistokannakkeet eivät ole irrallisia rakenteita, vaan ne osallistuvat painelaitteiston turvallisen toiminnan varmistamiseen osana toiminnallista kokonaisuutta.

Teollisuusputkistojen kannakointi ja siihen liittyvät sekundääriset teräsrakenteet on määritelty osaksi putkistojärjestelmän kokonaisuutta EN 13480-3 -standardissa, joka on harmonisoitu PED:n kanssa (SFS Suomen Standardit ry [SFS], 2021).

Standardin mukaan putkistokannakkeet jaetaan jäykkiin, joustaviin sekä sekundäärisiin teräsrakenteisiin, ja niiden tehtävänä on kantaa putkiston ja siihen liittyvien laitteiden paino, hallita putkiston liikkeitä sekä siirtää staattiset ja mahdolliset dynaamiset kuormat ympäröivään rakenteeseen rajoittaen putkiston liikevapauksia määritellyissä pisteissä (SFS, 2021, s. 162). Putkistokannakkeet luokitellaan putkiston PED-luokituksen mukaisesti, ja mikäli eri luokkiin kuuluvat putkistot jakavat yhteisen kannakerakenteen, kannakkeen on täytettävä vaativimman luokan mukaiset vaatimukset (SFS, 2021, s. 162). Standardi erottaa toisistaan standardoidut, tunnetuin kuormankantokyvyin varustetut kannakkeet sekä tapauskohtaisesti suunnitellut erikoiskannakkeet, ja edellyttää, että putkistosuunnittelija toimittaa tukirakenteiden suunnittelua varten tiedot putkiston lämpötiloista, kuormituksista ja liikkeistä (SFS, 2021, s. 167). Lisäksi standardi edellyttää, että ympäristötekijät sekä mahdolliset ulkoiset vaikutukset, kuten värähtelyt, rakenteelliset siirtymät ja seismiset kuormat, huomioidaan kannakointiratkaisuissa, ja että erilliset sekundääriset teräsrakenteet voidaan mitoittaa Eurokoodien mukaisesti (SFS, 2021, s. 168, 184).

ATEX (*Atmosphères Explosibles* – räjähdysvaarallinen tila), on nimitys Euroopan yhteisön direktiiveistä, jotka koskevat räjähdysvaarallisia tiloja ja niissä työskentelyä, sekä niissä käytettävää laitteistoa. Tuotantolaitokset ja työpaikat, joissa on syttyviä nesteitä, kaasuja tai pölyjä ovat ATEX-työolosuhdedirektiivin alaisia. Tämä kattaa termit ATEX, Ex (*explosive*, räjähtävä), Ex-tila (räjähdysvaarallinen tila) ja Ex-laite (räjähdysvaarallisessa tilassa käytettävä laite tai suojausjärjestelmä). Laitteet voidaan luokitella ryhmiin I tai II, jotka jakautuvat kukin omiin laiteluokkiinsa. Ryhmä I on kaivoksiin ja niiden maanpäälisiin osiin, räjähdysvaaran perustuessa metaaniin ja/tai pölyyn. Ryhmä II kattaa muissa paikoissa käytettävät laitteet. Ryhmä II jakautuu laiteluokkiin 1, 2 ja 3 turvallisuustasotarpeen mukaan seuraavasti: 1 on erittäin korkea turvallisuustaso, 2 on korkea turvallisuustaso ja 3 on normaali turvallisuustaso. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2015, s. 3–8)

Suunnittelutyö tehdään pääsääntöisesti nykyään rakentamalla kolmiulotteinen tietomalli, johon mallinnettaville objekteille asetetaan ominaisuudet, eli attribuutit. Näitä attribuutteja voivat olla esimerkiksi prosessisysteemi, virtaava aine, putken nimelliskoko, putkiluokka tai objektin PED- tai ATEX-luokka. Työn tuloksena syntyvä 3D-malli on pääasiainen tietolähde, jonka pohjalta dokumentteja laaditaan ja tulostetaan.

3D suunnittelulla saavutettavia etuja ovat mahdollisuus hyödyntää valmiiksi mallinnettuja komponenttikirjastoja, törmäystarkastelun parempi laatu, jolla voidaan välttää viiveet ja muutokset asennusvaiheessa sekä mahdollisuus tarkastella laitoksen käytettävyyttä jo suunnitteluvaiheessa. Lisäksi tietomallipohjainen suunnittelu mahdollistaa suunnittelutyön hajauttamisen, joka auttaa resurssinhallinnassa. 3D-suunnittelussa haasteita puolestaan ovat suunnittelijoiden osaaminen, projektkirjastojen hallinnointi ja tuottaminen, lisenssikustannukset sekä hajauttamisen tuomat lisähaasteet kommunikaatiolle, laadunvalvonnalle ja töiden hallinnalle. (Pere, 2016, kpl. 14, s. 13–14.)

Rakennusprojektien parissa työskentelevät suunnittelijat vaihtavat usein keskenään tietoa jatkuvasti läpi koko suunnitteluvaiheen. Kun tietoa välitetään vastavuoroisesti syklinä, puhutaan iteroinnista. Iterointi on välttämätön osa prosessia, joka kestää siihen asti, että suunnitteluvaihe on päättynyt. Iteratiivisen suunnittelun suunnittelematta jättäminen saattaa johtaa kalliisiin toistotoimenpiteisiin, korjaustyöhön (*eng. rework*) sekä projektikustannusten ylittymiseen. Globaaleissa, useita aikavyöhykkeitä kattavissa ja hajautetuissa suunnitteluprojekteissa suunnittelijoiden väliset kasvokkaiset vuorovaikutustilanteet ovat harvinaisia, mikä vaikeuttaa suunnitteluratkaisun muodostamista. (Mujumdar & Maheswari, 2017, s. 321–324.)

Myös Pere (2016) mainitsee, kuinka heikkolaatuinen suunnittelu voi aiheuttaa asennusvaiheessa muutostarpeita tai johtaa projektin viivästymiseen, joka on kustannuksiltaan kalliimpaa kuin suunnittelutyö (kpl 14, s. 14).

2.1.3 Putkistokannakointi osana prosessilaitoksen elinkaarta

Putkistojärjestelmien elinkaarikustannuksia ja -hallintaa käsittelevässä kirjallisuudessa todetaan, että perinteinen putkistojen hallinta on usein ollut reaktiivista, jolloin ongelmiin puututaan vasta niiden ilmetessä, mikä johtaa tehottomuuteen, turvallisuusongelmiin ja kasvaviin kustannuksiin. Näiden haasteiden todetaan korostuvan erityisesti ikääntyvän putkistoinfrastruktuurin yhteydessä, mikä korostaa tarvetta tarkastella putkistojärjestelmiä koko niiden elinkaaren kattavalla, ennakoivalla lähestymistavalla. (Sani ym., 2025, s. 1; Abubakar ym., 2024, s. 1.)

Elinkaarikustannusten tarkastelussa kirjallisuus tuo esiin, että kustannuksia syntyy useissa eri elinkaaren vaiheissa, mukaan lukien rakentaminen, käyttö, kunnossapito ja käytöstä poisto (Sani ym., 2025, s. 1; Abubakar ym., 2024, s. 2). Elinkaarikustannusten on todettu muodostavan kokonaisuuden, joka kattaa investoinnit, kunnossapidon sekä lopullisen purkamisen tai käytöstä poiston, minkä vuoksi elinkaarikustannusten huomioiminen tukee kokonaisvaltaisempaa taloudellista tarkastelua (Sani ym., 2025, s. 8; Abubakar ym., 2024, s. 7).

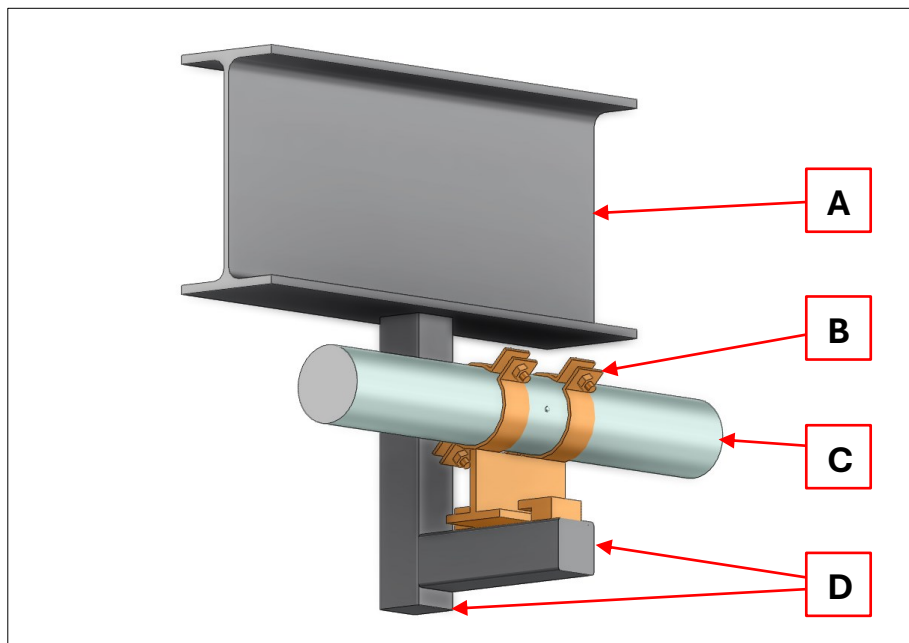
Rakenteellisten ratkaisujen elinkaarinäkökulmaa käsittelevässä tutkimuksessa todetaan, että teknisten rakenteiden elinkaari kattaa suunnittelun ja rakentamisen lisäksi käytön, tarkastukset, kunnossapidon, korjaukset sekä purkamisen ja kierrätyksen. Tutkimuksessa tuodaan esiin, että mikäli päätöksenteko keskittyy ainoastaan alkuperäisten rakennuskustannusten minimointiin, voidaan päätyä rakenteellisiin ratkaisuihin, jotka lisäävät kunnossapitokustannuksia merkittävästi käytön aikana. Lisäksi todetaan, että teknisten rakenteiden odotettu pitkä käyttöikä altistaa ne useille ennakoimattomille tekijöille, kuten ympäristöolosuhteille, kunnossapidon puutteille ja käytöstä johtuvalle rasitukselle. (Jin ym., 2025, s. 1.)

Putkistojen elinkaarikustannuksia käsittelevässä optimointitutkimuksessa esitetään, että putkistohankkeiden kustannustarkastelussa huomioidaan sekä alkuperäiset kustannukset että käytön ja kunnossapidon aikaiset kustannukset eri suunnitteluvaihtoehdoille (Elsebaie & Al-Khomairi, 2022, s. 1835). Tutkimuksessa todetaan, että kunnossapitokustannukset kattavat esimerkiksi odotettavissa olevat korjaustoimenpiteet, kuten putkisegmenttien vaihdot, ja että rakenteiden ikääntyminen vaikuttaa vikataajuuksiin ja sitä kautta kustannuksiin elinkaaren myöhemmissä vaiheissa (Elsebaie & Al-Khomairi, 2022, s. 1838–1839). Elinkaaripohjaisen kustannusoptimoinnin todetaan mahdollistavan merkittäviä kustannussäästöjä ilman, että ratkaisujen laatu heikkenee (Elsebaie & Al-Khomairi, 2022, s. 1845).

Elinkaarikustannusanalyysi tukee kunnossapidon ja resurssien suunnittelua tunnistamalla optimaalisen ajankohdan kunnossapitotoimenpiteille ja vähentämällä odottamattomien vikojen riskiä. Lisäksi todetaan, että elinkaarijatteluun perustuva lähestymistapa mahdollistaa siirtymisen reaktiivisesta toiminnasta ennakoivaan päätöksentekoon, mikä tukee turvallisuutta ja käytettävyyttä pitkän käyttöiän aikana. (Abubakar ym., 2024, s. 7.)

2.2 Putkiston kannakointi

Kuva 3 havainnollistaa tutkimuksessa käytettävät käsitteet rakenneteräs (A), primäärikannake (B), Putki (C) sekä sekundäärikannake (D). Rakenneteräksellä tarkoitetaan itse laitosrakennuksen rakenteellisia teräksiä ja runkoa.



Kuva 3. Putki ja kannakoinnin komponentit havainnollistettuna (tekijän itse laatima).

Putkiston kannakointi rakentuu primääri- ja sekundäärikannakkeista. Primäärikannake on suoraan putkeen kiinnittyvä osa. Primäärikannakkeet kiinnittyvät tai tukeutuvat sekundäärikannakkeisiin, jotka kiinnitetään rakennukseen tai tukirakenteisiin. Kannakoinnin on tuettava putkistoa kuormituksia, kuten putken omapainoa ja sen sisältöä vastaan. Kannakoinnin tulee myös ohjata ja estää putkiston lämpöliikkeitä, jotta lämpölaajeneminen ei kohdista putkistoon liian suuria rasituksia. (PSK Standardintyhdistys ry [PSK], 2021, s. 14–16.)

Primäärikannake voi rakentua useammasta kokoonpantavasta komponentista, kuten Kuva 3 liukujalka. Liukujalka ja siinä olevat putkisangat muodostavat yhdessä primäärikannakkeen. Primääri- ja sekundäärikannakkeiden välisen kitkan pienentämiseksi voidaan näiden väliin asettaa esimerkiksi teflon-levy (PSK, 2021, s. 104–105).

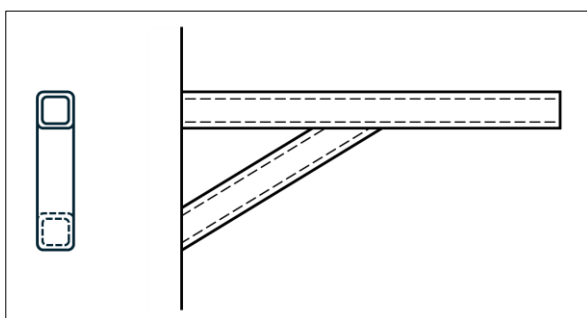
Kannakepaikkojen määrittäminen on luonteeltaan iteratiivinen prosessi, jossa useita vaihtoehtoisia kannakekoonpanoja tarkastellaan peräkkäin. Kannakkeiden sijaintiin vaikuttavat useat tekijät, kuten putken koko ja reititys, raskaiden venttiilien ja liitososien sijainti sekä käytettävissä olevat rakenteet. Käytännön suunnitteluperiaatteena on sijoittaa kannake mahdollisuuksien mukaan putkiston suunnanmuutoksen välittömään läheisyyteen. Kun kannakepaikkojen perusratkaisu on määritetty, seuraava vaihe on arvioida kunkin tukipisteen kuormitus- ja liikeolosuhteet, jotka ohjaavat kannaketyypin valintaa. Kannaketyypin valinnan lähtökohtana on ennakoitu putkiston liike kyseisessä tukipisteessä. Hyvä suunnittelukäytäntö on valita ensisijaisesti mahdollisimman yksinkertainen ja jäykkä kannakeratkaisu ja lisätä rakenteellista monimutkaisuutta vain, mikäli käyttöolosuhteet sitä edellyttävät. Erityisesti merkittäviä pystysuuntaisia liikkeitä omaavissa putkistoissa on tarpeen käyttää jousikannakkeita, kuten muuttuvia tai vakiojousia. Lämpölaajenemiselle alttiiden putkistojen tulee puolestaan voida liukua tai rullata kannakkeissaan, jotta lämpöliikkeistä aiheutuvat rasitukset pysyvät hallinnassa. Putkistokannakoinnin suunnittelulla on merkittävä vaikutus prosessilaitoksen toteutuksen kokonaiskustannuksiin ja aikatauluun, vaikka itse kannakejärjestelmän rahallinen arvo on usein pieni verrattuna tuettavien putkien, venttiilien ja liitososien arvoon. Riittämätön ajallinen panostus kannakkeiden suunnitteluun, hankintaan ja valmistukseen voi johtaa asennusvaiheen viiveisiin sekä tilapäisten tukiratkaisujen käyttöön, mikä kasvattaa kustannuksia ja lisää työmaan kuormitusta. Kannakoinnin suunnittelun tehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi, kun putkistokannakkeiden vaatimukset sovitetaan yhteen jo laitoksen ja putkiston sijoitussuunnitteluvaiheessa. Ihannetilanteessa kannakesuunnittelijalla on mahdollisuus kommentoida putkiston layout-ratkaisuja jo varhaisessa vaiheessa. Yksityiskohtaisessa kannakesuunnittelussa on suositeltavaa pyrkiä rakenteelliseen yksinkertaisuuteen ja yhdenmukaisuuteen. Lisäksi kannakkeen varsinainen tukirakenne tai kiinnityspiste tulee sijoittaa eristyksen ulkopuolelle, jotta putkiston liikkeet eivät vaurioita eristystä. Asennettavuuden kannalta on edullista, että kannakkeet kootaan mahdollisimman pitkälle maan tasolla ennen nostoa lopulliseen asennuspaikkaan. (Di Giacomo, 2000, s. 216–231.)

2.3 Kannakointiratkaisut

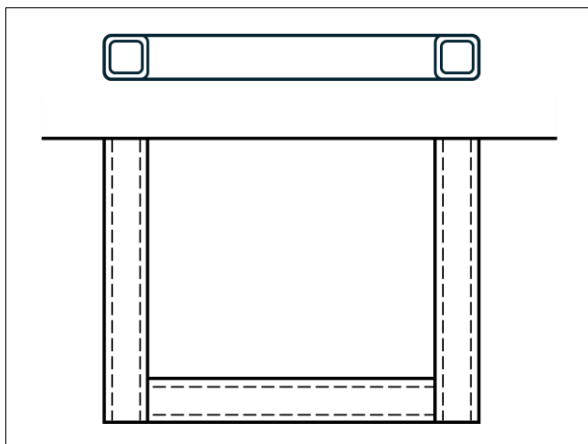
Laitosten putkistoja voidaan tukea useilla eri menetelmillä, ja saman laitosprojektin sisällä saatetaan käyttää useita toisistaan poikkeavia tuentaratkaisuja. Tässä kappaleessa esitetään yleinen katsaus keskeisiin tuentamethodeihin ja niiden ominaispiirteisiin. Di Giacomon (2000) mukaan asianmukainen kannakointiratkaisu tulisi olla keskeinen tavoite jokaisessa suunnittelu- ja rakennusvaiheessa, ja useita putkiston tuentaan liittyviä ongelmia voidaan minimoida tai välttää, kun suunnittelutyöhön keskitytään riittävän varhaisessa vaiheessa putkiston layout-suunnittelua (s. B215). Tässä luvussa esitetyt rajoitteet perustuvat kirjallisuuteen, kun taas luvussa 5 tarkastellaan tutkimusasetelman asettamia rajoitteita.

2.3.1 Hitsatut sekundäärikannakkeet

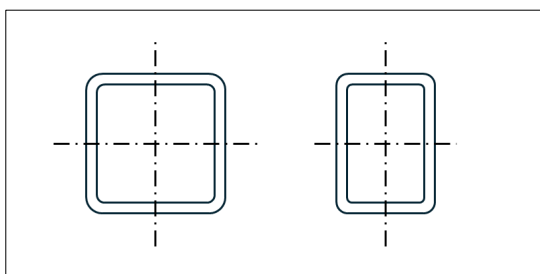
Hitsattuja sekundäärikannakeratkaisuja ovat esimerkiksi PSK-standardien 7390 ulokekannatin (Kuva 4) ja 7391 porttikannatin (Kuva 5). PSK-standardeissa ulokekannattimet ovat määritetty valmistettavaksi putkipalkista (Kuva 6) tai U-, UPN-, tai HE-profiilipalkeista (Kuva 7). Porttikannakkeet puolestaan ainoastaan putkipalkista. Molemmat standardit määrittävät kannakkeet DN10–DN500 kokoisille putkille. Kannakkeet kokoonpannaan piena- tai puoli-V-hitsillä ja kiinnitetään rakenteisiin hitsaamalla. (PSK, 2021, s. 350–361)



Kuva 4. PSK 7390 mukainen ulokekannake, rakenne A . (tekijän itse laatima, pohjautuu PSK, 2021, s. 353).



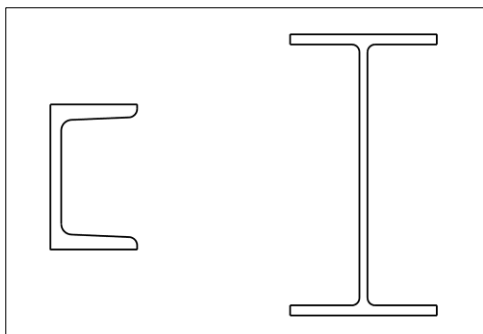
Kuva 5. PSK 7390 mukainen porttikannake, rakenne A (tekijän itse laatima, pohjautuu PSK, 2021, s. 361).



Kuva 6. SFS-EN 10219 mukainen neliö- ja suorakaiderakenneputkien poikkileikkaukset (tekijän itse laatima, pohjautuu SFS, 2019, s. 27, 34).

Kuva 6 havainnollistaa kuvissa Kuva 4 ja Kuva 5 käytettyjen putkipalkkien profiilin yleiseurooppalaisen standardin mukaan. Kokoonpanokuvissa katkoviivalla havainnollistetaan putken sisäseinämää.

Neliön muotoisesta rakenneputkesta käytetään myös termiä SHS (*Square Hollow Section*) ja suorakaiteen muotoisesta RHS (*Rectangle Hollow Section*). Onttojen profiilien päiden jäädessä näkyviin ne usein tulpataan joko hitsaamalla avoimiin pätyihin teräspalat, tai asentamalla muovinen tai kuminen esivalmistettu tulppa. Esivalmistetut tulpat ovat valmiita kaupallisia ratkaisuja, joiden kiinnittämiseen ei tarvita hitsaamista, tulitöitä tai paikkamaalauksia. Peittämällä avoimen profiilin pääty estetään roskien, korroosiota aiheuttavien elementtien, pieneläinten ja vastaavien haittatekijöiden pääsy putken sisään.



Kuva 7. SFS-EN 10219 viistolaippainen U- ja UPN- sekä tasalaippainen HE-profiili (tekijän itse laatima, pohjautuu SFS, 2019, s. 6–7).

Hitsaus ja muut kipinöitä synnyttävät työt ovat tulityötä, jotka vaativat tulityöluvan ja tulityövärtijan, ja joka tulee suorittaa vakituisella tai väliaikaisella tulityöpaikalla. Tulitöitä tehdään tyypillisesti rakennusten korjaustöissä, uudisrakentamisessa ja teollisuudessa. Tulityöluva on määräaikainen lupa, joka määrittää suojaustoimenpiteet, tulityön keston ja tulityötä suorittavat henkilöt. Ennen tulitöiden suorittamista tulisi harkinta, voiko työn tehdä ilman tulipalon vaaraa aiheuttavilla metodeilla, kuten mekaanisilla työstö- tai liitostavoilla. (Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK, n.d.)

Toimeksiantajaorganisaation palveluksessa olevien asiantuntijoiden kanssa käytyjen vapaamuotoisten haastattelujen perusteella sekundäärisiä teräsrakenteita voidaan valmistaa aliurakoitsijoiden toimesta konepajaympäristössä esivalmisteina. Tällöin työmaalla tehtävä hitsaustyö rajoittuu pääosin sekundääriterästen kiinnittämiseen laitoksen rakenteisiin sekä mahdollisiin korjaustoimenpiteisiin. Haastattelujen mukaan konepajalla esivalmistetut sekundäärikannakkeet toimitetaan työmaalle tyypillisesti valmiiksi hitsattuina ja pintakäsiteltynä, mikä vähentää työmaalla suoritettavan valmistustyön määrää.

Standardi SFS-EN ISO 8501-3:2025 tuo ilmi, kuinka hitsauskohdissa, reunoissa ja muilla teräspinnan epätasaisuuksilla esiintyvät virheet toimivat usein korroosion alkupisteinä. Tällaiset alueet ovat myös vaikea suojata maaleilla ja muilla pinnoitteilla (SFS, 2025). Korroosiolla tarkoitetaan käsittelemättömälle paljaalle metallipinnalle muodostuvaa ruostetta.

Seppälän (2020) mukaan hitsaus on yleisin liittämismenetelmä teräksille ja erilaisille metalliseoksille ja jossa kahden liitettävän perusaineen ominaisuuksien tulisi olla mahdollisimman yhtenevät onnistuneen hitsin aikaansaamiseksi. Mikäli hitsin ja perusaineen välillä on metallurginen tai fysikaalinen yhteensopimattomuus, voi liitos antaa periksi, jolloin kaksi liitettyä osaa irtoavat toisistaan esimerkiksi repeämällä. Juuri repeäminen on yleinen merkki epäonnistuneesta hitsauksesta. Ongelma ilmenee varsinkin korjaushitsauksessa, esimerkiksi vanhoissa rakenteissa, joissa perusaineen koostumuksesta ei ole varmaa tietoa. (s. 1–15)

Jo hitsaustyötä suunniteltaessa tulee huomioida kohteeseen kohdistuvat kuormat ja niiden tyyppi. Suunnittelijan on hitsausliitoksen mitoituksessa otettava huomioon, kohdistuuko siihen väsymis-, isku- vai staattinen kuormitus, ja liitostyön jälkeen tulee lisäksi suorittaa visuaalinen tarkastus hitsin mittojen ja koko rakenteen mittatarkkuuden varmistamiseksi (Bohnart, 2018, s. 132). Hitsaukseen liittyy aina myös riski epäkohdista, jotka voivat johtua hitsaajan ammattitaidosta, materiaalien epäsojivuudesta, vääristä hitsausparametreista tai hitsattavien pintojen puutteellisesta esivalmistelusta. Bohnart (2018) listaa epätäydellisen tai liiallisen tunkeuman, metallipurseet, ontelot, epätäydellisen sulautumisen, huokoisuuden, vääntymisen, hitsin halkeilun, roiskeet, epäsäännöllisen hitsimuodon ja alileukkauksen hitsaukseen liittyvinä haasteina. Hitsauksen onnistumisen haasteiden lisäksi hitsaustyössä on hitsaajaan kohdistuvia turvallisuus- ja terveysriskejä. Joidenkin metallien, kuten lyijyn, kadmiumin, kuparin, sinkin ja berylliumin hitsaus synnyttää myrkyllisiä höyryjä, joita voidaan hallita joko tilan ilmanvaihdolla tai hengitysteitä suojaavilla henkilökohtaisilla suojaimeilla (s. 718–721).

Vapaamuotoisten asiantuntijahaastatteluiden mukaan hitsattujen rakenteiden käyttöön liittyy useita haasteita, jotka korostuvat erityisesti laitossympäristöissä. Näitä haasteita voidaan tarkastella laadunvarmistuksen, kohteen asettamien rakenteellisten rajoitteiden sekä työskentely- ja ympäristöolosuhteiden näkökulmista.

Sinkkipinnoitettuja rakenteita esiintyy paljon laitoksissa sen hyvän korroosionsietokyvyn takia. Hitsattaessa sinkkimaalattuja tai kuumasinkittyjä osia tulee liitoskohdat ensin puhdistaa sinkistä ja maalista esimerkiksi kulmahiomakoneella, jotta myrkyllisten kaasujen ja roiskeiden muodostuminen estetään ja jotta liitoksesta tulee kestävä.

Laadunvarmistuksen kannalta keskeinen haaste liittyy hitsin tunkeuman ja liitoksen rakenteellisen eheyden varmistamiseen. Mikäli hitsin tunkeuma on puutteellinen tai hitsi ei ole sulautunut perusaineeseen suunnitellulla tavalla, ei sekundäärikannake välttämättä saavuta sille mitoituksessa asetettua lujuutta. Tällöin kannakoitu putkisto voi kuormittaa rakennetta ennakoitua enemmän, mikä voi johtaa putkiston vaurioitumiseen, liiallisten siirtymien syntymiseen tai pahimmassa tapauksessa kannakkeen irtoamiseen. Tällaiset vauriot voivat aiheuttaa merkittävää vaaraa sekä prosessin turvalliselle toiminnalle että työmaalla työskentelevälle henkilöstölle. Laadunvarmistukseen liittyy lisäksi korroosioneston onnistuminen, joka on olennaista rakenteen käyttöiän kannalta. Hitsauskohdat, terävät reunat ja liitosten epätasaisuudet toimivat tyypillisesti korroosion aloituspisteinä, ja niiden suojaaminen vaatii huolellista jälkikäsittelyä. Mikäli hitsaus tehdään työmaalla jo pinnoitettuihin rakenteisiin, joudutaan pintakäsittely poistamaan hitsausalueelta ja myöhemmin palauttamaan. Tämä lisää työvaiheita ja kasvattaa riskiä siitä, että pinnoite jää puutteelliseksi, mikä voi johtaa ennenaikaiseen korroosioon.

Kohteen asettamat rakenteelliset rajoitteet muodostavat toisen merkittävän haastekokonaisuuden. Esimerkiksi laitoksen runkorakenteisiin toteutettu palosuojamaalaus voi rajoittaa hitsattavien rakenteiden sijoittelua ja kiinnitystapaa. Palosuojamaalattu pinta on yleensä tarkoitettu säilytettäväksi ehjänä, eikä sen poistaminen hitsausta varten ole suotavaa ilman erillistä hyväksyntää ja jälkikäsittelyä. Hitsaus edellyttää kuitenkin, että kaikki pintakäsittelyt poistetaan liitoskohdasta, mikä lisää työn laajuutta ja voi heikentää rakenteen paloteknisiä ominaisuuksia, mikäli pinnoitteen palautus jää puutteelliseksi.

Työskentely- ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat merkittävästi hitsaustyön laatuun erityisesti rakennusvaiheessa. Uusissa toimitusprojekteissa sekundäärikannakkeita ja tukirakenteita hitsataan usein ennen kuin laitoksen katto ja sääsuojaus ovat valmiit. Tällöin rakenteet altistuvat sateelle, kosteudelle ja lialle, jotka voivat heikentää hitsausliitoksen laatua ja lisätä korroosioriskiä suojaamattomilla teräspinnoilla. Kosteus hitsauskohdassa voi myös vaikeuttaa hitsaustyötä ja heikentää liitoksen mekaanisia ominaisuuksia.

2.3.2 Modulaariset sekundäärikannakkeet

Vaihtoehtona hitsatuille rakenteille ovat mekaanisesti kokoonpantavat, niin sanotut modulaariset rakenteet, jotka kiinnittyvät toisiinsa valmistajakohtaisilla komponenteilla ja ruuviliitoksilla. Liitoskomponentit ovat varastotavaraa ja itse palkit ovat mittaan sahattavaa profiilia, jossa on reikäkuviointi kiinnitystä varten. Pulttiliitokset ovat helpompia ja nopeampia asentaa, kun taas hitsausliitokset ovat suositumpia, vaikka ne vaativat enemmän aikaa ja työtunteja (Rayaprolu, 2009, s. 299).

Zohourian ym. (2025) mukaan modulaaristen ratkaisujen käytön on todettu tuovan useita etuja, kuten parantuneen työturvallisuuden, vähentyneen uudelleentyön määrän sekä energian, hiilidioksidipäästöjen ja veden käytön vähenemisen. Näistä hyödyistä huolimatta modulaarisiin järjestelmiin liittyy myös merkittäviä haasteita, kuten varhainen suunnittelun lukkiutuminen ja siitä seuraava rajoittunut suunnittelun joustavuus, korkeat alkuinvestointikustannukset sekä kokeneiden ammattilaisten puute (s. 17). Lisäksi järjestelmien välinen yhteensopimattomuus sekä modulaaristen komponenttien standardoinnin tarve voivat rajoittaa näiden ratkaisujen skaalautuvuutta (Ali ym., 2024; Lee & Lee, 2021, viitattu teoksessa Zohourian ym., 2025).

Hořínková (2021) tuo esiin, että modulaariseen rakentamiseen liittyy muun muassa vaativampi koordinoitintarve, tarkemmat suunnitteluvaatimukset sekä logistisia haasteita, jotka voivat heikentää ratkaisun kustannustehokkuutta tai toteutettavuutta tietyissä kohteissa (s. 1, 6–7). Lisäksi modulaaristen ratkaisujen käyttö edellyttää erityisosaamista jo suunnitteluvaiheessa, ja puutteellinen ymmärrys modulaarisuuden reunaehdoista voi johtaa siihen, ettei järjestelmän potentiaalisia hyötyjä saavuteta käytännössä (Hořínková, 2021, s. 6). Hořínková (2021) korostaa myös, ettei modulaarista rakentamista voida pitää yleispätevänä vaihtoehtona perinteisille ratkaisuille, vaan rakenteellisen ratkaisun valinta edellyttää tapauskohtaista arviointia, jossa huomioidaan kohteen tekniset vaatimukset, tuotannolliset edellytykset ja taloudellinen konteksti (s. 8).

Yksi modulaaristen sekundäärikannakeratkaisujen keskeisistä rajoitteista liittyy niiden kuormitettavuuteen ja rakenteelliseen jäykkyyteen erityisesti dynaamisesti kuormitetuissa kohteissa.

Cabaleiro ym. (2021) osoittavat kokeellisesti, että liitostyyppillä on merkittävä vaikutus rakenteen jäykkyyteen ja käyttäytymiseen värähtelykuormituksessa. Tutkimuksessa havaittiin, että clamp-tyyppiset liitokset vaurioituivat pienemmillä siirtymäamplitudeilla kuin perinteiset pulttiliitokset, mikä viittaa modulaaristen liitosten rajallisempaan kestävyteen suurissa dynaamisissa kuormitustilanteissa (s. 15). Lisäksi pulttien esikiristuksen menetyksen todettiin heikentävän liitoksen puristusvoimaa ja siten myös rakenteen jäykkyyttä, mikä korostaa pulttiliitoksiin perustuvien järjestelmien herkkyyttä löystymiselle ja kuormituksen aikaisille muutoksille (Cabaleiro ym., 2021, s. 3).

Teollisissa rakenteissa dynaamiset kuormat ovat yleisiä, sillä rakenteet tukevat usein liikkuvia koneita ja laitteita, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia kannakeratkaisujen jäykkyydelle ja pitkäaikaiselle toimivuudelle (Cabaleiro ym., 2021, s. 3). Cabaleiro ym. (2021) raportoivat myös, että clamp-liitokset kestivät merkittävästi pienempiä dynaamisia siirtymiä verrattuna pulttiliitoksiin, vaikka liitosten koko ja pulttien määrä olivat samat, mikä rajoittaa niiden soveltuvuutta suuriin kuormiin ja värähtelyherkkiin kohteisiin (s. 15). Du ym. (2025) puolestaan osoittavat, että pulttiliitosten yksi merkittävimmistä vauriomuodoista on löystyminen, ja että toistuva värähtely on keskeinen löystymistä aiheuttava tekijä (s. 7). Tämänkaltaiset ilmiöt korostuvat erityisesti kohteissa, joissa rakenteet altistuvat jatkuville tai satunnaisille dynaamisille kuormille. Aikaisemmassa tutkimuksessa tuodaan esiin se, kuinka pulttiliitosten vauriot voivat muodostaa merkittävän rakenteellisen turvallisuusriskin vaativissa käyttöympäristöissä (Du ym., 2025, s. 2). Lisäksi liitosten kiristysmomentin todetaan vaikuttavan suoraan rakenteen jäykkyyteen ja ominaistajuuksiin, mikä korostaa liitosten esikiristuksen merkitystä rakenteellisen toiminnan kannalta (Du ym., 2025, s. 11). Pulttiliitosten käyttäytyminen dynaamisessa kuormituksessa ei myöskään ole täysin lineaarista, vaan siihen liittyy kitkakosketuksista johtuvia epälineaarisia vasteita, jotka voivat vaikeuttaa rakenteen ennustettavaa käyttäytymistä (Du ym., 2025, s. 13).

Ahmed ym. (2025) raportoivat, että vaadittujen palonkestoluokkien saavuttaminen teräsrakenteissa on perustunut esimerkiksi useiden levy- ja eristekerrosten käyttöön, joiden avulla palonkestoa voidaan parantaa merkittävästi (s. 13). Lisäksi he toteavat, että palon ja rakenteellisen sortuman yhteisvaikutuksia koskeva tutkimustieto on edelleen osin rajallista, mikä viittaa siihen, ettei modulaaristen rakenteiden palonkestoon liittyvä tietopohja ole kaikilta osin yhtä kattava kuin vakiintuneissa rakenneteräsratkaisuissa (Ahmed ym., 2025, s. 24).

Rakenteellisesta näkökulmasta modulaaristen järjestelmien toiminta on vahvasti riippuvainen liitosten ja liitosalueiden ominaisuuksista. Teräsrakenteiden rakenteellinen käyttäytyminen ja kokonaislestävyys määräytyvät pitkälti liitosten kuormankantomekanismien, rakenteellisen eheyden, sitkeyden, energian vaimennuskyvyn sekä liitosten kiertojäykkyyden perusteella. Toleranssien kumuloituminen voi johtaa kohdistusvirheisiin ja lisätä rakenteen alttiutta liukupohjaisille vaurioille sivuttaiskuormituksessa. Lisäksi pulttiliitosten todetaan olevan alttiita korroosiolle kosteissa ympäristöissä, mikä on huomioitava modulaarisia kannakeratkaisuja suunniteltaessa teollisissa ja prosessilaitosympäristöissä. (Ahmed ym., 2025, s. 13–15.)

Ahmed ym. (2025) tuovat esiin, että liitosten kokoamista varten tehdyt aukotukset voivat heikentää teräsrakenteiden kantokykyä, ja että erityisesti aukon koon kasvu vähentää merkittävästi rakenteen nurjahduskestävyyttä (s. 13). Vaikka aukkojen sijainnin ja muodon vaikutusten todetaan olevan pienempiä, tietyt aukkomuodot kuten neliskulmaiset aukot voivat aiheuttaa suuremman kapasiteetin aleneman verrattuna muihin geometrioihin (Ahmed ym., 2025, s. 13).

Design for Assembly (DFA) ja Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) ovat suunnittelustrategioita, joiden tavoitteena on huomioida kokoonpanon ja valmistuksen vaatimukset jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa.

DFA-kirjallisuudessa on tunnistettu, että yksi keskeinen puute monissa DFA-lähestymistavoissa on kokoonpanon tarkastelu irrallaan todellisesta tuotanto- tai asennusympäristöstä, jolloin suunnitteluratkaisujen vaikutukset käytännön toteutukseen jäävät puutteellisesti huomioituiksi. Lisäksi on havaittu, että monilla suunnittelijoilla, erityisesti uransa alkuvaiheessa olevilla, on rajallinen ymmärrys siitä, miten yksittäiset suunnittelupäätökset vaikuttavat laajempaan tuotantojärjestelmään, mikä heikentää DFA-periaatteiden systemaattista soveltamista. (Moultrie & Maier, 2014.)

DFMA laajentaa DFA-ajattelua yhdistämällä kokoonpanon ja valmistuksen näkökulmat osaksi yhtenäistä suunnittelustrategiaa. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen perusteella DFMA:n on todettu edistävän suunnittelutehokkuutta, yksinkertaistavan valmistus- ja kokoonpanoprosesseja sekä pienentävän kustannuksia (Holt & Barnes, 2010; Benabdellah ym., 2019; Chowdary ym., 2019, viitattu teoksessa González-Varona ym., 2022, s. 2–3). DFMA:n keskeisiä periaatteita ovat tuotteen rakenteen yksinkertaistaminen, komponenttimäärän vähentäminen sekä valmistus- ja asennusvaiheiden selkeyttäminen, millä voidaan lyhentää suunnittelu- ja valmistusaikaa sekä parantaa kustannus- ja aikatauluhallintaa (González-Varona ym., 2022, s. 4).

Taloudellisesta näkökulmasta modulaariset sekundäärikannakkeet voivat joissain tapauksissa olla materiaalikustannuksiltaan kalliimpia kuin paikallisesti valmistetut hitsatut rakenteet. Mikäli suunnittelun, asennuksen ja muutostöiden tuomia hyötyjä ei realisoidu projektissa esimerkiksi vähäisten muutosten tai rakenteellisen yksinkertaisuuden vuoksi, modulaaristen ratkaisujen kokonaiskustannusetu voi jäädä saavuttamatta. Samankaltaisia havaintoja on esitetty myös Kalliokuljun (2024) tekemässä diplomityössä, jossa modulaaristen kannakkeiden todettiin olevan alkuvaiheessa noin 12 % kalliimpia kuin rakenneteräksiset ratkaisut, mutta kustannuseron arvioitiin tasoittuvan tai kääntyvän modulaaristen ratkaisujen eduksi erityisesti kohteissa, joissa asennus on haastavaa tai suunnitelmamuutoksia tapahtuu projektin aikana, kun taas yksinkertaisissa ja muuttumattomissa kohteissa perinteiset ratkaisut osoittautuvat usein kustannustehokkaammiksi (Kalliokulju, 2024, s. 3).

Edellä mainittujen rajoitteiden perusteella modulaariset sekundäärikannakkeet soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa rakenteiden muunneltavuus, nopea asennus ja muutosten hallinta ovat keskeisiä vaatimuksia. Vastaavasti kohteissa, joissa kuormat ovat suuria, rakenteet yksilöllisiä tai käyttöolosuhteet poikkeuksellisen vaativia, perinteiset hitsatut sekundäärikannakkeet voivat edelleen olla teknisesti ja taloudellisesti perustellumpi ratkaisu.

Markkinoilla on useita toisistaan eroavia ratkaisuja, joista tässä tutkimuksessa perehdytään kahteen maailmanlaajuisesti saatavilla ja käytössä oleviin ratkaisuihin.

Sikla

Sikla on vuonna 1967 perustettu yritys, jonka alkuvaiheen tuotevalikoima koostui kahdesta putkiston kiinnittämiseen suunnitellusta tuotteesta. Yrityksen perustamisen aikaan putkikannakkeet valmistettiin tyypillisesti tapauskohtaisesti paikallisten metallialan toimijoiden toimesta, ja standardoitujen, teollisesti valmistettujen kannakeratkaisujen tarjonta oli rajallista. Tässä toimintaympäristössä Siklan kehityssuunta painottui vakioitujen ja systemaattisesti kehitettävien putkikannakeratkaisujen tarjoamiseen. Yrityksen oman kuvauksen mukaan sen toimintaa on alusta lähtien ohjannut pyrkimys rakenteellisesti yksinkertaisempien ja asennuksen kannalta tehokkaampien ratkaisujen kehittämiseen, mikä on vaikuttanut tuotevalikoiman asteittaiseen laajentumiseen. Siklan toiminta keskittyy tuotekehitykseen yhteistyössä asiakkaiden ja toimittajien kanssa sekä tuotteiden jakeluun myyntikanavien ja valtuutettujen jälleenmyyjien kautta (Sikla, 2017, s. 4).

Siklan ensimmäinen laajemmin prosessi- ja laitossuunnittelun tarpeisiin soveltuva monikäyttöinen tukijärjestelmä oli vuonna 1998 lanseerattu Simotec. Tätä seurasi Framo 80 -järjestelmä vuonna 2006, jota kehitettiin edelleen vuonna 2014 vastaamaan laajempaa kevyiden ja keskiraskaiden laitossovellusten kirjoa. Framo-järjestelmä uudelleennimettiin siFramoksi vuonna 2017 (Sikla, n.d.-a; Sikla, 2017).

Kuva 8 sisältää siFramo-järjestelmästä koostuvia sekundäärikannakkeita, joiden päällä on useita erityyppisiä primäärikannakkeita. Pystysuorassa oleva runkopalkki kiinnittyy yläpäästään laitosrakennuksen teräsrunkoon. Pystysuoraan palkkiin on kiinnitetty vaakatasossa elementtejä, joiden päällä putkien primäärikannakkeet lepäävät. Osa kannakkeista on vapaasti liikkuvia ja osassa on erikseen vaakatukeen kiinnitetyt kynnet, joiden suuntaan kannake pääsee liukumaan. Kynsien toiminto on rajoittaa primäärikannakkeen ja tätä myöden putken liike vain sen oman akselin suuntaiseksi.

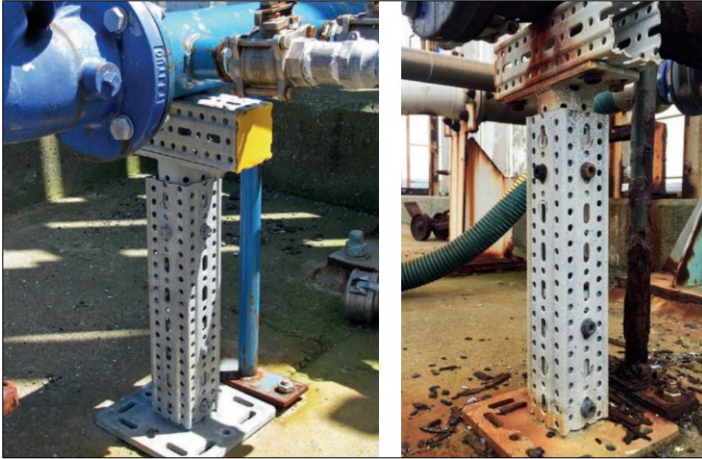


Kuva 8. Sikla SiFramo-järjestelmä asennettuna putkien sekundäärikannakkeeksi (Sikla, n.d.-b).

Materiaalit

Siklan HCP korroosiosuojaus on saatavilla kolmessa eri tyypissä: Sinkki-magnesium, sinkki-nikkeli- tai sinkkihiutalepinnoitteisena. Sinkki-magnesium pinnoitteella saadaan pinnoitteen paksuutta laskettua noin kolmasosan. Vaikka pinnoite on ohuempi, saavutetaan vähintään vastaava korroosionkestävyys, kuin kuumagalvanoinnilla. Sinkki-nikkelipinnoitteessa kappaleen pintaan muodostuu noin 15 %:n nikkelpitoisuus. Suolasumutestin tuloksena pinnoitekerros todettu kovemmaksi ja korroosionkestävyydeltään paremmaksi, kuin pelkkä sinkkipinnoite. Sinkkihiutalepinnoite on termoaktiivinen järjestelmä, jossa on korkea sinkki- ja alumiinihiutalepitoisuus. Tällä varmistetaan katodinen korroosiosuoja ja korkean sähköjohtavuuden metallisissa kerroksissa. Siklan HCP-järjestelmän tuotteet ovat korroosioluokan C4 ja DIN EN ISO 12944-2 -standardin mukaisia. (Sikla, 2021, s. 9)

Kuva 9 ja Kuva 10 ovat korroosioluokituksesta äärimmäisissä olosuhteissa testattuja kappaleita. Kuva 9 on *offshore*, eli meriolosuhteille altistuneesta ympäristöstä, jossa suolapitoisuudet ovat korkeita. Siklan valmistaman sekundäärikannakkeen takana oleva sininen pystytuki on ruostunut lähes kokonaan. Kuva 10 puolestaan osoittaa, että kuumagalvanointia parempi ratkaisu *offshore* -tyyppisiin käyttökohteisiin on esimerkiksi sinkkihiutalepinnoite.



Kuva 9. Siklan kannake verrattuna hitsattuun kannakeratkaisuun kuuden vuoden vertailuvälillä offshore-käytössä. (Sikla, 2021, s. 9).



Kuva 10. Kuumagalvanoitu ja sinkkihiutalepinnoitettu kappale suolasumutestin jälkeen (Sikla, 2022, s. 2).

Siklan modulaaristen sekundäärikannakkeiden tekninen soveltuvuus ja käyttörajat on määritelty eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) kautta. SiFramo-järjestelmää koskevan ETA-dokumentaation mukaan järjestelmä koostuu korroosiosuojatuista teräskomponenteista, jotka muodostuvat pystyelementeistä, vaakapalkeista ja tarvittaessa jäykisteistä, ja jotka liitetään toisiinsa palkkipääliittimien avulla. (Luxembourg Institute for Building and Technology [LUXIB], 2024a, s. 2.)

Järjestelmä on tarkoitettu käytettäväksi pääasiassa staattisesti kuormitetuissa liitoksissa, kuten omapainon ja tuulikuormien alaisissa rakenteissa, mikä rajaa sen soveltuvuuden tiettyihin kuormitustilanteisiin.

ETA-arvioinnissa SiFramo-järjestelmän teräskomponenteille on oletettu 10 vuoden käyttöikä, jota käytetään mitoituksen ja tuotteen soveltuvuuden arvioinnin perusteena, mutta jota ei tule tulkita valmistajan antamaksi takuuksi. Lisäksi dokumentaatio korostaa, että järjestelmän ilmoitetut suorituskyvyt ovat voimassa ainoastaan silloin, kun komponentteja käytetään ETA:ssa määriteltyjen reunaehtojen mukaisesti ja asennus toteutetaan valmistajan asennusohjeiden mukaan. SiFramo-järjestelmässä käytettävien liitosten osalta ETA-dokumentaatio tuo esiin myös uudelleenkäytettävyyteen liittyviä rajoitteita. Järjestelmässä hyödynnettävien FLS F -ruuvien muodostamat kierteet eivät ole tarkoitettu uudelleenkäyttöön, mikä on huomioitava erityisesti asennus- ja muutostilanteissa. (LUXIB, 2024a, s. 3.)

Vastaavasti FLS F -kiinnitysruuveja koskevassa ETA-dokumentaatiossa todetaan, että ruuvit on tarkoitettu metalliosien kiinnittämiseen metallisiin alusrakenteisiin pääasiassa staattisten kuormien alaisissa liitoksissa, ja että näille kiinnityselementeille on oletettu vähintään 25 vuoden käyttöikä mitoituksen lähtökohtana. Myös näiden komponenttien osalta käyttöikäarvio toimii suunnittelua tukevana oletuksena eikä valmistajan antamana takuuna. (LUXIB, 2024b, s. 2.)

Hilti

Hilti on Liechtensteinissa vuonna 1941 perustettu rakennus- ja kiinnitysteknologian toimittaja. Yrityksen kehitys on varhaisista vaiheista lähtien kytkeytynyt teknologisiin innovaatioihin erityisesti mekaanisten kiinnitysratkaisujen ja asennusteknologioiden alueella, mikä on osaltaan ohjannut sen laajentumista kansainväliseksi toimijaksi. 1960-luvulla Hilti kehitti ensimmäisiä mekaanisia ankkurijärjestelmiään, ja yrityksen toiminta laajeni samanaikaisesti useisiin maihin Euroopassa ja sen ulkopuolella. Näiden kehitysvaiheiden myötä Hilti on vakiinnuttanut asemansa kiinnitys- ja tukiratkaisuihin erikoistuneena toimittajana, jonka tuote- ja järjestelmäkehitys muodostaa taustan myös myöhemmin kehitettyjen modulaaristen tukijärjestelmien tarkastelulle. (Hilti, n.d.-a.)

Prosessi- ja laitossuunnittelun näkökulmasta Hilti tarjoaa modulaarisia tukiratkaisuja MT-asennusjärjestelmän kautta. MT-järjestelmä perustuu vakioituihin teräsprofiileihin, kuten kiskoihin ja palkkeihin, sekä mekaanisiin liitoksiin, joiden avulla voidaan muodostaa erilaisia sekundääriskannakkeita putkistoille ja muille taloteknisille järjestelmille. Järjestelmä on suunniteltu siten, että yksittäiset komponentit ovat yhteensopivia keskenään ja mahdollistavat rakenteiden joustavan kokoonpanon kohdekohtaisen tarpeen mukaan. Valmistajan dokumentaation mukaan järjestelmän tavoitteena on yksinkertaistaa suunnittelua ja asennusta vakioituilla komponenteilla sekä vähentää työmaalla tehtävän kokoonpanon monimutkaisuutta. Lisäksi MT-järjestelmä on tarkoitettu käytettäväksi laajalla kuormitusalueella ja erilaisissa käyttöympäristöissä, mukaan lukien sisä- ja ulkotilat, mikä asettaa vaatimuksia myös järjestelmän korroosionkestävyydelle. (Hilti, n.d.-b.)

Materiaalit

Hiltin MT-järjestelmä on saatavilla sinkki-magnesium (ZM) päällysteisenä, joka sisältää sekoiteaineina magnesiumia sekä alumiinia, jolloin yhdiste on ZnAlMg (Hilti, 2023). Kuva 11 esittää mikroskooppinäkömään, jossa on verrattuna kuumagalvanoitu sekä sinkki-magnesium -pinnoitteiset kappaleet. Sinkki–alumiini–magnesium-pinnoitteiden korroosionkesto on todettu erityisen hyväksi leikkausreuna-alueilla, jotka ovat rakenteellisesti alttiita korroosiolle.

Kim *ym.* (2024) toteavat, että Zn–Al–Mg-pinnoitteet tarjoavat perinteisiä sinkkipinnoitteita paremman suojan leikkausreunakorroosiota vastaan, ja että tähän liittyy pinnoitteen kyky muodostaa suojaavia korroosiotuotteita, kuten kerroksellisia kaksoishydroksideja (LDH) ja magnesiumhydroksidia (s. 1). Lisäksi Kim *ym.* (2024) viittaavat Sheikholeslami *ym.* (2021) sekä Yıldızin ja Dehrin (2015) havaintoihin, joiden mukaan leikkausreuna-alueilla paljas metallipinta on suorassa kosketuksessa ympäröivän ilman ja kosteuden kanssa, mikä edistää korroosion käynnistymistä (s. 2).



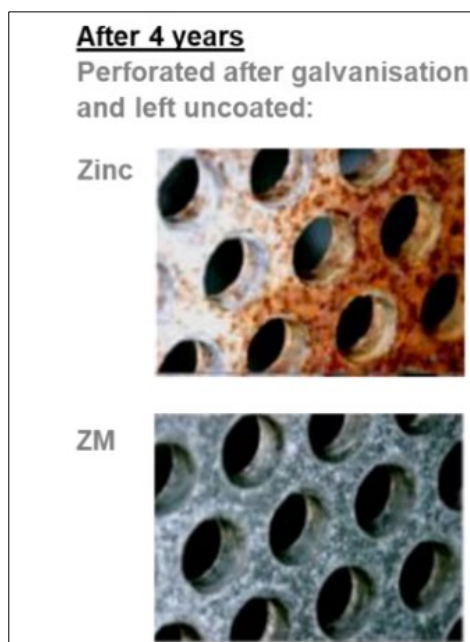
Kuva 11. Kuumagalvanointi ja sinkki-magnesium (ZM) pinnoitteet, mikroskooppinäkömää (Hilti, 2023).

Kuumagalvanoinnin rajoitteiksi esitetään epätasainen korroosiosuojaus geometrialtaan monimutkaisissa kappaleissa kuten kiskoissa ja rei'itetyissä kappaleissa sekä käsittelyn jälkeen tapahtuneiden pinnoiterikkoumien paikkaustarve. Sinkkimagnesium-pinnoitteen eduiksi puolestaan mainitaan vähentynyt korjaustarve, sillä sahatut tai leikkaantuneet pinnat eivät vaadi jälkikäsittelyä sinkkimagnesium-pinnoitteen itsekorjautuvuuden vuoksi. Lisäksi etuina listataan suurempi kovuus pinnoitteessa, matalammat hiilidioksidipäästöt, prosessi- ja hintaoptimoinnit käsittelyn aikaisen vaiheen vuoksi sekä suurempi korroosiokestävyys. (Hilti, 2023.)

Kuva 12 ja Kuva 13 havainnollistavat Hiltin mainitseman itsekorjautuvuuden sinkki-magnesium-pinnoitteessa sekä sen korroosiokestävyyden. Osia joudutaan usein muokkaamaan työmaalla joko esivalmisteen kokoonpanoa varten tai korjaustyön takia. Itsekorjautuva pinnoite nopeuttaa tällöin asennusta työmaalla, kun leikattuja komponentteja ei tarvitse enää paikkamaalata sinkkimaalilla.



Kuva 12. itsekorjautuvuus havainnollistettuna viikon, 15 kuukauden ja 25 kuukauden jälkeen (Hilti, 2023).



Kuva 13. Puhdas sinkki ja sinkki-magnesium verrattuna 4 vuoden kuluttua (Hilti, 2023).

2.4 Suunnitteluprosessin resurssit ja kustannukset

Lean-ajattelun näkökulmasta suunnittelu- ja insinööriyössä korostuu tarve kohdistaa käytettävissä olevat resurssit arvoa tuottaviin toimintoihin siten, että asiakas saa tavoitellun lopputuloksen budjetin ja aikataulun puitteissa. Tämän edellytyksenä on tunnistaa ne mekanismit, jotka synnyttävät hukkaa suunnittelu- ja insinööriprosesseissa. Suunnitteluvaiheessa hukkaa voi syntyä erityisesti silloin, kun lähtötiedot ja vaatimukset ovat puutteellisia, mikä johtaa iteratiiviseen kokeilu-erehdys-tyyppiseen työskentelyyn. Tällöin ratkaisua verrataan jatkuvasti tarkentuvaan vaatimuskokonaisuuteen ja sitä muokataan tarpeen mukaan, mikä sitoo aikaa ja asiantuntijaresursseja. (Bonnier *ym.*, 2015, s. 463–465.)

Suunnitteluprosessi ei pääty välttämättä silloin, kun paras mahdollinen ratkaisu on saavutettu, vaan usein silloin, kun suunnittelijoiden käytettävissä oleva aika loppuu. Tällaisessa tilanteessa päätöksiä joudutaan tekemään sen perusteella, mikä koetaan riittävän hyväksi suhteessa alkuperäisiin vaatimuksiin (Bonnier *ym.*, 2015, s. 465; Reinertsen, 1997, viitattu teoksessa Bonnier *ym.*, 2015). Bonnier *ym.* (2015) tuovat esiin, että suunnittelussa tapahtuva oppiminen voi olla luonteeltaan asteittaista ja ilmetä esimerkiksi CAD-ohjelmistojen käytön tehostumisena. Tällainen oppiminen on tärkeää olemassa olevien työtapojen parantamisessa ja jatkuvassa kehittämisessä, mutta se edellyttää myös luovaa panostusta ja aikaa (s. 466).

Rakennusprojekteissa suunnittelumuutokset ovat yleisiä ja niiden on havaittu olevan merkittävä tekijä aikataulujen venymisessä ja kustannusten kasvussa (Muhamad & Mohammad, 2018, s. 1). Suunnittelumuutoksilla tarkoitetaan sopimuksen solmimisen jälkeen tapahtuvia lisäyksiä, poistoja ja muutoksia, jotka vaikuttavat sekä suunnittelu-että rakennustyöhön ja tekevät projektin toteutuksesta dynaamisen ja osin epävakaa (Abdul-Rahman *ym.*, 2016, viitattu teoksessa Muhamad & Mohammad, 2018, s. 2). Jokainen suunnittelumuutos edellyttää suunnitelmien uudelleentyöstämistä, mikä lisää suunnittelutiimin työmäärää ja vaikuttaa suunnittelukustannuksiin (Love & Li, 2000, viitattu teoksessa Muhamad & Mohammad, 2018, s. 5).

Suunnitteluvirheet, joita ei tunnisteta ja korjata suunnitteluvaiheessa, ilmenevät usein rakentamisvaiheessa, jossa niiden vaikutukset ovat vakavampia kuin aikaisemmassa vaiheessa (Chappell & Willis, 1996, viitattu teoksessa Muhamad & Mohammad, 2018, s. 6).

Suunnittelumuutosten haitalliset vaikutukset näkyvät muun muassa korjaustöinä, aikataulun viivästymisenä ja lisäresurssien tarpeena, mikä johtaa kustannusten kasvuun (Yap & Skitmore, 2017, viitattu teoksessa Muhamad & Mohammad, 2018, s. 7). Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että merkittävä osa korjaustyökustannuksista liittyy suunnittelu- ja tarkastusprosesseihin, ja näistä valtaosa on yhdistetty suunnitteluvirheisiin (Fayek ym., 2003, viitattu teoksessa Muhamad & Mohammad, 2018, s. 9).

Asennustöiden näkökulmasta puutteellinen suunnittelu on yhdistetty muutostöihin, heikentyneeseen asennettavuuteen sekä aikataulu- ja kustannusylityksiin, minkä vuoksi sitä pidetään yhtenä keskeisimmistä hukan lähteistä rakentamisessa (Ko & Chung, 2014, s. 463). Kalliokuljun (2024) tapaustutkimuksessa havaittiin, että erityisesti tiukkojen aikataulujen laitosprojekteissa suunnittelumuutokset rakentamisvaiheessa ovat yleisiä, ja että joustavat sekundäärikannakkeet voivat helpottaa muutosten hallintaa ja asennuksen toteutusta verrattuna jäykempiin ratkaisuihin (s. 37–40).

Lean-ajattelussa suunnittelussa syntyvää hukkaa ei tarkastella ainoastaan suunnitteluprosessin sisäisten resurssien, kuten ajan ja työmäärän, kautta, vaan myös sen perusteella, millaisia vaikutuksia suunnitteluratkaisuilla on alavirran prosesseihin. Suunnitteluprosessi voi näin ollen synnyttää hukkaa myös rakentamis- ja asennusvaiheessa, vaikka itse suunnittelutyö näyttäisi tehokkaalta (Bonnier ym., 2015, s. 467). Bonnier ym. (2015) korostavat, että korjaustyö ei itsessään ole hukan synnyttäjä, vaan seurausta niistä mekanismeista, jotka ovat vaikuttaneet suunnitteluprosessin aikana ja johtaneet virheisiin ja muutostarpeisiin (s. 469).

3 Menetelmät ja aineistot

3.1 Tutkimusprosessin eteneminen

Diplomityö käynnistyi syyskuussa 2025 pidetyllä avaustapaamisella, johon osallistuivat työn ohjaaja Turun yliopistosta sekä toimeksiantajayrityksen edustaja Valmet Technologies Oy:stä. Tapaamisessa määriteltiin työn alustavat tutkimuskysymykset ja sovittiin tutkimuksen yleisestä tavoitteesta, minkä pohjalta tutkimussuunnitelman laadinta aloitettiin. Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin sisäisesti tutkia modulaarisia sekundäärikannakkeita, joista toimeksiantajalla oli käyttökokemuksia, mutta tutkimuspohjainen tarkempi tietous puuttui. Tutkimussuunnitelmaa tarkennettiin syys–lokakuun aikana, ja se esitettiin hyväksytysti osana yliopistolla järjestettyä diplomityöseminaaria lokakuun alussa.

Tutkimuksen laadullisen aineiston keruu aloitettiin syyskuussa lähettämällä kysely Project Execution Piping Engineering -osaston suunnittelijoille. Kyselyn avulla kartoitettiin kokemuksia modulaaristen kannakeratkaisujen käytöstä sekä suunnittelijoiden ennakkokäsityksiä ja oletuksia tilanteissa, joissa modulaarisia ratkaisuja ei ollut hyödynnetty. Kyselyn vastauksia käsiteltiin ja täydennettiin lokakuussa järjestetyssä keskustelutilaisuudessa Valmetin Tampereen toimipisteellä, jossa saatiin syvällisempää ymmärrystä käytännön kokemuksista ja haasteista.

Tutkimuksen empiiristä ymmärrystä syvennettiin lisäksi tapaamisilla modulaarisia kannakeratkaisuja toimittavien yritysten edustajien kanssa sekä osallistumalla modulaaristen suunnittelutyökalujen käyttökoulutuksiin. Näihin koulutuksiin osallistui diplomityön tekijän lisäksi suunnitteluaiakokeen suorittanut insinööri, jotta työkalujen käyttöosaaminen olisi yhdenmukaista ennen kokeellista vaihetta. Taloudellisen vertailun osalta pyrittiin keräämään hintatietoja modulaarisista järjestelmistä, mutta vertailukelpoisten taulukkohintojen puuttuessa kustannustarkastelu rajattiin laadulliseksi.

Tutkimuksen määrällinen osuus toteutettiin suunnitteluaiakokeena, jonka tavoitteena oli mitata eri kannakeratkaisujen vaikutusta suunnittelun tehokkuuteen. Kokeen suunnittelu aloitettiin marraskuun alussa, ja sen alustaksi valittiin osa Valmetin toimittamaa olemassa olevaa laitosmallia, jotta suunnittelu ympäristö vastaisi todellista projektikontekstia.

Kokeessa toteutettiin neljä erilaista kannakointipistettä, jotka erosivat toisistaan rakenteellisen monimutkaisuuden, tuentatavan ja kiinnitysalustan osalta. Näin pyrittiin kattamaan mahdollisimman laaja joukko tyypillisiä suunnittelutilanteita.

Suunnitteluaikakokeessa mitattiin primääri- ja sekundäärikannakkeiden mallinnukseen sekä piirustusten laadintaan ja korjaukseen kuluva aika. Aikojen mittausta toteutettiin sekuntikellolla, ja tulokset kirjattiin mittapöytäkirjoihin diplomityön tekijän toimesta. Koe toistettiin viisi kertaa, jotta suunnittelun sisäinen vaihtelu voitiin tunnistaa ja mittausten luotettavuutta arvioida. Mittaustuloksista muodostettiin koontiaineisto taulukkolaskentaohjelman avulla, ja tuloksia analysoitiin tilastollisesti sekä graafisesti.

Suunnitteluaikakokeen tulokset saatiin sekä perinteistä VOF-support-työkalua että modulaarista suunnittelutyökalua käyttäen. Tulosten analyysi ja tulkinta toteutettiin joulukuun aikana, minkä jälkeen tutkimuksen tulokset yhdistettiin laadulliseen aineistoon triangulaation avulla. Tutkimusprosessi päättyi tulosten kokoamiseen, johtopäätösten muodostamiseen ja diplomityön kirjoitustyöhön vuoden lopussa.

3.2 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

3.2.1 Aineistolähteet

Aineistolähteinä tutkimukselle toimi toimeksiantajan projektidokumentit, saadut ja lähetetyt tarjoukset, asiantuntijoiden haastattelut, tavarantoimittajien ja valmistajien tekniset tiedot ja dokumentit, suunnitteluaikakoe sekä aikaisempi tutkimus aihealueen ympärillä.

3.2.2 Mittaus- ja haastattelumenetelmien kuvaus

Tämän diplomityön aineisto koostuu sekä määrällisestä että laadullisesta tutkimusaineistosta, joita hyödynnettiin toisiaan täydentävällä tavalla tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi. Määrällinen aineisto kerättiin kontrolloitujen suunnitteluaikakokeiden avulla, joissa vertailtiin erilaisten kannakesuunnitteluratkaisujen ja suunnittelutyökalujen vaikutusta suunnitteluun kuluvaan aikaan.

Suunnitteluaikakokeissa (Liite 1. Suunnitteluaikakoe, ohje) suunnittelija mallinsi ennalta määritellyt kannakekokonaisuudet useita kertoja eri suunnittelutyökaluja käyttäen. Kussakin kokeessa mitattiin erikseen Jokaiseen kannakekokonaisuuteen (*K*) kuuluvan primäärikannakkeen (*P*) ja sekundäärikannakkeen (*S*) mallinnusaika sekä näitä vastaavan piirustuksen (*D*) laatimiseen kulunut aika. Sama koeasetelma toistettiin useita kertoja, jotta suunnitteluaikojen vaihtelua ja mittausten toistettavuutta voitiin arvioida.

Laadullinen aineisto kerättiin kaikille putkisto-osaston suunnittelijoille suunnatun yleispätevän kyselyn, suunnitteluaikakokeen suorittajalle kohdennetun kyselyn sekä muiden vapaamuotoisten asiantuntijakommenttien avulla. Laadullisen aineiston tarkoituksena oli syventää ymmärrystä määrällisissä mittauksissa havaituista ilmiöistä sekä tunnistaa niitä käytännön tekijöitä, jotka vaikuttavat suunnitteluratkaisujen ja työkalujen koettuun toimivuuteen.

Aineiston analysoinnissa hyödynnettiin ensisijaisesti keskiarvoja kuvailevina tunnuslukuina, joiden avulla muodostettiin yleiskuva eri suunnitteluratkaisujen ja työkalujen välisistä ajallisista eroista. Mittausten luotettavuutta ja toistettavuutta arvioitiin ICC-analyysin (Intraclass Correlation Coefficient) avulla, joka soveltuu toistomittausten välisen yhdenmukaisuuden tarkasteluun. ICC-analyysin avulla arvioitiin, missä määrin saman tehtävän toistokerrat tuottivat keskenään johdonmukaisia tuloksia ja voidaanko havaittuja eroja pitää mittausten menetelmän näkökulmasta luotettavina. Aikamittaukset tehtiin sekuntien tarkkuudella, ja analyysit suoritettiin taulukkolaskentaohjelmaa hyödyntäen.

Määrällisen ja laadullisen aineiston yhdistäminen toteutettiin tässä tutkimuksessa triangulaation avulla. Triangulaatiolla tarkoitetaan eri tutkimusmenetelmien tai aineistojen rinnakkaista käyttöä saman ilmiön tarkastelussa siten, että ilmiötä voidaan lähestyä useasta näkökulmasta ja yksittäisiin menetelmiin liittyviä rajoitteita voidaan lieventää (Jick, 1979, s. 602–604). Triangulaation lähtökohtana on ajatus siitä, että määrälliset ja laadulliset tutkimusmenetelmät täydentävät toisiaan, eikä niitä tule tarkastella toisensa poissulkevinä lähestymistapoina.

Tässä tutkimuksessa triangulaatiota sovellettiin siten, että määrällinen aineisto analysoitiin ensin omana kokonaisuutenaan, minkä jälkeen laadullista aineistoa hyödynnettiin määrällisten havaintojen tulkinnan tukena.

Aineistojen yhdistämisen tavoitteena oli syventää ymmärrystä suunnitteluaiakokeissa havaituista eroista ja tunnistaa niiden taustalla vaikuttavia käytännön ja kokemuksellisia tekijöitä. Aikamittaukset tarjosivat numeerista tietoa suunnittelutehokkuudesta, kun taas kysely- ja asiantuntija-aineisto täydensi analyysiä selittämällä havaittujen erojen taustalla olevia suunnittelukäytäntöihin, työkalujen käytettävyyteen ja projektikohtaisiin tekijöihin liittyviä näkökulmia.

Aineistojen yhdistäminen ja tulosten yhteenveto esitetään tulosluvussa yhdistetyn analyysin ja triangulaation yhteydessä, jossa määrällisen ja laadullisen aineiston tuottamia havaintoja tarkastellaan rinnakkain tutkimuskysymysten alakohtien mukaisesti.

3.3 Suunnittelun tehokkuus ja laatu

Tutkimuksessa hyödynnettiin kahta erilaista putkistokannakkeiden suunnittelua tukevaa työkalua AVEVA E3D -ympäristössä. Ensimmäinen näistä oli VOF-Support (*Viewpoint Of Finland*), joka on Suomessa toimivien yritysten muodostaman AVEVA E3D/PDMS-ohjelmistojen käyttäjäyhteisön kehittämä kannakointityökalu. VOF-yhteisö on kehittänyt työkalun vastaamaan käyttäjäyritysten käytännön tarpeita, ja sen tavoitteena on tukea erityisesti perinteisten, hitsattujen sekundäärikannakkeiden suunnittelua ja mallinnusta.

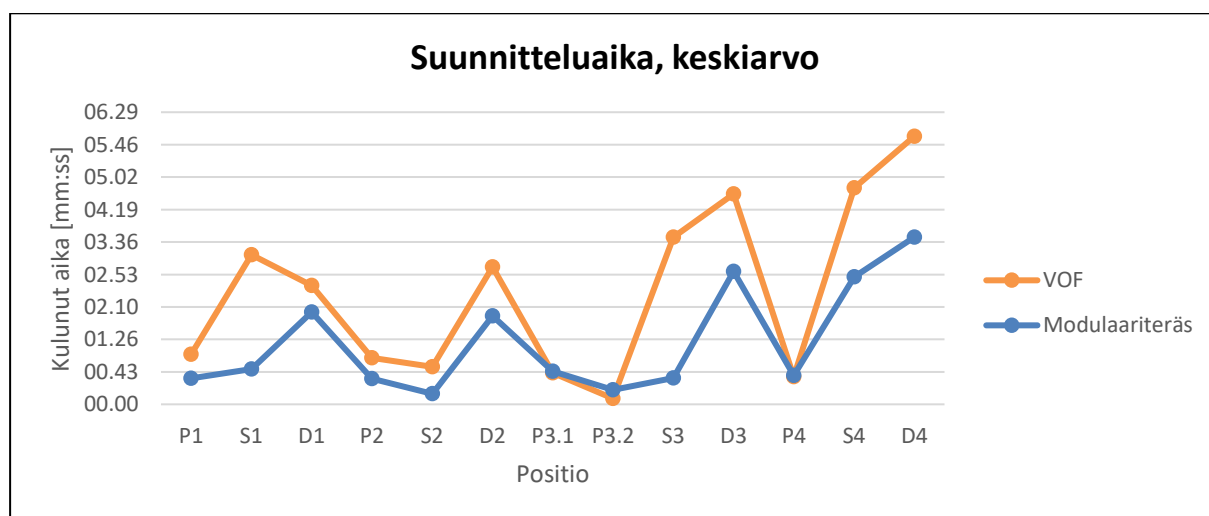
Toinen käytetty työkalu oli modulaarisia kannakeratkaisuja toimittavan yrityksen kehittämä plugin-työkalu AVEVA E3D -ohjelmistoon. Modulaaristen sekundäärikannakkeiden osalta tutkimuksessa tarkasteltiin kahden eri toimittajan tarjoamia plugin-ratkaisuja. Näiden työkalujen toiminnallisuudet, käyttölogiikka ja suunnitteluprosessi osoittautuivat kuitenkin käytännössä lähes identtisiksi, minkä vuoksi varsinaiset suunnitteluaiakokeet ja vertailut toteutettiin vain yhdellä plugin-työkalulla. Tällä rajauksella pyrittiin varmistamaan tutkimuksen toteutettavuus ilman, että se heikentäisi tulosten vertailukelpoisuutta tai yleistettävyyttä modulaaristen kannakeratkaisujen osalta.

Suunnittelun tehokkuuden ja laadun mittaamiseksi järjestettiin kannakesuunnittelukoe (Liite 1. Suunnitteluaiakoe, ohje), jossa toimeksiantajan palveluksessa työskentelevä suunnittelija mallinsi ennalta määrättyyn putkiosuuteen tietyntyyppisen kannakoinnin laitosmallinnusohjelman omalla työkalulla (VOF-support) sekä modulaaristen kannakointiratkaisujen suunnitteluun tarkoitettulla työkalulla. Putkiosuus oli otanta toteutetusta asiakasprojektista. Tästä saatu kannakekohtainen mallinnus- ja piirustusaika ilmaisi, kuinka tehokkaasti kukin työkalu on käytettävissä. Koska suunnittelijoilla oli jo pohjaosaaminen laitosmallinnusohjelmiston omasta kannakesuunnittelutyökalusta, annettiin heille ennen kannakesuunnittelukoetta koulutus- ja kokeilumahdollisuus modulaariterästen suunnittelutyökalusta. Kokeeseen valittiin mallinnettavaksi neljä toisistaan eriävää ja laitossuunnittelusta yleistä kannakeratkaisua. Kannaketyypin lisäksi primäärikannakkeen ohjaustapa vaihteli kannakkeesta toiseen, jotta näiden mallinnusmahdollisuudet voidaan huomioida kokonaissuoritteessa. Koe suunniteltiin kokeneen putkistosuunnittelijana toimivan insinöörin avustuksella, jotta koe olisi tulosten kannalta mahdollisimman totuudenmukainen ja kerättävä data olisi hyödyntämiskelpoista.

Koe toistettiin kummallakin mallinnusratkaisulla viisi kertaa, joiden mittapöytäkirjojen pohjalta muodostettiin yhteenveto (Kuva 14) molemmista koepaketeista:

Liite 2. Suunnitteluaiakoe, tulokset, VOF-support

Liite 3. Suunnitteluaiakoe, tulokset, modulaariteräs



Kuva 14. Suunnitteluaiakokeiden keskiarvot.

Suunnitteluajakokeiden mittausten luotettavuutta arvioitiin intraluokkaisen korrelaatiokertoimen (*Intraclass Correlation Coefficient*, ICC) avulla (Liite 4. Validointilaskelma, ICC 3,k). ICC-analyysi valittiin Koo & Li (2016) esittämällä vuokaaviolla, jonka perusteella toteutusmetodiksi valittiin *two-way mixed effects, consistency, multiple raters/measurements* -malli, jossa mittausten kohteet muodostivat satunnaisen tekijän ja mittaukset suorittanut suunnittelija sekä käytetty suunnittelutyökalu kiinteän tekijän. Luotettavuutta tarkasteltiin usean toiston keskiarvon perusteella ($k = 5$), ja analyysissä edellytettiin absoluuttista yhtäpitävyyttä mittausten välillä. ICC-arvot laskettiin varianssianalyysiin perustuen rivien välistä vaihtelua (MS_R) ja virhetermiä (MS_E) hyödyntäen kaavan 1 mukaisesti:

$$ICC(3, k) = \frac{(MS_R - MS_E)}{MS_R} \quad (1)$$

(Koo & Li, 2016, s. 157)

MS_R	<i>Mean Square for Rows</i>	Riivivälinen keskivarianssi
MS_E	<i>Mean Square Error</i>	Satunnaistekijöiden aiheuttama mittausvirhe

ICC-arvot olivat kullekin testiriville 0,93–0,99 joka viittaa erinomaiseen luotettavuuteen.

Suunnitteluajoja vertailtaessa todettiin modulaariteräksien suunnitteluun laadittu työkalu nopeammaksi, kuin VOF-support. Kuva 14 havainnollistaa, kuinka suurimmassa osaa positioita modulaariterästyökalu oli VOF-supportia nopeampi. Suurimmat saavutukset tehokkuuden lisäämisessä olivat sekundäärien S_1 , S_3 ja S_4 kohdalla, jotka kukin olivat useampiosaisia rakenteita. Primäärien mallinnus ja piirustusten laadinta oli myös nopeampaa, vaikka saavutettu aikaero ei ollut niin iso kuin sekundäärien kohdalla. Positiolla $P_{3.2}$ VOF-support on keskiarvoajallisesti nopeampi, mutta osa tästä selittyy testin rakenteella. K_3 oli vinoreevallinen ulokekannake, jossa oli kaks primäärikannaketta, $P_{3.1}$ sekä $P_{3.2}$. Näitä mallinnettaessa VOF-supportilla sai molemmat primäärit asetettua samalla kerralla oikeaan positioon ennen sekundääriin asettamista. Modulaariterästyökalulla sen sijaan mallinnusjärjestys oli optimaalisin siten, että ensin mallinnettiin sekundääri S_3 jonka jälkeen sen kohdalle osoitettiin primääri $P_{3.1}$. Kun primääri on mallinnettu, täytyi sekundääriin positiota korjata primäärikannakkeen modulaarisuuden vuoksi, sillä modulaarisilla primääreillä on säätyvä korkeus. Kun primääri $P_{3.2}$ mallinnettiin, laskettiin korjaukseen kulunut aika sen mallinnusaikaan.

Modulaariteräs-työkalu ohjasi suunnittelijaa tekemään valintoja, muodostaen sekundäärikannakkeen valitusta profiilista, lisäten päätytulpat automaattisesti sekä kytkien kunkin osan sekundääristä toisiinsa. Täten, mikäli kappaleiden pituuksia muutettiin, eivät osat "irronneet" toisistaan, toisin kuin VOF-support työkalulla. VOF-support myös vaatii kunkin päätytulpan mallintamisen monivaiheisen valikon kautta, jonka kautta syntyvä malli ei mukaudu suoraan palkin mitan mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli palkin mittaa muutetaan, täytyy myös päätytulpan sijainti korjata jokaisesta muuttuneesta kohdasta manuaalisesti. VOF-support loi sekundäärien välille toisinaan selittämättömiä yhteyksiä, jotka johtivat tahattomiin muutoksiin esimerkiksi pituuksia tai asentoja muutettaessa, johtaen ylimääräiseen korjausaikaan.

Esimerkkilaskelma keskiarvoista osoittaa, kuinka kannakkeen suunnitteluun kulunut aikaero VOF-supportin ja modulaariterästyökalun välillä 800 kannakkeen esimerkkiotannassa on noin 48,68 tuntia, pyöristettynä noin 6,5 työpäivää, kun kyseessä on 7,5 tunnin työpäivä. Pelkästään työkalukohtaisella hyödyllä saavutetaan laskennallisesti yli viikon työtunnit. Laskettaessa kaikkien kokeiden keskiarvoista primäärit (P), sekundäärit (S) ja piirustukset (D) molemmilta työkaluilta, vof sekä modulaariteräs mt 800 kappaleen esimerkkiotannalla, saadaan:

$$\begin{aligned} & (P_{vof} + S_{vof} + D_{vof}) - (P_{mt} + S_{mt} + D_{mt}) \\ &= (11,9 h + 42,2 h + 54,3 h) - (9,4 h + 14,8 h + 35,5 h) \\ &= 48,68 h \end{aligned}$$

Kannekesuunnittelukokeen suorittaneelle insinöörille suunniteltiin vielä laadullinen kysely (Liite 5. Kannakesuunnittelukokeen kyselylomake), jolla kartoitettiin käytettävyyden ja työnkulun sujuvuutta, virheherkkyyttä ja työn tarkkuutta, työn kognitiivista kuormitusta sekä yleisammattillista arviota VOF-support sekä modulaariterästyökaluista. Kyselyn perusteella suunnittelutyökalujen väliset erot ilmenivät selkeimmin työnkulun rakenteessa, automaatiotasossa sekä virheiden hallinnassa. VOF-supportissa nopeimmaksi ja helpoimmaksi koettiin primäärikannakkeen mallinnus, mikä selittyy laajalla ja vakiintuneella komponenttikirjastolla sekä suunnittelijalle tutulla toimintalogiikalla.

Modulaariseen järjestelmään perustuvassa lisäosassa puolestaan sekundäärirakenteen mallinnus koettiin sujuvimaksi, mikä viittaa korkeampaan automaatioasteeseen ja komponenttien valmiimpaan yhteensopivuuteen sekundäärirakenteiden osalta. Molemmilla työkaluilla haastavimmaksi työvaiheeksi nousi monimutkaisin kannakekokonaisuus, erityisesti lattiaan valettavaan betonirakenteeseen tukeutuvan sekundäärirakenteen mallinnus. Työkalujen väliset erot liittyivät kuitenkin siihen, miten nämä haasteet ilmenivät: VOF-supportissa ongelmat johtuivat pääosin manuaalisesta työstä ja rajallisesta yhteensopivuudesta laitossuunnitteluohjelmiston terästyökalujen kanssa, kun taas modulaarisessa lisäosassa haasteet liittyivät puuttuviin toimintoihin, jotka edellyttivät siirtymistä ohjelmiston perustoimintojen käyttöön. Tämä katkoi työnkulun ja lisäsi kognitiivista kuormitusta suunnittelun aikana.

Kyselyn perusteella kumpikaan työkalu ei ohjannut suunnittelijaa vahvasti seuraavaan työvaiheeseen, mutta työvaiheiden koettu johdonmukaisuus erosi selvästi. VOF-support koettiin loogiseksi ja lineaariseksi, kun taas modulaarinen lisäosa edellytti siirtymistä edestakaisin primääri- ja sekundäärirakenteiden työkalujen välillä. Tämä havainto korostaa työnkulun rakenteen merkitystä koetulle tehokkuudelle, vaikka yksittäiset työvaiheet olisivatkin nopeita. On kuitenkin huomionarvoista, että modulaariterästyökalu pyrkii ohjaamaan suunnittelijaa tekemään valintoja toisinaan opastamalla, tai antamalla virheilmoituksen, kun esimerkiksi katkaisumitta on epämääräinen. Esimerkiksi, mikäli suunnittelee palkin ja antaa sen mitaksi 1542 mm, niin työkalu huomauttaa tästä. Huomautuksen idea on ohjata suunnittelijaa tasamittoihin, kuten esimerkkitapauksessa 1500 mm, 1550 mm tai 1600 mm.

Virheiden ja epävarmuuden osalta työkalujen välillä havaittiin selkeitä eroja. Modulaarinen lisäosa tarjosi aktiivisempaa virheiden ehkäisyä esimerkiksi varoitusten avulla, kun taas VOF-support ei vastaavasti ohjannut virhetilanteissa. Tästä huolimatta molemmilla työkaluilla esiintyi toistuvia inhimillisiä virheitä kiireen ja toistojen aikana, kuten pituusparametrien tai yksityiskohtien tarkistamisen unohtamista. Tämä viittaa siihen, että automaatio vähentää mutta ei poista suunnittelijan huolellisuuden tarvetta.

Kokonaisuutena molemmat työkalut koettiin tehtävän kuormittavuuden osalta kevyiksi, mutta eri syistä.

VOF-Supportin keveys perustui suunnittelijan aiempaan kokemukseen, kun taas modulaarisen lisäosan koettu keveys liittyi sen automatisoituun ja visuaalisesti selkeään käyttöliittymään. Samalla modulaarinen lisäosa edellytti useamman asian muistamista samanaikaisesti, mikä heijastaa sen osittaista epäjohdonmukaisuutta työjärjestyksen näkökulmasta. Laajamittaisen projektikäytön arvioinnissa VOF-support nähtiin monipuolisempänä, koska sen avulla voidaan toteuttaa useiden standardien mukaisia kannakkeita. Modulaarinen lisäosa puolestaan koettiin tehokkaaksi, mutta rajatuksi, sillä se soveltuu parhaiten tietyn tyyppisiin kannakeratkaisuihin. Tämä tukee näkemystä, että modulaariset järjestelmät voivat toimia tehokkaina erikoistyökaluina, mutta eivät välttämättä korvaa kokonaisvaltaista kannakesuunnitteluratkaisua kaikissa projektikonteksteissa

3.4 Kustannusvertailu

Sekundäärikannakkeiden kannakeratkaisujen kustannusvertailu osoittautuu haastavaksi useasta syystä. Modulaarisia teräsrakenteita valmistavilta toimittajilta saatava hintatieto on rajallista tai olematonta erityisesti tilanteissa, joissa kyse ei ole toteutettavasta projektista, vaan tutkimuksellisesta vertailusta. Tämän seurauksena materiaalikustannusten vertailu perustuu usein yksittäisiin hintatietoihin tai suuntaa antaviin arvioihin. Saatavilla olevan toimeksiantajan sisäisen tiedon perusteella modulaariset sekundäärikannakkeet ovat materiaalikustannuksiltaan korkeampia verrattuna perinteisiin rakenneteräksestä valmistettuihin ja hitsattuihin ratkaisuihin, joissa kustannukset muodostuvat pääosin teräsmateriaalista ja konepajatyöstä.

Kokonaiskustannusten vertailua vaikeuttaa lisäksi se, että toteutuneissa projekteissa sekundäärikannakkeiden toimitusaste vaihtelee merkittävästi. Osa rakenteista voidaan esivalmistaa konepajalla, kun taas osa toteutetaan työmaalla hitsaamalla, mikä vaikuttaa sekä työmäärään että kustannusten kohdentumiseen. Modulaarisissa järjestelmissä on usein mahdollista tilata kannakkeet valmiiksi esipakattuina kannakekohtaisiksi kokonaisuuksiksi lisämaksua vastaan, mikä voi yksinkertaistaa työmaatoimintoja, mutta samalla nostaa hankintakustannuksia. Tällöin kustannuksia siirtyy työmaavaiheesta hankintavaiheeseen, mikä vaikeuttaa suoraa vertailua perinteisiin ratkaisuihin.

Suunnitteluvaiheen kustannusten osalta modulaarisiin järjestelmiin liittyvien suunnittelutyökalujen integraatio laitossuunnitteluohjelmistoon ei itsessään aiheuta lisenssi- tai käyttökustannuksia, mutta suunnittelutyön tehokkuus ja työmäärä voivat vaihdella työkalujen kypsyystason ja suunnittelijoiden kokemuksen mukaan. Tämä tekee suunnittelukustannusten kvantitatiivisesta vertailusta epävarmaa, erityisesti silloin, kun vertailua tehdään rajallisen aineiston perusteella.

Aiemmissa tutkimuksissa modulaaristen ja rakenneteräksisten putkistokannakkeiden kustannusvaikutuksia on tarkasteltu tapauskohtaisesti, ja erityisesti modulaaristen ratkaisujen hyödyt on liitetty rakentamisvaiheen joustavuuteen. Kalliokulju (2024) toteaa kvantitatiivisen tapausvertailunsa perusteella, että modulaariset kannakkeet olivat hankintavaiheessa noin 12 % kalliimpia kuin vastaavat rakenneteräksiset ratkaisut. Tutkimuksessa kuitenkin korostetaan, että kustannusero voi tasoittua tai jopa kääntyä modulaaristen ratkaisujen eduksi tilanteissa, joissa asennus on haastavaa tai joissa suunnitelmiin kohdistuu muutoksia rakentamisvaiheessa

Kalliokuljun (2024) laadullisen aineiston perusteella modulaaristen kannakkeiden muunneltavuus ja pulttiliitoksiin perustuva asennustapa mahdollistavat muutosten tekemisen ilman laajoja purku- tai hitsaustöitä, mikä voi vähentää työmaalla syntyviä lisäkustannuksia ja aikataulupaineita verrattuna jäykempiin rakenneteräsratkaisuihin

Samassa tutkimuksessa kuitenkin todetaan, että modulaaristen järjestelmien soveltuvuus ei ole universaalista. Erityisesti raskaasti kuormitetuissa sekundäärikannakkeissa sekä kohteissa, joissa putkistoihin kohdistuu suuria lämpöliikkeitä tai kriittisiä prosessikuormia, rakenneteräksiset kannakeratkaisut osoittautuivat usein tarkoituksenmukaisemmiksi sekä teknisestä että pitkän aikavälin kustannustehokkuuden näkökulmasta

Edellä esitetyn perusteella modulaaristen ja perinteisten sekundäärikannakkeiden kustannusvertailu ei ole yksiselitteinen. Puhtaasti materiaalikustannuksiin perustuva vertailu antaa modulaarisista ratkaisusta epäedullisen kuvan, mutta kokonaiskustannusten tarkastelu edellyttää huomion kiinnittämistä myös suunnittelu-, asennus- ja muutostyövaiheisiin sekä projektikohtaisiin olosuhteisiin. Tästä syystä kustannusvertailua on perusteltua tarkastella tapauskohtaisesti ja osana laajempaa elinkaaren ja toteutusprosessin kokonaisuutta.

3.5 Asennus ja työmaa

Modulaaristen sekundäärikannakkeiden vaikutukset eivät rajoitu ainoastaan suunnitteluvaiheeseen, vaan ne konkretisoituvat erityisesti asennus- ja työmaavaiheessa. Valmistajakohtaisiin profiileihin, liitoskomponentteihin ja mitoitusperiaatteisiin perustuvat järjestelmät ohjaavat suoraan asennusmenetelmiä, työjärjestystä sekä työmaan logistisia ratkaisuja. Tämä valmistajariippuvuus voi vaikuttaa asennuksen tehokkuuteen, virhealttiuteen ja joustavuuteen erityisesti tilanteissa, joissa suunnitelmiin joudutaan tekemään muutoksia työmaan aikana. Lisäksi modulaaristen järjestelmien rajallinen yhteensopivuus eri valmistajien välillä voi lisätä työmaan koordinoitotarvetta ja asennustyön monimutkaisuutta, mikä korostaa yhtenäisten toimintatapojen ja selkeiden projektikohtaisten ohjeiden merkitystä. Tässä luvussa tarkastellaan modulaaristen sekundäärikannakkeiden vaikutuksia asennukseen ja työmaatoimintoihin keskittyen erityisesti asennusaikavertailuun, tyypillisiin asennusvirheisiin ja haasteisiin sekä uudelleentyön ja lisätyökustannusten muodostumiseen.

3.5.1 Asennusaikavertailu

Asennusaikavertailussa tarkasteltiin modulaarisia kannakointiratkaisuja valmistavien yritysten ilmoittamia asennusaikoja ja verrattiin niitä hitsattuihin kannakeratkaisuihin. Vertailu perustui valmistajien itse tuottamiin asennusaikavideoihin, joissa havainnollistettiin modulaaristen tukijärjestelmien käyttöä ja niillä saavutettavaa ajallista etua asennustilanteessa. Molemmat vertailussa mukana olleet yritykset olivat tuottaneet omat vertailuvideosa, joissa modulaarisia, mekaanisesti koottavia sekundäärikannakkeita verrattiin vastaaviin hitsattuihin ratkaisuihin.

Julkaistujen vertailuvideoiden perusteella modulaarisilla kannakerakenteilla esitetään saavutettavan lyhyempi asennusaika kuin hitsatuilla ratkaisuilla. Taulukko 1 havainnollistaa kolmen eri vertailuvideon perusteella raportoidut asennusajat minuutteina sekä modulaarisille että hitsatuille rakenteille, ja tarjoaa numeerisen pohjan videoissa esitettyjen aikahyötyjen tarkastelulle.

Taulukko 1. Asennusaikavertailu

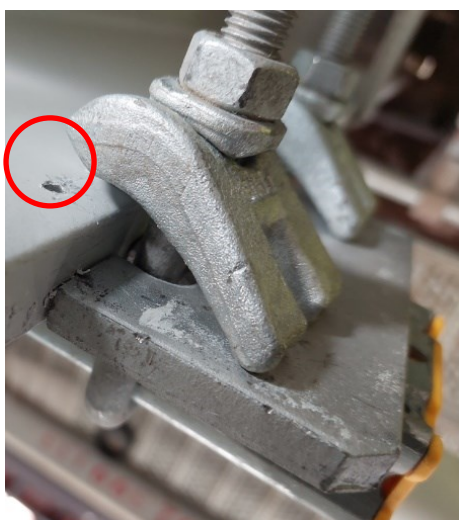
	Asennusaika [min]		Parannus	Lähde
	Modulaarinen	Hitsattu		
Video 1	20	65	69 %	Eberl Iron Works, 2022
Video 2	26	86	70 %	Hilti North America, 2014
Video 3	34	53	36 %	Hilti North America, 2021

Tulokset viittaavat siihen, että asennusaikasäästö on mahdollinen, mutta säästön suuruus vaihtelee huomattavasti toteutettavasta ratkaisusta ja rakennusmateriaaleista. Videoiden lähtöoletukset myös eroavat toisistaan huomattavasti, heikentäen tulosten yleistettävyyttä: Videoissa 1 ja 2 hitsattuun rakenteeseen käytettiin I-palkkia, videossa kolme SHS-putkipalkkia. SHS-putkipalkkia käytettäessä se tulisi aina tulpata joko hitsaamalla tai asentamalla muovinen tai kuminen päätytulppa, mutta tätä ei tehty. Mikäli hitsattu rakenne olisi viimeistely asiaankuuluvalla tavalla, olisi saavutettu aikaero ollut todennäköisesti isompi. Missään kolmesta videosta ei ilmaista hitsatun rakenteen asianmukaiseen jälkikäsittelyyn (sinkkimaalaus, paikkamaalaus) kuluva aikaa. Puutteellinen jälkikäsittely altistaa kannakkeen ympäristöstä riippuvalle korroosiolle, eikä kannaketta voida pitää valmiina ennen käsittelyä. Videoista ja niiden tuloksista voidaan kuitenkin todeta modulaaristen kannakkeiden olevan nopeampia ja joustavampia asennettavuudeltaan.

3.5.2 Asennusvirheet ja -haasteet

Modulaarisissa sekundääreissä kummankaan valmistajan järjestelmät eivät ole yksiselitteisesti asennettavia, jolloin asentaja saattaa tehdä kokoonpano- tai asennusvaiheessa virheen, joka vaikuttaa rakenteen lujuuteen ja odotettuun toimintatapaan. Esimerkiksi Kuva 15 havainnollistaa modulaariselle sekundäärikannakoinnille tyypillistä tilannetta, jossa kiinnitys tapahtuu mekaanisella liitoksella laitosrakenteeseen, tässä tapauksessa I-palkkiin. Kuva 16 havainnollistaa tilanteen, jossa tartuntakynsi on mahdollista asentaa väärinpäin, mikä korostaa DFA-periaatteen merkitystä tuotekehityksessä.

DFA-ajattelun keskeinen tavoite on vähentää kokoonpanovirheiden mahdollisuutta jo suunnitteluvaiheessa esimerkiksi symmetriaa välttämällä, osien yksiselitteisellä orientaatiolla ja virheellisen asennuksen estävillä rakenteellisilla ratkaisuilla. Tällaiset suunnitteluratkaisut parantavat kokoonpanon luotettavuutta ja vähentävät työmaalla tapahtuvien virheiden, korjaustöiden ja niihin liittyvien kustannusten riskiä. Väärin tai huolimattomasti asennettu kannake ei välttämättä täytä sille asetettuja vaatimuksia ja odotuksia, johtuen kannakoinnin ennakoimattomaan käyttäytymiseen, mahdollisiin vaaratilanteisiin tai ennenaikaiseen korroosion aiheuttamaan vaurioon ja rakenteen heikkenemiseen.



Kuva 15. Modulaarisen sekundäärikannakkeen tartunta I-palkkiin.



Kuva 16. Virheellisesti asennettu tartuntakynsi.

Modulaarisia putkistokannakeratkaisuja toimittavien yritysten tuotekirjastot poikkeavat toisistaan merkittävästi sekä komponenttivalikoiman, mitoitusperiaatteiden että liitosratkaisujen osalta. Eri toimittajien tuotteet eivät ole keskenään yhteensopivia, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että yhden toimittajan järjestelmään kuuluvia komponentteja ei voida yhdistää toisen toimittajan osiin ilman erillisiä sovite- tai erikoisratkaisuja. Tämä rajoittaa järjestelmien sekoittamista saman projektin sisällä ja voi johtaa tilanteisiin, joissa toimittajan vaihtaminen projektin aikana aiheuttaa merkittäviä lisäsuunnittelu- ja hankintahaasteita. Suunnittelun lähtökohtana on usein koko valitun toimittajan tuotekirjasto, mikä tarjoaa suunnittelijalle laajan valinnanvaran erilaisten profiilien, liitosten ja komponenttien välillä. Mikäli tuotekirjastoa ei rajata ennen varsinaisen suunnittelutyön aloittamista, syntyy helposti tilanne, jossa eri suunnittelijat hyödyntävät samoihin käyttötarkoituksiin toisistaan poikkeavia komponentteja. Tämä lisää suunnitteluratkaisujen hajontaa ja johtaa työmaalle tilattavien osien määrän kasvuun, mikä puolestaan vaikeuttaa hankintaa, varastointia ja asennuksen hallintaa. DFA-periaatteiden mukaisesti erilaisten komponenttien määrää tulisi minimoida, sillä vakioitujen ja toistuvien ratkaisujen käyttö yksinkertaistaa kokoonpanoa, vähentää virheiden riskiä ja parantaa koko järjestelmän asennettavuutta ja kustannustehokkuutta.

Kuva 15 myös osoittaa erään modulaarisiin sekundäärikannakkeisiin ja niiden asennukseen liittyvän riskitilanteen: Kun kannake asennetaan, saattaa se vaurioittaa sen rakenteen pintakäsittelyä, johon se kiinnittyy.

Hitsattavien rakenteiden haasteiksi toimeksiantajan laitosprojekteissa voidaan luokitella valmistusasteen määrittäminen, asennusjärjestyksen määrittäminen, laadunvarmistus ja korroosionesto. Valmiusasteen määrittämisellä tarkoitetaan sekundäärikannakkeen toimitukseen sisältyvää kokonaisuutta. Sekundäärikannakkeet voidaan valmistaa ja korroosiosuojata kohteessa tai ns. konepajatyönä.

Konepajatyönä valmistettu sekundäärikannake on usein hitsattu, korroosiosuojattu ja maalattu liitos ennen kohteeseen tuontia. Esivalmisteen tuoma hyöty riippuu asennuskohteesta, kannakoitavista putkista ja niiden luonteesta sekä itse sekundääriin monimutkaisuudesta ja osien määrästä. Lisäksi osa esivalmistetta on usein korroosiokäsittelemätön ja maalaamaton, jotta se saadaan hitsattua kohteessa. Tämä tuo kokonaisuuteen lisätyönä sinkki- ja pintamaalauksen.

3.5.3 Rework- ja lisätyökustannukset

Sekundäärikannakkeen asennukseen liittyvä rework eli korjaustyön tarve nousi esiin keskeisenä teemana suunnittelijoiden sekä rakennusosaston puolelta haastatellun vanhemman projekti-insinöörin kanssa käydyissä vapaamuotoisissa asiantuntijakeskusteluissa. Asiantuntijoiden mukaan rework on tyypillinen ilmiö laitosprojekteissa, ja sitä syntyy erityisesti tilanteissa, joissa kannakkeen tyyppi, mitoitus tai sijainti ei vastaa asennusvaiheessa todellista putkiston reittiä tai ympäröivien rakenteiden lopullista geometriaa. Tällaisissa tapauksissa kannakkeita saatetaan joutua purkamaan, asentamaan uudelleen tai muuttamaan rakenteellisesti jo työmaavaiheessa.

Haastattelujen perusteella rework ei rajoitu ainoastaan varsinaisiin korjaustoimenpiteisiin, vaan se aiheuttaa usein myös lisätyötä ja resurssien uudelleenjärjestelyä. Korjaustilanteet voivat edellyttää suunnitelmien tarkentamista, uusien komponenttien hankintaa sekä lisätyövoiman käyttöä, mikä lisää sekä suoria että epäsuoria kustannuksia. Lisäksi työmaalla tehtävät muutokset voivat haastateltujen asiantuntijoiden mukaan häiritä muiden työvaiheiden etenemistä ja vaikuttaa siten koko asennuksen aikatauluun.

Erytiesi hitsattuihin sekundäärikannakkeisiin liittyvät rework-tilanteet nousivat haastatteluissa esiin pintakäsittelyyn kohdistuvien lisätyökustannusten näkökulmasta. Työmaalla tehtävä hitsaus edellyttää tyypillisesti hitsausliitosten hiontaa ja paikkamaalausta korroosionkestävyyden varmistamiseksi. Mikäli rakenteita joudutaan muuttamaan asennuksen aikana, pintakäsittelytyöt on usein tehtävä uudelleen, mikä kasvattaa korjaustyön työmäärää ja kustannuksia. Lisäksi asiantuntijat toivat esiin, että sekundäärikannakkeiden korjaus- ja muutostöihin liittyvät lisäkustannukset voivat muodostua telineiden ja nostolaitteiden käytöstä, erityisesti silloin, kun työtä tehdään jo asennettujen putkistojen tai muiden rakenteiden läheisyydessä. Tällaisissa tilanteissa yksittäisen kannakkeen muutos voi edellyttää huomattavaa määrää tukitoimia, mikä korostaa ennakoivan suunnittelun merkitystä.

Haastattelujen perusteella sekundäärikannakkeiden suunnitteluratkaisuilla sekä suunnittelun yhdenmukaisuudella on keskeinen rooli reworkin ja lisätyökustannusten hallinnassa. Asiantuntijoiden mukaan huolellinen ja ennakoiva suunnittelu voi merkittävästi vähentää työmaalla tehtävien muutosten tarvetta ja siten pienentää korjaustöihin liittyviä kustannuksia. Tästä näkökulmasta reworkin hallinta näyttäytyy olennaisena osana sekä suunnittelutehokkuuden parantamista että projektien kokonaiskustannusten optimointia.

3.6 Suunnittelijoiden kokemukset

Osana tutkimuksen aineistonkeruuta toteutettiin putkistosuunnittelijoille suunnattu kysely (Liite 6. Kysely toimeksiantajan putkisto-osaston suunnittelijoille), jonka tarkoituksena oli kartoittaa kokemuksia ja näkemyksiä modulaaristen kannakeratkaisujen käytöstä putkistosuunnittelussa. Kysely lähti kaikille toimeksiantajayrityksen putkistosuunnittelussa toimiville. Kyselyyn vastasi yhteensä kahdeksan suunnittelijaa, joista kolme ilmoitti suunnitelleensa modulaarisia kannakkeita aiemmissa projekteissa ja viisi ei. Modulaarisia ratkaisuja oli hyödynnetty yhteensä kolmessa projektissa, mikä osoittaa, että menetelmää on käytetty useammassa kuin yhdessä yksittäistapauksessa, mutta se ei ole vielä vakiintunut yleiseksi toimintatavaksi.

Vastausten perusteella modulaaristen kannakeratkaisujen keskeiseksi eduksi koettiin asennusvaiheen nopeus ja joustavuus. Erityisesti mahdollisuus tehdä muutoksia kannakointiin työmaavaiheessa ilman laajoja purku- tai hitsaustöitä nähtiin merkittävänä etuna tilanteissa, joissa putkiston reititys tai kannakepaikka muuttuu esimerkiksi törmäysten tai muiden toteutusvaiheen syiden vuoksi. Näissä tapauksissa modulaaristen ratkaisujen koettiin tarjoavan paremman muunneltavuuden verrattuna perinteisiin hitsattuihin rakenteisiin, mikä voi vähentää korjaustyön määrää ja siihen liittyviä kustannuksia.

Suunnittelun näkökulmasta vastaajat toivat esiin sekä positiivisia että kriittisiä havaintoja. Modulaaristen järjestelmien laajaa komponenttivalikoimaa ja mallinnettavien liitosvaihtoehtojen määrää pidettiin etuna, sillä ne mahdollistavat realistisemman ja yksityiskohtaisemman mallinnuksen.

Toisaalta suunnitteluvaiheen integraatio käytössä olevaan putkistosuunnitteluohjelmistoon koettiin osin haasteelliseksi, mikä saattoi lisätä suunnitteluun kuluvaan aikaa verrattuna vakiintuneisiin suunnittelukäytäntöihin. Lisäksi modulaaristen ratkaisujen hankintahintaa pidettiin joissakin vastauksissa korkeana, mikä korosti tarvetta tapauskohtaiselle kustannus–hyötyarvioinnille.

Useissa vastauksissa painotettiin, että modulaaristen kannakeratkaisujen käyttö tulisi perustua projektikohtaiseen harkintaan. Niiden nähtiin soveltuvan parhaiten pieniin ja keskikokoisiin sekundäärikannakkeisiin sekä tilanteisiin, joissa asennusaikataulu on kriittinen tai materiaalien nopea saatavuus on tärkeää. Raskaammissa rakenteissa tai tapauksissa, joissa muutostarpeet ovat epätodennäköisiä, perinteiset hitsatut sekundäärikannakkeet koettiin edelleen tarkoituksenmukaisiksi. Osa vastaajista toi myös esiin, että olemassa olevia vakiintuneita kannakointijärjestelmiä voitaisiin hyödyntää nykyistä tehokkaammin ilman siirtymistä modulaarisiin ratkaisuihin.

Kokonaisuutena kyselyn perusteella suunnittelijoiden kokemukset modulaarisista kannakeratkaisuista olivat osittain ristiriitaisia ja vahvasti kontekstisidonnaisia. Aineisto tukee näkemystä, jonka mukaan modulaariset kannakeratkaisut eivät ole yksiselitteisesti perinteisiä ratkaisuja parempia tai huonompia, vaan niiden soveltuvuus määräytyy projektin koon, aikataulun, muutosten todennäköisyyden sekä kustannusrakenteen perusteella.

4 Tulokset, analyysi ja keskustelu

4.1 Määrälliset tulokset

Määrällinen analyysi perustui kontrolloituihin suunnitteluaikakokeisiin, joissa mitattiin kannakekokonaisuuksien mallinnukseen ja piirustusten laatimiseen kuluva aika eri suunnittelutyökaluilla. Tulokset osoittivat selkeitä ja systemaattisia eroja suunnitteluun kuluneessa ajassa työkalujen välillä. Erityisesti sekundääräkannakkeiden mallinnusvaiheessa havaittiin merkittäviä aikasäästöjä modulaarisiin ratkaisuihin perustuvilla työkaluilla verrattuna perinteiseen suunnittelumenetelmään. Myös kokonaisuusmallinusaika, joka sisälsi primääräkannakkeen, sekundääräkannakkeen ja piirustuksen laatimisen, oli keskimäärin lyhyempi modulaarista lähestymistapaa käytettäessä.

Suunnitteluaikakokeet toistettiin useita kertoja saman koeasetelman mukaisesti, mikä mahdollisti mittausten toistettavuuden arvioinnin. Luotettavuusanalyysi intraluokkaisen korrelaatiokertoimen avulla osoitti erittäin korkean mittausten toistettavuuden kaikissa tarkastelluissa tapauksissa ($ICC(3,k) > 0,9$). Tämä viittaa siihen, että havaitut erot suunnitteluaikojen välillä eivät ole satunnaisia, vaan heijastavat systemaattisia eroja suunnittelutyökalujen ja -menetelmien välillä.

Pelkkien keskiarvojen tarkastelun lisäksi tuloksia analysoitiin vaikutuksen suuruuden näkökulmasta. Aikasäästöt yksittäisessä kannakekokonaisuudessa olivat absoluuttisesti tarkasteltuna verrattain pieniä, mutta toistuvien suunnittelutehtävien ja suurten projektikokonaisuuksien näkökulmasta ne kumuloituvat huomattaviksi.

Kokonaisuutena määrälliset tulokset tukevat tutkimuksen lähtöoletusta siitä, että modulaarisiin ratkaisuihin perustuvat suunnittelumenetelmät voivat parantaa suunnittelutehokkuutta erityisesti sekundääräkannakkeiden osalta. Samalla tulokset osoittavat, että suunnitteluaikojen vertailu edellyttää huolellisesti kontrolloitua koeasetelmaa ja mittausten luotettavuuden varmistamista, jotta erot voidaan tulkita luotettavasti osaksi laajempaa suunnitteluprosessin kehittämistä.

4.2 Laadulliset tulokset

Laadullinen analyysi perustui suunnittelijoille suunnattuun kyselyaineistoon (Liite 6. Kysely toimeksiantajan putkisto-osaston suunnittelijoille), suunnitteluaikakokeen suorittaneen koehenkilön haastatteluun (Liite 5. Kannakesuunnittelukokeen kyselylomake) sekä yksittäisiin asiantuntijahavaintoihin, joiden tavoitteena oli kartoittaa kokemuksia modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen käytöstä suunnittelu- ja toteutusprojekteissa. Tulosten perusteella suunnittelijoiden näkemykset modulaarisista kannakeratkaisuista olivat vaihtelevia ja selvästi kontekstisidonnaisia, mikä korostaa ratkaisujen soveltuvuuden tapauskohtaista luonnetta.

Keskeisimpänä hyötynä modulaarisissa ratkaisuissa tunnistettiin niiden joustavuus erityisesti rakennusvaiheessa. Suunnittelijat toivat esiin, että modulaariset kannakeratkaisut mahdollistavat kannakointipisteiden siirtämisen ja rakenteiden muokkaamisen ilman laajoja purku- tai hitsaustöitä, mikä koettiin merkittäväksi eduksi tilanteissa, joissa suunnittelumuutoksia ilmenee toteutusvaiheessa. Tämän nähtiin vähentävän korjaustyön määrää ja helpottavan asennuksen hallintaa erityisesti ahtaissa tai nopeasti etenevissä kohteissa.

Suunnitteluvaiheen näkökulmasta modulaarisiin ratkaisuihin liitettiin sekä etuja että haasteita. Laaja komponenttivalikoima ja useat liitosvaihtoehdot koettiin mahdollistavan rakenteellisesti realistisemmän mallinnuksen. Toisaalta modulaaristen järjestelmien käyttöön liittyvät suunnittelutyökalut eivät kaikissa tapauksissa integroituneet saumattomasti käytössä oleviin laitossuunnitteluohjelmistoihin, mikä saattoi lisätä suunnittelutyön kuormittavuutta tai vaatia erillisiä työvaiheita. Lisäksi modulaaristen ratkaisujen korkeampaa hankintahintaa pidettiin joissakin vastauksissa rajoittavana tekijänä, mikä korosti tarvetta arvioida niiden käyttöä suhteessa projektin kokoon ja vaatimuksiin.

Useissa vastauksissa painotettiin, että modulaariset kannakeratkaisut soveltuvat parhaiten pieniin ja keskikokoisiin sekundäärikannakkeisiin sekä kohteisiin, joissa asennusaikataulu on kriittinen tai muutosten todennäköisyys on korkea. Raskaammissa rakenteissa tai suuria lämpöliikkeitä sisältävissä kohteissa perinteiset hitsatut ratkaisut nähtiin edelleen tarkoituksenmukaisina.

Osa suunnittelijoista toi esiin myös näkemyksen, jonka mukaan olemassa olevia vakiintuneita kannakointijärjestelmiä voitaisiin hyödyntää tehokkaammin ilman tarvetta siirtyä modulaarisiin ratkaisuihin.

Kokonaisuutena laadulliset tulokset osoittavat, että modulaaristen kannakeratkaisujen koettu arvo ei perustu yksittäiseen ominaisuuteen, vaan niiden kykyyn vastata projektikohtaisiin haasteisiin. Aineisto tukee näkemystä, jonka mukaan modulaariset ratkaisut voivat tarjota merkittäviä etuja erityisesti muutostilanteissa ja asennuksen joustavuudessa, mutta niiden käyttöönotto edellyttää huolellista harkintaa suunnittelun, kustannusten ja teknisten vaatimusten näkökulmasta.

4.3 Yhdistetty analyysi ja triangulaatio

Määrällisten ja laadullisten tulosten yhdistäminen mahdollistaa tutkimusilmiön tarkastelun useasta toisiaan täydentävästä näkökulmasta. Suunnitteluaiakokeista saadut määrälliset tulokset osoittivat, että modulaarisiin ratkaisuihin perustuvat suunnittelumenetelmät voivat lyhentää suunnitteluun kuluvaan aikaan erityisesti sekundäärikannakkeiden osalta. Nämä havainnot olivat johdonmukaisia ja toistettavia, mikä vahvistui korkeiden luotettavuusarvojen perusteella. Laadullinen aineisto tukee näitä tuloksia siltä osin, että suunnittelijat kuvasivat modulaaristen ratkaisujen vähentävän manuaalisia työvaiheita ja helpottavan rakenteiden muokkaamista, mikä tarjoaa uskottavan selityksen havaituista aikasäästöistä.

Triangulaation näkökulmasta määrälliset ja laadulliset tulokset tukevat toisiaan erityisesti suunnittelutehokkuuden ja muutostilanteiden hallinnan osalta. Aikamittaukset osoittivat suunnitteluprosessin tehostumista, ja suunnittelijoiden kokemukset korostivat modulaaristen ratkaisujen joustavuutta tilanteissa, joissa suunnitteluun tai toteutukseen joudutaan tekemään muutoksia. Tämä viittaa siihen, että suunnitteluaikojen lyheneminen ei ole pelkästään ohjelmistotekninen ilmiö, vaan liittyy laajemmin suunnittelumenetelmän rakenteelliseen luonteeseen ja sen kykyyn tukea iteratiivista työskentelyä.

Tuloksissa havaittiin kuitenkin myös kohtia, joissa määrällinen ja laadullinen aineisto eivät tue toisiaan yksiselitteisesti. Vaikka suunnitteluajakokeet osoittivat modulaaristen ratkaisujen potentiaalisen suunnittelutehokkuuden parantamisessa, osa suunnittelijoista toi esiin haasteita liittyen suunnittelutyökalujen käytettävyyteen ja integraatioon olemassa oleviin laitossuunnitteluohjelmistoihin.

Tämä osittainen ristiriita viittaa siihen, että mitattu suunnitteluajojen tehostuminen ei välttämättä realisoidu kaikissa käytännön suunnittelutilanteissa samalla tavalla, vaan on riippuvainen suunnittelijan kokemuksesta, työkalujen kypsyystasosta ja projektikohtaisista toimintatavoista.

Rakennusvaiheen näkökulmasta triangulaatio osoittaa selkeän yhteneväisyyden laadullisten havaintojen ja määrällisten tulosten välillä, vaikka asennusaikoja ei mitattu samalla koeasetelmalla kuin suunnitteluajoja. Suunnittelijoiden kokemukset modulaaristen ratkaisujen nopeammasta ja joustavammasta asennuksesta sekä muutosten helpommasta toteutuksesta tukevat epäsuorasti määrällisiä havaintoja suunnittelun tehostumisesta ja viittaavat siihen, että suunnitteluvaiheessa saavutetut hyödyt voivat heijastua myös toteutusvaiheeseen reworkin ja lisätyön vähentymisenä.

Kokonaisuutena triangulaatio vahvistaa tutkimuksen keskeiset havainnot, mutta samalla se tuo esiin ilmiön monimuotoisuuden. Modulaariset kannakeratkaisut näyttäytyvät määrällisten tulosten perusteella potentiaalisena keinona parantaa suunnittelutehokkuutta, ja laadullinen aineisto tukee tätä tulkintaa erityisesti muutosten hallinnan ja asennuksen joustavuuden näkökulmasta. Samalla tulokset korostavat, että ratkaisujen hyödyt eivät ole universaaleja, vaan riippuvat kontekstista, työkalujen käytettävyydestä ja projektin vaatimuksista. Tämä vahvistaa sekamenetelmällisen lähestymistavan merkitystä ja osoittaa, että ilmiön ymmärtäminen edellyttää sekä numeerista mittausta että kokemuksellista tarkastelua.

4.4 Tutkimuskysymysten analyysi tulosten perusteella

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko modulaaristen kannakeratkaisujen avulla parantaa suunnittelun tehokkuutta, laatua ja taloudellisuutta sekä vähentää rakennusvaiheen korjaustyön tarvetta ja tehostaa asennusta laitosprojekteissa.

Tutkimuskysymyksiin vastaaminen perustuu määrällisten suunnitteluaiakokeiden, laadullisen kyselyaineiston sekä näiden yhdistetyn analyysin tuloksiin.

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen osalta tulokset osoittavat, että modulaarisiin ratkaisuihin perustuvat suunnittelumenetelmät voivat parantaa suunnittelutehokkuutta erityisesti sekundäärikannakkeiden osalta.

Määrälliset suunnitteluaiakokeet osoittivat systemaattisia aikasäästöjä verrattuna perinteisiin suunnittelumenetelmiin, ja mittauksen korkea toistettavuus tukee havaintojen luotettavuutta. Laadullinen aineisto täydentää tätä tulosta osoittamalla, että modulaaristen ratkaisujen rakenteellinen logiikka ja valmiit komponentit voivat vähentää manuaalisia ja toistuvia työvaiheita suunnittelussa. Suunnittelun laadun osalta aineisto ei kuitenkaan anna yksiselitteistä näyttöä laadun paranemisesta, vaan pikemminkin viittaa siihen, että laatuun vaikuttavat ensisijaisesti suunnittelijan kokemus, työkalujen käytettävyys ja projektin vaatimusten selkeys. Modulaariset ratkaisut voivat tukea laadukasta suunnittelua, mutta eivät itsessään takaa sitä.

Taloudellisuuden näkökulmasta tutkimustulokset osoittavat, että modulaaristen kannakeratkaisujen kustannusvaikutuksia ei voida arvioida pelkästään materiaalikustannusten perusteella. Vaikka modulaaristen ratkaisujen hankintahinta on tyypillisesti korkeampi, määrälliset ja laadulliset tulokset viittaavat siihen, että suunnitteluun ja toteutukseen liittyvät aikasäästöt sekä muutosten hallinnan parantuminen voivat kompensoida korkeampia materiaalikustannuksia tietyissä projektikonteksteissa. Taloudellisuus näyttäytyy näin ollen tapauskohtaisena ja vahvasti sidoksissa projektin aikatauluun, muutosten todennäköisyyteen ja toteutustapaan.

Toiseen tutkimuskysymykseen liittyen tulokset tukevat näkemystä, jonka mukaan modulaariset kannakeratkaisut voivat vähentää rakennusvaiheen korjaustyön tarvetta ja helpottaa asennusta. Laadullinen aineisto korostaa modulaaristen ratkaisujen joustavuutta tilanteissa, joissa kannakointia joudutaan muuttamaan rakentamisen aikana. Näissä tapauksissa muutokset voidaan toteuttaa ilman laajoja purku- tai hitsaustöitä, mikä voi vähentää reworkin määrää ja siihen liittyviä lisäkustannuksia.

Vaikka asennusaikoja ei mitattu samalla kontrolloidulla koeasetelmalla kuin suunnitteluajoja, suunnittelijoiden kokemukset ja aikaisemmat vertailuhavainnot tukevat tulkintaa modulaaristen ratkaisujen asennustehokkuudesta erityisesti muutostilanteissa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkimuskysymyksiin ei ole yksiselitteistä kyllä- tai ei-vastausta. Modulaariset kannakeratkaisut voivat parantaa suunnittelutehokkuutta ja tukea rakennusvaiheen joustavuutta erityisesti tietyissä projektityypeissä, mutta niiden hyödyt eivät ole universaaleja. Tulokset osoittavat, että modulaaristen ratkaisujen käyttö on perusteltua erityisesti kohteissa, joissa muutosten todennäköisyys on korkea ja aikataulullinen joustavuus on kriittistä, kun taas perinteiset ratkaisut voivat olla tarkoituksenmukaisempia vakiintuneissa ja muutoksiltaan vähäisissä kohteissa.

5 Tarkastelu, johtopäätökset ja jatkotutkimus

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia kriittisesti ja suhteessa tutkimusasetelmaan, aineistoon sekä tutkimuksen toteutukseen liittyviin valintoihin. Luvussa arvioidaan tulosten luotettavuutta, yleistettävyyttä ja mahdollisia vinoumia sekä pohditaan työn laatijan roolia ja sen vaikutusta havaintoihin. Lisäksi luvussa esitetään tutkimuksen keskeiset johtopäätökset ja tarkastellaan niiden käytännön implikaatioita laitosprojektien suunnittelun ja toteutuksen näkökulmasta. Luvun lopussa vastataan asetettuihin tutkimuskysymyksiin, tunnistetaan tutkimuksen rajoitteet ja esitetään suuntaviivoja jatkotutkimukselle.

5.1 Tutkimuksen kriittinen tarkastelu

5.1.1 Tutkimuksen kontekstisidonnaisuus ja yleistettävyys

Tämän diplomityön tuloksia on tarkasteltava tutkimuksen kontekstisidonnaisuus huomioiden. Tutkimus on toteutettu yhden suuren laitosprojekteja toimittavan toimijan toimintaympäristössä, ja empiirinen aineisto perustuu kyseisen organisaation käytäntöihin, suunnittelutyökaluihin ja projektimalliin. Näin ollen tulokset kuvaavat ensisijaisesti tämänkaltaista laitossuunnittelukontekstia, eikä niitä voida sellaisenaan yleistää kaikkiin teollisiin suunnitteluympäristöihin tai organisaatiotyyppeihin.

Suunnitteluajakokeessa käytetty laitosmalli ja kannakointipisteet on valittu edustamaan tyypillisiä laitosprojekteissa esiintyviä tilanteita, mutta ne muodostavat silti rajatun otoksen mahdollisista rakenteellisista ratkaisuista. Todellisissa projekteissa kannakeratkaisut, kuormitustilanteet ja asennusolosuhteet voivat vaihdella merkittävästi, mikä vaikuttaa sekä suunnittelun että asennuksen tehokkuuteen. Tämän vuoksi tutkimuksen määrällisiä tuloksia on tulkittava suuntaa antavina erityisesti sellaisten kohteiden osalta, jotka poikkeavat merkittävästi tutkimuksessa tarkastelluista rakenteista. Lisäksi tutkimuksessa hyödynnetyt suunnittelutyökalut ja modulaariset plugin-ratkaisut edustavat tiettyä ohjelmisto- ja työkalusukupolvea. Suunnittelutyökalujen kehitys, organisaatiokohtaiset toimintamallit sekä käyttäjien osaamistaso voivat vaikuttaa siihen, miten vastaavat ratkaisut toimivat muissa ympäristöissä.

Tästä syystä tutkimuksen tulokset ovat parhaiten yleistettävissä tilanteisiin, joissa suunnitteluprosessi, työkalut ja projektirakenne vastaavat tässä tutkimuksessa tarkasteltua kontekstia.

Laadullisen aineiston osalta suunnittelijoiden kokemukset ja ennakkokäsitykset heijastavat vastaajien omaa toimintaympäristöä ja aiempia kokemuksia. Vaikka nämä havainnot tarjoavat arvokasta tietoa modulaaristen kannakeratkaisujen koetuista hyödyistä ja haasteista, ne eivät muodosta tilastollisesti yleistettävää aineistoa. Laadullisen aineiston merkitys onkin ensisijaisesti tulosten tulkintaa tukeva ja selittävä, ei määrällisiä johtopäätöksiä vahvistava.

Edellä mainituista syistä tutkimuksen johtopäätökset ovat yleistettävissä ensisijaisesti samankaltaisiin laitosprojekteihin, joissa suunnittelun vakiointi, muutosten hallinta ja työmaavaiheen ennakoitavuus korostuvat. Tutkimus tarjoaa siten perusteltuja viitteitä modulaaristen kannakeratkaisujen potentiaalista, mutta laajempien yleistysten tekeminen edellyttäisi useamman organisaation, projektityypin ja suunnittelutiimin kattavaa tarkastelua.

5.1.2 Tutkimusasetelman vaikutus havaintoihin

Tutkimuksessa käytetty tutkimusasetelma on vaikuttanut siihen, millaisia havaintoja modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen vertailusta on voitu tehdä. Suunnittelu-aikakoe toteutettiin kontrolloituna kokeena, jossa suunnittelutehtävät, työkalut ja lähtötiedot pidettiin mahdollisimman vakioituina. Tämä mahdollisti suunnittelun tehokkuuden vertailun hallituissa olosuhteissa, mutta samalla rajasi pois osan todellisissa projekteissa esiintyvistä vaihtelusta, kuten muutosten määrän, aikataulupaineet ja usean suunnittelijan välisen työnjaon. Kokeessa tarkastellut kannakointipisteet valittiin edustamaan erityyppisiä suunnittelutilanteita, mutta niiden lukumäärä oli rajallinen. Vaikka rakenteiden monimutkaisuutta pyrittiin vaihtelevaan, ei koe kata kaikkia mahdollisia primääri- ja sekundäärikannakeratkaisuja, joita laitosprojekteissa esiintyy. Tämän vuoksi yksittäisten kannakointipisteiden tulokset voivat korostaa tiettyjen rakenteellisten ratkaisujen vaikutusta suunnittelu-aikaan suhteessa toisiin. Lisäksi tutkimuksessa verratut modulaariset suunnittelutyökalut perustuivat toiminnallisesti hyvin samankaltaisiin plugin-ratkaisuihin.

Tämä mahdollisti modulaaristen ratkaisujen tarkastelun yleisellä tasolla, mutta rajoitti eri toimittajien ratkaisujen välisen erottelun tekemistä. Näin ollen tutkimuksen tulokset kuvaavat ensisijaisesti modulaaristen kannakeratkaisujen periaatteellista vaikutusta suunnitteluun, eivät yksittäisen valmistajan työkalun suorituskykyä.

Tutkimusasetelmaan liittyy myös se, että suunnitteluaikakokeessa keskityttiin suunnitteluvaiheeseen, eikä varsinaista asennus- tai rakennusvaihetta havainnoitu suoraan. Rakennusvaiheeseen liittyvät havainnot, kuten reworkin ja asennusajan muutokset, perustuvat pääosin laadulliseen aineistoon ja asiantuntijahavaintoihin. Tämän vuoksi näihin liittyvät johtopäätökset ovat luonteeltaan täydentäviä ja suuntaa antavia suhteessa määrällisesti mitattuihin suunnitteluaikatuloksiin.

Kokonaisuutena tutkimusasetelma tukee erityisesti suunnittelun tehokkuuden ja laadun vertailua modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen välillä. Samalla asetelma asettaa rajoitteita tulosten yleistämiseksi tilanteisiin, joissa projektien rakenne, suunnitteluprosessi tai käytettävät työkalut poikkeavat merkittävästi tutkimuksessa tarkastellusta kokonaisuudesta.

5.1.3 Mittausten luotettavuus ja mahdolliset vinoumat

Suunnitteluaikakokeessa mitattavana suureena oli suunnitteluun kuluva aika, joka mitattiin sekuntikellon avulla ja kirjattiin mittapöytäkirjoihin. Menetelmä mahdollistaa ajankäytön tarkan seurannan yksittäisten työvaiheiden tasolla, mutta se on herkkä mittaustilanteeseen liittyville tekijöille, kuten työn keskeytyksille ja mittajaan havainnointivirheille.

Mittaukset suoritti sama henkilö koko kokeen ajan, mikä vähentää mittaustapojen välisiä eroja ja parantaa mittausten keskinäistä vertailtavuutta. Samalla tämä ratkaisu voi kuitenkin altistaa tulokset yksittäisen mittajaan toimintaan liittyville systemaattisille vinoumille. Tätä pyrittiin hallitsemaan määrittelemällä mitattavat työvaiheet etukäteen selkeästi sekä toistamalla koe useita kertoja. Kokeen viisi toistokertaa mahdollistivat suunnitteluaikojen sisäisen vaihtelun tarkastelun ja vähensivät yksittäisten poikkeavien havaintojen vaikutusta kokonaisaineistoon. Suunnitteluaikakokeeseen liittyy myös oppimiskäyrän mahdollinen vaikutus mittaustuloksiin.

Toistuvien suunnittelutehtävien myötä suunnittelija saattoi kehittyä työkalujen käytössä tai tehtävän suorittamisessa, mikä voi osaltaan lyhentää suunnitteluajoja riippumatta varsinaisesta kannakeratkaisusta. Oppimiskäyrän vaikutusta pyrittiin lieventämään mittausten toistolla ja tulosten keskiarvoistamisella.

Mittausaineiston luotettavuutta arvioitiin lisäksi tilastollisin menetelmin, joilla tarkasteltiin mittausten yhteneväisyyttä ja toistettavuutta. Intraclass correlation coefficient (ICC) -analyysin avulla voitiin arvioida, missä määrin mittaustulokset olivat keskenään yhdenmukaisia eri toistokerroilla. Tämä tuki käsitystä siitä, että mittausten vaihtelu oli pääosin hallittua eikä satunnaista.

Mahdollisista vinoumista huolimatta mittausmenetelmä soveltuu tutkimuksen tavoitteisiin, joissa korostuu suunnittelun tehokkuuden vertaileva tarkastelu eri kannakeratkaisujen välillä. Tuloksia on kuitenkin tulkittava huomioiden, että mitatut suunnitteluajat kuvaavat kontrolloidussa kokeessa havaittua tehokkuutta eivätkä välttämättä vastaa suoraan todellisten projektien kaikkia ajankäyttöön vaikuttavia tekijöitä.

5.1.4 Laadullisen aineiston tulkinnan epävarmuudet

Tutkimuksessa hyödynnetty laadullinen aineisto koostui suunnittelijoille suunnatusta kyselystä, asiantuntijakeskusteluista sekä työn laatijan omista havainnoista. Laadullisen aineiston tarkoituksena oli täydentää suunnitteluajakokeen määrällisiä tuloksia ja tarjota syvempää ymmärrystä modulaaristen kannakeratkaisujen koetuista hyödyistä, haasteista ja käyttöön liittyvistä asenteista. Laadulliseen aineistoon liittyy kuitenkin tulkinnallisia epävarmuuksia, jotka on huomioitava johtopäätöksiä tehtäessä. Kyselyaineisto perustuu vastaajien subjektiivisiin kokemuksiin ja näkemyksiin, jotka voivat heijastaa yksittäisten projektien erityispiirteitä, aiempia onnistumisia tai epäonnistumisia sekä henkilökohtaisia mieltymyksiä. Lisäksi vastaajien käsitykset modulaarisista kannakeratkaisuista voivat olla osittain muodostuneet rajallisen käyttökokemuksen perusteella tai ennakkokäsitysten pohjalta, mikä voi vaikuttaa vastausten sävyyn. Näistä syistä kyselyaineistoa ei voida pitää määrällisesti yleistettävänä, vaan sen rooli on ensisijaisesti ilmiötä kuvaava ja selittävä.

Asiantuntijakeskusteluihin liittyy vastaavasti tulkinnanvaraisuutta, sillä keskustelujen sisältö ja painotukset voivat vaihdella osallistujien taustan, roolin ja kokemustason mukaan. Keskusteluissa esiin nousseet havainnot tarjoavat arvokasta kontekstuaalista tietoa, mutta ne eivät muodosta systemaattisesti kerättyä aineistoa samalla tavalla kuin kysely tai kokeellinen mittaus. Tämän vuoksi asiantuntijahavaintoja on tarkasteltava osana laajempaa kokonaisuutta eikä itsenäisinä todisteina tutkimuskysymyksiin vastaamisessa.

Diplomityön tekijän omat havainnot ovat osa laadullista aineistoa ja perustuvat suunnittelutyökalujen käyttöön, kokeen toteutukseen sekä työmaaympäristöön liittyvään kontekstituntemukseen. Vaikka nämä havainnot mahdollistivat tutkimuksen realistisen toteutuksen ja tulosten tulkinnan käytännön näkökulmasta, ne voivat myös altistaa analyysin työn laatijan omille oletuksille ja painotuksille. Tämän vuoksi omien havaintojen merkitys on pyritty pitämään täydentävänä suhteessa kysely- ja mittausaineistoon.

Kokonaisuutena laadullinen aineisto tukee tutkimuksen määrällisiä havaintoja ja auttaa huomioimaan modulaaristen kannakeratkaisujen käytännön vaikutuksia suunnitteluun ja rakennusvaiheeseen. Tuloksia on kuitenkin tulkittava siten, että laadullinen aineisto vahvistaa tai selittää määrällisiä tuloksia, mutta ei yksinään riitä laajojen yleistysten tekemiseen modulaaristen ratkaisujen vaikutuksista.

5.1.5 Työn laatijan rooli ja tutkimuksen toteutukseen liittyvät valinnat

Tutkimuksen toteutuksessa työn laatijan rooli ja siihen liittyvät valinnat ovat tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa tutkimusprosessiin ja tulosten tulkintaan. Tämä diplomityö on toteutettu työsuhteessa toimeksiantajayritykseen, mikä on mahdollistanut pääsyn todellisiin suunnitteluaineistoihin, työkaluihin ja asiantuntijoihin. Samalla tämä asetelma edellyttää kriittistä tarkastelua sen suhteen, miten työn laatijan oma toimintaympäristö ja ennakkokäsitykset ovat voineet vaikuttaa tutkimuksen painotuksiin.

Työn laatijan aiempi kokemus putkistosuunnittelusta ja kannakeratkaisuista on osaltaan vaikuttanut tutkimusasetelman muotoutumiseen, erityisesti tarkasteltavien kannakointipisteiden valintaan ja suunnitteluaiakokeen käytännön toteutukseen.

Tämä kokemus on mahdollistanut realistisen ja käytännönläheisen tutkimusasetelman, jossa tarkastellut suunnittelutehtävät vastaavat todellisia projektitilanteita. Toisaalta vastaava kokemus voi vaikuttaa siihen, mihin ilmiöihin tutkimuksessa kiinnitetään huomiota ja millaisia tulkintoja aineistosta tehdään. Mittausmenetelmät, kokeen rakenne ja analyysitavat on kuvattu yksityiskohtaisesti, ja määrällisten tulosten tulkintaa on tuettu ICC-analyysillä. Lisäksi laadullisen ja määrällisen aineiston yhdistämisessä on hyödynnetty triangulaatiota, jonka avulla pyrittiin vähentämään yksittäisen aineistolähteen vaikutusta johtopäätöksiin.

Työn laatijan rooli on ollut keskeinen erityisesti tutkimuksen käytännön toteutuksessa, mutta tulosten tulkinnassa on pyritty säilyttämään analyyttinen ja varovainen lähestymistapa. Johtopäätökset on rajattu koskemaan niitä ilmiöitä, joita käytetty aineisto ja tutkimusasetelma tukevat, eikä tutkimuksessa pyritä ylitulkintaan tai laajempiin yleistyksiin kuin mitä aineisto perustellusti mahdollistaa.

5.1.6 Johtopäätösten rajaus ja jatkotarkastelun tarpeet

Tässä diplomityössä esitetyt johtopäätökset perustuvat tutkimuksessa käytettyyn aineistoon ja valittuun tutkimusasetelmaan, ja niitä on tulkittava näiden asettamissa rajoissa. Tutkimuksen tulokset perustuvat ensisijaisesti suunnitteluvaiheessa tehtyihin mittauksiin sekä niitä täydentävään laadulliseen aineistoon. Rakennus- ja asennusvaiheeseen liittyvät johtopäätökset, kuten reworkin väheneminen ja asennuksen helpottuminen, ovat luonteeltaan osittain epäsuoria ja perustuvat kirjallisuuteen, asiantuntijahavaintoihin, aiempaan kokemukseen. Näitä tuloksia on siksi pidettävä suuntaa antavina, ja niiden vahvistaminen edellyttäisi empiiristä tarkastelua todellisissa työmaaympäristöissä.

Johtopäätöksiä rajaa myös se, että tutkimuksessa tarkasteltiin rajattua määrää kannakointipisteitä ja suunnitteluratkaisuja. Vaikka pyrittiin edustavuuteen, eivät tulokset kata kaikkia laitosprojekteissa esiintyviä rakenteellisia, kuormituksellisia tai olosuhteisiin liittyviä variaatioita. Lisäksi käytettyjen suunnittelutyökalujen ja plugin-ratkaisujen kehitys jatkuu, mikä voi vaikuttaa modulaaristen ratkaisujen tehokkuuteen tulevaisuudessa.

Jatkotarkastelun näkökulmasta tutkimusta olisi perusteltua laajentaa kattamaan useampia organisaatioita, suunnittelutiimejä ja projektityyppejä, jotta tulosten yleistettävyyttä voitaisiin arvioida laajemmin. Erityisen arvokasta olisi toteuttaa tutkimus, jossa modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen vaikutuksia tarkastellaan todellisessa rakennus- ja asennusvaiheessa, esimerkiksi mittaamalla asennusaikoja, työmaamuutoksia ja niihin liittyviä kustannusvaikutuksia. Tällaiset jatkotutkimukset voisivat vahvistaa tässä työssä esitettyjä havaintoja ja tarjota entistä kattavamman kuvan modulaaristen kannakeratkaisujen vaikutuksista koko projektin elinkaaren aikana.

5.2 Keskeiset johtopäätökset

Tämän diplomityön keskeinen johtopäätös on, että modulaariset kannakeratkaisut voivat tarjota merkittäviä hyötyjä laitosprojektien suunnittelu- ja toteutusvaiheissa, mutta niiden soveltuvuus on vahvasti riippuvainen projektin kontekstista. Määrälliset tulokset osoittivat, että modulaarisiin ratkaisuihin perustuvat suunnittelumenetelmät voivat tehostaa suunnittelua erityisesti sekundäärikannakkeiden osalta, ja havaittujen aikasäästöjen todettiin olevan systemaattisia ja toistettavia. Tämä viittaa siihen, että modulaarisuus voi parantaa suunnitteluprosessin tehokkuutta etenkin toistuvissa ja rakenteellisesti samankaltaisissa tehtävissä.

Laadulliset tulokset täydensivät määrällisiä havaintoja osoittamalla, että modulaaristen kannakeratkaisujen koettu arvo liittyy ennen kaikkea niiden joustavuuteen ja muunneltavuuteen rakennusvaiheessa. Mahdollisuus tehdä muutoksia ilman laajoja purku- tai hitsaustöitä nähtiin keskeisenä etuna tilanteissa, joissa suunnitteluun tai toteutukseen kohdistuu muutoksia. Tämä tukee käsitystä siitä, että modulaaristen ratkaisujen hyödyt eivät rajoitu pelkästään suunnitteluvaiheeseen, vaan voivat ulottua koko projektin elinkaareen vähentämällä reworkia ja helpottamalla asennusta. Tämä havainto on linjassa elinkaariajattelun kanssa, jossa suunnitteluratkaisujen arvoa ei arvioida pelkästään alkuinvestointien tai suunnitteluajkojen perusteella, vaan myös niiden vaikutuksella käytön, kunnossapidon ja muutosten hallintaan.

Taloudellisuuden näkökulmasta tutkimus osoittaa, että modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen vertailu ei ole yksiselitteistä. Puhtaasti materiaalikustannuksiin perustuva tarkastelu asettaa modulaariset ratkaisut epäedulliseen asemaan, mutta kokonaiskustannusten tarkastelu edellyttää huomion kiinnittämistä myös suunnitteluun, asennukseen ja muutostöihin liittyviin tekijöihin. Näin ollen modulaaristen ratkaisujen kustannustehokkuus realisoituu erityisesti projekteissa, joissa muutosten todennäköisyys on korkea ja aikataulullinen joustavuus on kriittistä.

Kokonaisuutena tutkimus osoittaa, että modulaariset kannakeratkaisut eivät ole yleispätevä korvaaja perinteisille ratkaisuille, vaan ne muodostavat täydentävän vaihtoehdon osana laajempaa kannakointiratkaisujen kokonaisuutta. Parhaimmillaan modulaarisuus tukee suunnittelun tehokkuutta, helpottaa rakennusvaiheen muutosten hallintaa ja parantaa projektin toteutettavuutta, kun taas vakiintuneissa ja muutoksiltaan vähäisissä kohteissa perinteiset ratkaisut voivat edelleen olla tarkoituksenmukaisempia.

5.3 Käytännön implikaatiot

Tutkimuksen tuloksilla on useita käytännön implikaatioita laitosprojektien suunnitteluun ja toteutukseen. Keskeinen havainto on, että modulaaristen kannakeratkaisujen hyödyt realisoituvat parhaiten projekteissa, joissa suunnitteluun ja toteutukseen kohdistuu epävarmuutta ja muutosten todennäköisyys on korkea. Tällaisissa kohteissa modulaarisuus tukee suunnittelun joustavuutta ja mahdollistaa muutosten hallinnan ilman merkittäviä lisätyövaiheita, mikä voi parantaa projektin kokonaistehokkuutta.

Suunnittelun näkökulmasta tulokset viittaavat siihen, että modulaaristen ratkaisujen hyödyntäminen edellyttää niiden huomioimista jo suunnitteluprosessin varhaisessa vaiheessa. Suunnitteluaikakokeet osoittivat, että tehokkuushyödyt liittyvät erityisesti sekundäärikannakkeiden suunnitteluun, mutta nämä hyödyt voivat jäädä saavuttamatta, mikäli työkalujen käyttö ja suunnittelumenetelmät eivät ole vakiintuneita. Tämän perusteella modulaaristen ratkaisujen käyttöönotto edellyttää suunnittelijoiden koulutusta, selkeitä suunnitteluohjeita sekä käytäntöjä, jotka tukevat työkalujen systemaattista hyödyntämistä.

Rakennusvaiheen kannalta tutkimus korostaa modulaaristen ratkaisujen potentiaalia asennuksen joustavuuden ja muutosten hallinnan parantamisessa. Laadulliset havainnot viittaavat siihen, että modulaariset kannakeratkaisut voivat vähentää työmaalla tehtävää hitsausta ja siihen liittyviä valmistelu-, suojaus- ja korjaustöitä, mikä on erityisen merkityksellistä toiminnassa olevissa laitoksissa ja kunnossapitoprojekteissa. Tämä voi parantaa työturvallisuutta ja lyhentää seisokkien kestoa, vaikka näitä vaikutuksia ei tässä tutkimuksessa mitattu suoraan.

Taloudellisesta näkökulmasta tutkimus osoittaa, että modulaaristen kannakeratkaisujen käyttöönottoa ei tulisi arvioida yksinomaan materiaalikustannusten perusteella. Sen sijaan päätöksenteossa tulisi huomioida koko toteutusketju suunnittelusta asennukseen ja mahdollisiin muutostöihin. Modulaaristen ratkaisujen käyttö voi olla perusteltua erityisesti tilanteissa, joissa aikataulu on kriittinen tai joissa projektin elinkaaren aikana odotetaan muutoksia. Vakiintuneissa ja vähämuutoksisissa kohteissa perinteiset ratkaisut voivat edelleen tarjota kustannustehokkaan vaihtoehdon.

Kokonaisuutena käytännön implikaatiot korostavat tarvetta tapauskohtaiselle harkinnalle ja modulaaristen ratkaisujen valinnalle osana laajempaa kannakointistrategiaa. Tulokset tukevat näkemystä, jonka mukaan modulaarisuus ei ole yksittäinen tekninen ratkaisu, vaan suunnittelu- ja toteutusfilosofia, jonka hyödyt realisoituvat parhaiten, kun se on integroituna projektin toimintamalleihin ja päätöksentekoon.

5.4 Tutkimuskysymysten yhteenveto

Tässä alaluvussa tarkastellaan, miten diplomityölle asetettuihin tutkimuskysymyksiin voidaan vastata tutkimuksen tulosten perusteella. Tutkimuskysymysten ja niihin perustuvien keskeisten havaintojen koonti esitetään taulukossa, jossa vastaukset on tiivistetty määrällisen ja laadullisen aineiston analyysiin pohjautuen. Taulukko 2 havainnollistaa modulaaristen kannakeratkaisujen vaikutuksia suunnittelun tehokkuuteen ja laatuun sekä rakennusvaiheessa ilmenevän reworkin ja asennustyön näkökulmasta.

Taulukko 2. Vastaukset tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuskysymyksiin vastaaminen		
Numero	Kysymys	Vastaus
1.1	Voiko modulaarisilla kannakkeilla mahdollistaa tehokkaampaa suunnittelua?	Kyllä. Suunnitteluaiakokeiden perusteella modulaarinen suunnittelutyökalu oli keskimäärin nopeampi kuin perinteinen VOF-support, erityisesti sekundäärikannakkeiden mallinnuksessa ja kannakekokonaisuuksien dokumentoinnissa.
1.2	Voiko modulaarisilla kannakkeilla mahdollistaa laadukkaampaa suunnittelua?	Osittain kyllä. Modulaariset ratkaisut tukevat vakiointia ja yhdenmukaisia detaljeja, mikä parantaa toistettavuutta ja vähentää yksilöllisten suunnitteluvirheiden riskiä. Laadun paraneminen edellyttää kuitenkin selkeitä suunnitteluohjeita ja sopivuuden arviointia kohteen kuormitus- ja olosuhdevaatimuksiin.
2.1	Voidaanko modulaarisilla kannakkeilla vähentää reworkin tarvetta rakennusvaiheessa?	Todennäköisesti kyllä. Laadullinen aineisto (<i>suunnittelijoiden kokemukset ja asiantuntijahavainnot</i>) korosti modulaaristen ratkaisujen muunneltavuutta ja muutostenhallinnan helpottumista, mikä vähentää työmaalla tehtäviä korjauksia erityisesti muutostilanteissa.
2.2	Voidaanko modulaarisilla kannakkeilla vähentää asennusaikaa ja helpottaa asennusta vähentäen kustannuksia?	Kyllä tietyissä kohteissa. Modulaariset kannakkeet ovat mekaanisesti koottavia, mikä vähentää työmaahitsauksen tarvetta, tulityöjärjestelyjä ja paikkamaalausta. Tämä nopeuttaa asennusta ja voi pienentää kokonaiskustannuksia etenkin kohteissa, joissa työmaolosuhteet ovat haastavat tai muutoksia esiintyy paljon.

5.5 Tutkimuksen rajoitteet

Tähän tutkimukseen liittyy useita rajoitteita, jotka on huomioitava tuloksia tulkittaessa ja yleistettäessä.

Ensimmäinen keskeinen rajoite liittyy määrälliseen aineistoon ja sen laajuuteen. Suunnitteluaiakokeet toteutettiin rajatulla määrällä suunnittelijoita ja suunnittelutyökaluja, minkä vuoksi tulokset kuvaavat ensisijaisesti tutkittuja koeasetelmia eivätkä välttämättä kata kaikkia mahdollisia suunnittelutilanteita tai työkaluyhdistelmiä. Vaikka mittausten toistettavuus osoittautui korkeaksi, tulokset eivät poista yksilöllisten työskentelytapojen ja kokemustason vaikutusta suunnitteluaiakoihin.

Toinen merkittävä rajoite liittyy suunnitteluaiakokeiden luonteeseen kontrolloituna testinä. Kokeet toteutettiin ennalta määritellyillä kannakekokonaisuuksilla, jotka eivät täysin vastaa todellisten projektien monimuotoisuutta.

Käytännön projekteissa suunnitteluun vaikuttavat useat samanaikaiset tekijät, kuten muuttuvat lähtötiedot, aikataulupaineet ja sidosryhmien vaatimukset, joita ei voitu täysin mallintaa koeasetelmassa. Tämän vuoksi mitatut suunnitteluajkojen erot voivat poiketa todellisissa projektikonteksteissa saavutettavista hyödyistä.

Laadullisen aineiston osalta rajoitteita aiheuttaa vastaajajoukon koko ja kokemus modulaarisista kannakeratkaisuista. Kyselyyn vastanneista vain osa oli suunnitellut modulaarisia ratkaisuja käytännössä, mikä voi vaikuttaa vastausten painotuksiin ja näkökulmiin. Lisäksi laadullinen aineisto perustuu vastaajien subjektiivisiin kokemuksiin, joita ei voida suoraan yleistää kaikkiin suunnittelijoihin tai projekteihin. Tästä huolimatta aineisto tarjoaa arvokasta kontekstuaalista tietoa määrällisten tulosten tulkintaan.

Tutkimuksen rajoitteisiin kuuluu myös kustannusvertailuun liittyvä epävarmuus. Modulaaristen ja perinteisten sekundäärirakenteiden kustannuksia ei voitu vertailla täysimääräisesti toteutuneiden projektien perusteella, vaan vertailu perustui rajalliseen hintatietoon ja tapauskohtaisiin havaintoihin. Erilaiset toimitusasteet, esivalmistuksen laajuus ja työmaakohdaiset käytännöt vaikeuttavat suoraviivaista kustannusvertailua ja rajaavat taloudellisten johtopäätösten yleistettävyyttä.

Lisäksi tutkimus ei kattanut kaikkia kannakeratkaisujen teknisiä ja toiminnallisia näkökulmia, kuten pitkäaikaista kestävyyttä, kunnossapitotarpeita tai elinkaarikustannuksia. Myöskään asennusaikoja ei mitattu kontrolloidulla koeasetelmalla, vaan niistä tehtiin tulkintoja epäsuoran aineiston ja suunnittelijoiden kokemusten perusteella.

Nämä rajaukset on huomioitava, kun tutkimuksen tuloksia hyödynnetään päätöksenteossa tai jatkotutkimuksen pohjana.

5.6 Jatkotutkimuksen suuntaviivat

Tämän tutkimuksen tulokset ja tunnistetut rajoitteet osoittavat useita suuntia, joihin aihepiiriä koskevaa jatkotutkimusta olisi perusteltua kohdistaa.

Ensimmäinen keskeinen jatkotutkimusaihe liittyy suunnitteluajkojen ja asennusaikojen laajempaan empiiriseen tarkasteluun todellisissa projektikonteksteissa.

Tulevissa tutkimuksissa suunnittelun ja asennuksen tehokkuutta olisi perusteltua mitata useamman suunnittelijan, erilaisten projektityyppien ja laajemman kannakejoukon avulla, jotta tulosten yleistettävyyttä voitaisiin parantaa.

Toinen tärkeä jatkotutkimuksen kohde on modulaaristen ja perinteisten kannakeratkaisujen kokonaiskustannusten tarkastelu elinkaarinäkökulmasta.

Pelkkien materiaalikustannusten ja suunnitteluajojen sijaan tutkimuksessa tulisi huomioida myös asennus-, muutos-, kunnossapito- ja purkukustannukset sekä niiden jakautuminen projektin eri vaiheisiin. Tämä mahdollistaisi kokonaisvaltaisemman arvioinnin ratkaisujen taloudellisesta kannattavuudesta ja tukisi päätöksentekoa erityisesti pitkäikäisissä prosessilaitoksissa.

Jatkotutkimuksessa olisi lisäksi perusteltua tarkastella modulaaristen kannakeratkaisujen vaikutusta suunnitteluprosessien vakiinnuttamiseen ja standardointiin. Erityisesti tulisi selvittää, missä määrin modulaarisuus mahdollistaa yhtenäisempien suunnitteluohjeiden ja toimintamallien kehittämisen sekä miten nämä vaikuttavat suunnittelun laatuun ja ennustettavuuteen pitkällä aikavälillä. Tämä edellyttäisi useita tapaututkimuksia eri organisaatioissa ja projektityypeissä.

Myös työkalujen ja ohjelmistojen näkökulmasta jatkotutkimus tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia. Suunnittelutyökalujen käytettävyyttä, integraatiota ja oppimiskäyriä tulisi tarkastella systemaattisemmin esimerkiksi käyttäjätutkimusten ja pitkäikäisaineistojen avulla. Tällainen tutkimus voisi tuottaa arvokasta tietoa siitä, miten modulaaristen ratkaisujen suunnittelutyökalut voidaan ottaa käyttöön tehokkaasti ja miten niiden hyödyt realisoituvat ajan myötä.

Lopuksi jatkotutkimuksessa olisi perusteltua tarkastella modulaaristen kannakeratkaisujen soveltuvuutta erilaisiin teknisiin reunaehtoihin, kuten suuriin kuormituksiin, lämpöliikkeisiin ja vaativiin käyttöympäristöihin. Tämä tukisi teknisesti perusteltujen rajojen määrittämistä modulaaristen ratkaisujen käytölle ja auttaisi tunnistamaan ne kohteet, joissa perinteiset ratkaisut ovat edelleen tarkoituksenmukaisempia.

Yhdessä nämä jatkotutkimussuunnat muodostavat kokonaisuuden, joka syventäisi ymmärrystä modulaaristen kannakeratkaisujen roolista osana tulevaisuuden laitossuunnittelua.

Hyödynnetyt digitaaliset työkalut

Tässä diplomityössä on hyödynnetty generatiivista tekoälyä tekstin kielellisen selkeyden parantamiseen, kirjoitusasun tarkistamiseen sekä ilmaisun sujuvuuden arviointiin. Generatiivista tekoälyä ei ole käytetty tutkimusasetelman määrittelyyn, tutkimusaineiston analysointiin, tulosten muodostamiseen, tulkintaan eikä johtopäätösten tekemiseen. Kaikki työssä esitetyt tekstit, tutkimukselliset ratkaisut, analyysit, tulkinnat ja johtopäätökset ovat työn tekijän itsenäisesti laatimia. Generatiivisen tekoälyn käyttö on rajoittunut kielenhuollollisiin ja teknisiin tukitehtäviin, eikä se ole vaikuttanut työn tieteelliseen sisältöön tai tutkimukselliseen argumentaatioon.

Lähteet

- Abubakar, A. S. (2024). Integrating life cycle cost analysis into pipeline asset integrity management. *Journal of Operations and Natural Resources*, 7(1).
<https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.51.1.10>
- Ahmed, F., Gkantou, M., Nikitas, G., Ferentinou, M., Bras, A., & Riley, M. (2025). A review of recent developments in structural elements of modular steel building systems. *Journal of Building Engineering*, 111, 113087.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113087>
- Bohnart, E. (2018). *Welding: Principles and Practices*. 5. Painos. McGraw-Hill Education.
- Bonnier, K. E., Kalsaas, B. T. & Ose, A. O. (2015). Waste in Design and Engineering. In Seppänen, O., González, V. A., & Arroyo, P. (Eds.), *23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 463–472
- Cabaleiro, M., Riveiro, B., Caamaño, J. C., Arias, P., & Martínez-Sánchez, J. (2021). Analysis of stiffness of clamped joints versus bolted joints in steel structures by means of accelerometers and shaking table tests. *Sensors*, 21(14), 4778.
<https://doi.org/10.3390/s21144778>
- Creswell J. W. & Plano Clark V. L. (2018). *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. 3. painos. SAGE Publications inc.
- Di Giacomo, L. & Stinson, J. R. (2000) *Piping Supports*. s. Teoksessa: Nayyar, M. L. (toim). *Piping Handbook, Seventh Edition*, B215–240. McGraw Hill.
- Du, J., Qiu, Y., & Li, J. (2025). Research on bolt loosening mechanism under sine-on-random coupling vibration excitation. *Machines*, 13(2), 80.
<https://doi.org/10.3390/machines13020080>
- Eberl Iron Works. (2022). *Sikla Framo (siFramo) vs Fabricated Steel Supports* [video]. YouTube. <https://youtu.be/wD1NvtSmUb4?si=3vSAAvs1yTA1B1wb>
- EcoVadis. (2025). *Understanding EcoVadis Medals and Badges*. Haettu 7.11.2025 osoitteesta <https://support.ecovadis.com/hc/en-us/articles/210460227-Understanding-EcoVadis-Medals-and-Badges>
- Elgeddawy, M. & Abouraia, M. (2024). Pragmatism as a Research Paradigm. *European Conference on Research Methodology for Business and Management Studies*, 23(1), 71–74. <https://doi.org/10.34190/ecrm.23.1.2444>

- Elsebaie, I. H., & Al-Khomairi, A. (2022). Optimization of pipeline lifecycle cost using alternatives with different life spans. *Water Supply*, 22(2).
<https://doi.org/10.2166/ws.2021.305>
- European Parliament and Council of the European Union. (2014). Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment (recast) Text with EEA relevance. *Official Journal of the European Union*. Haettu 10.11.2025 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0068>
- Foster, C. (2023). Methodological pragmatism in educational research: from qualitative-quantitative to exploratory-confirmatory distinctions. *International Journal of Research & Method in Education*. 47(1), 4–19.
<https://doi.org/10.1080/1743727X.2023.2210063>
- González-Varona, J. M., Poza, D., Acebes, F., Villafañez, F., & Pajares, J. (2022). Design for manufacturing and assembly (DFMA) applied to product design: A systematic literature review. *Designs*, 6(5), 88.
<https://doi.org/10.3390/designs6050088>
- Greene, J. C., Caracelli, V. J., & Graham, W. F. (1989). *Toward a conceptual framework for mixed-method evaluation designs*. *Educational Evaluation and Policy Analysis*. 11(3), 255–274. SAGE Publications inc.
- Hilti North America. (2014). *COMPARISON of Hilti modular support systems vs. traditional welding methods* [video].
<https://youtu.be/zUv9rg7itn0?si=slpE4Rj0hhrqCFcM>
- Hilti North America. (2021). *Hilti MT modular support systems compared to traditional welding methods* [video]. Youtube.
<https://youtu.be/gZCtYUcmZck?si=2BbxdWZvxgWx0Afl>
- Hilti. (2023). Breakthrough coating technology – Zinc Magnesium (ZM). Haettu 11.11.2025 osoitteesta
<https://www.hilti.com/hk/engineering/article/breakthrough-coating-technology-zinc-magnesium-zm/gvp1xe>
- Hilti. (n.d.-a). *Our history*. Haettu 20.1.2026 osoitteesta
<https://www.hilti.group/content/hilti/CP/XX/en/company/corporate-information/company-profile/our-history.html>

- Hilti. (n.d.-b). *MT-kiskojärjestelmä*. Haettu 20.1.2026 osoitteesta <https://www.hilti.fi/content/hilti/E1/Fl/fi/business/business/productivity/mt-installation-system.html>
- Hořínková, D. (2021). Advantages and disadvantages of modular construction, including environmental impacts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/3/032002>
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. (1994). *Höyrykattilatekniikka*. Painatuskeskus Oy.
- Jick, T. D. (1979). Mixing qualitative and quantitative methods: Triangulation in action. *Administrative Science Quarterly*, 24(4), 602–611. <https://doi.org/10.2307/2392366>
- Jin, K., Jin, W., Liu, B., Wu, K., & Wang, Z. (2025). Cost calculation model for engineering structures based on a life cycle perspective. *Buildings*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/buildings15162923>
- Johnson, R. B., Onwuegbuzie, A. J. & Turner, L. A. (2007). Toward a Definition of Mixed Methods Research. *Journal of Mixed Methods Research*. 1(2), 112-133. SAGE Publications inc.
- Kalliokulju, V. (2024). *Piping supports in industrial projects: A comparison of modular steel and structural steel solutions* [diplomityö, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc Aalto-yliopiston julkaisuarkisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202501221628>
- Kim, H., Lee, J., Park, S., & Kim, J. (2024). Self-healing phenomenon at the cut edge of Zn–Al–Mg alloy coated steel in chloride environments. *Coatings*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/coatings14040485>
- Ko, C. & Chung, N. (2014). Making Design Process Lean . In Kalsaas, B. T., Koskela, L., & Saurin, T. A. (Eds.), *22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 463–474
- Koo, T. K. & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*. (2016). 15. s. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- LA Bureau of Engineering. (2018). *Project Delivery Manual: 9.1 Introduction and Definitions*. Haettu 17.10.2025 osoitteesta <https://projectdeliverymanual.engineering.lacity.gov/chapter-9-qaqc-during-design/91-introduction-and-definitions>

- Love, P. E. D., Smith, J., Ackermann, F. & Irani, Z. (2019). *Making Sense of rework and its unintended consequence in projects: The emergence of uncomfortable knowledge* <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.02.004>
- Lund, T. (2012). Combining Qualitative and Quantitative Approaches: Some Arguments for Mixed Methods Research. *Scandinavian Journal of Educational Research*. 56(2). 155–165. <https://doi.org/10.1080/00313831.2011.568674>
- Luxembourg Institute for Building and Technology LUXIB. (2024a). *SIKLA SiFramo for PRS*. European Technical Assessment ETA-24/0471.
- Luxembourg Institute for Building and Technology LUXIB. (2024b). *SIKLA FLS F*. European Technical Assessment ETA-21/0936.
- Moultrie, J., & Maier, A. (2014). A simplified approach to design for assembly. *Journal of Engineering Design*, 25(1-3), 44–63. <https://doi.org/10.1080/09544828.2014.887059>
- Muhamad, N. H., & Mohammad, M. F. (2018). IMPACT OF DESIGN CHANGES IN CONSTRUCTION PROJECT. *Malaysian Journal of Sustainable Environment*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.24191/myse.v4i1.5603>
- Mujumdar, P. & Maheswari, U. J. (2017). Design iteration in construction projects – Review and directions. *Alexandria Engineering Journal* 57(1). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.004>
- Pere, A. (2016). *Koneenpiirustus 1 & 2*. 11. painos. Kirpe Oy.
- PSK Standardointiyhdistys ry. (2021). *PSK-käsikirja 8: Putkiston kannakointi*. 3. painos.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers for Power and Process*. Taylor & Francis Group.
- Sani, A. A., Abdul Wahab, M. M., Shafiq, N., Usman, N., Bustani, S. A., & Adebajo, A. U. (2025). A critical and bibliometric review of life cycle cost analysis integration into decision support systems for pipeline asset integrity management. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100307>
- Seppälä, E. (2020). *Hitsin Hyvä – Hitsaajan Käsikirja 6.1*. Impomet Oy.
- Sikla. (2017). *The Magazine – Anniversary Edition*. Haettu 6.11.2025 osoitteesta https://www.sikla.de/fast/600/43379_The_Magazine_2017_EN.pdf
- Sikla. (2021). *The Magazine*. s. 9. Haettu 7.11.2025 osoitteesta https://www.sikla.com/fast/600/The%20magazine_2021_EN.pdf

- Sikla. (2022). High Corrosion Protection – HCP. To meet high demands in corrosion protection. Haettu 7.11.2025 osoitteesta
https://www.sikla.com/fast/600/Flyer_HCP_englisch_web.pdf
- Sikla. (n.d.-a). *A Brief History of Sikla's Inventions*. Haettu 6.11.2025 osoitteesta
<https://www.sikla.com/mainpage-133824/company-133869/inventions-387945>
- Sikla. (n.d.-b). *Application examples*. Haettu 6.11.2025 osoitteesta
<https://www.sikla.com/mainpage-133824/products-133850/product-ranges-133832/technical-building-equipment-133866#anwendungsbeispiele>
- Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö SPEK. (n.d.). *Tulityö – perustietoa ja käsitteitä*. Haettu 30.10.2025 osoitteesta <https://www.spek.fi/koulutus/tulityotietoa/>
- SFS Suomen Standardit ry. (2021). *SFS-EN 13480-3:2021 Metalliset teollisuusputkistot. Osa 3: Suunnittelu ja laskenta*. SFS.
- SFS Suomen Standardit ry. (2019). *SFS-EN 10219-2:2019 Kylmämuovattut hitsatut teräksiset rakenneputket – Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet*. SFS.
- SFS Suomen Standardit ry. (2025). *SFS-EN ISO 8501-3:2025 Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Part 3: Preparation grades of welds, edges and other areas with surface imperfections*. SFS.
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (2015). *ATEX – Räjähdyksivaarallisten tilojen turvallisuus*. Haettu 11.11.2025 osoitteesta
<https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-opas.pdf/73c4dc8f-edbd-4c25-8ef9-6cfdef86717d/ATEX-opas.pdf?t=1743145340144>
- Valmet. (2025a). *Valmet yrityksenä*. Haettu 16.10.2025 osoitteesta
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/>
- Valmet. (2025b). *Energia*. Haettu 17.10.2025 osoitteesta
<https://www.valmet.com/fi/energia/>
- Valmet. (2025c). *Tutkimus, kehitys ja innovaatiot*. Haettu 16.10.2025 osoitteesta
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/yritys/tutkimus-ja-kehitys/>
- Valmet. (2025d). *Kestävä kehitys Valmetissa*. Haettu 7.11.2025 osoitteesta
<https://www.valmet.com/fi/kestava-kehitys/>
- Valmet. (2025e). *Valmet awarded with a Gold Medal in the EcoVadis sustainability assessment* [lehdistöjulkaisu]. Haettu 7.11.2025 osoitteesta

<https://www.valmet.com/media/news/press-releases/2025/valmet-awarded-with-a-gold-medal-in-the-ecovadis-sustainability-assessment/>

Zohourian, M., Pamidimukkala, A., Kermanshachi, S., & Almaskati, D. (2025).
Modular construction: A comprehensive review. *Buildings*, 15(12), 2020.
<https://doi.org/10.3390/buildings15122020>

Liitteet

Liite 1. Suunnitteluaiakoe, ohje

Liite 2. Suunnitteluaiakoe, tulokset, VOF-support

Liite 3. Suunnitteluaiakoe, tulokset, modulaariteräs

Liite 4. Validointilaskelma, ICC 3,k

Liite 5. Kannakesuunnittelukokeen kyselylomake

Liite 6. Kysely toimeksiantajan putkisto-osaston suunnittelijoille

Liite 1. Suunnitteluaiakoe, ohje

KANNAKESUUNNITTELUKOE, OHJE

Mittaus on osa diplomityöhön liittyvää tutkimusta, jossa tutkitaan AVEVA E3D (*myöhemmin E3D*) laitosuunnitteluohjelmiston tehokkuutta erilaisten kannakeratkaisuiden virtuaalitoteutuksessa kolmella eri työkalulla. Hitsattavat ratkaisut suunnitellaan E3D:n vof-support -työkalulla, jonka lisäksi mitataan yrityksen A ja B moduulikannakkeiden suunnitteluun tarkoitetut plugin-ratkaisut.

Mallinnuksen suorittaa toimeksiantajayrityksen palveluksessa toimiva insinööri, jolla on monivuotinen kokemus kannakkeiden ja tukien mallinnuksesta. Mahdollisten uusien työkalujen käyttöä edeltää kouluttajavetoinen perehdytys työkaluun sekä vapaamuotoinen harjoittelu, jotta mahdollinen kokemuspohjainen nopeusero työkalujen välillä saataisiin minimoitua. Uusien työkalujen toistoharjoitteista saatava data puolestaan kuvaa, kuinka nopeasti suunnittelija omaksuu työkalun käytön, ja kuinka se vaikuttaa suunnitteluvaiheiden läpimenoaikaan.

MITATTAVAT SUUNNITTELUAJAT

n ilmaisee kannakejärjestelmän järjestysnumeron putkilinjassa, $n = 1$ on ensimmäinen, $n = 4$ on viimeinen.

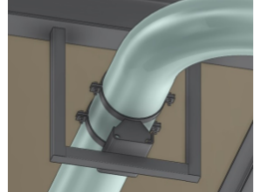
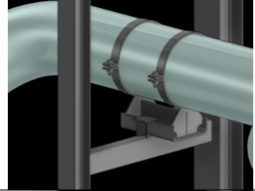
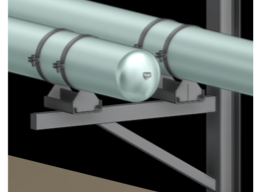
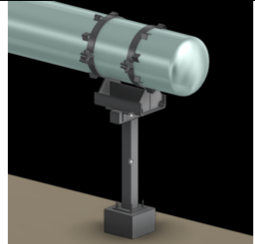
P_n	Primäärikannakkeen mallinnusaika
S_n	Sekundäärikannakkeen mallinnusaika
D_n	Piirustuksen laatimisaika

KOKEEN OHJEET:

- Kukin kannake on itsenäinen kokonaisuutensa, johon putken todellinen paino, prosessiarvot, edellisen kannakkeen tyyppi ja sijainti tai muut muuttujat eivät vaikuta.
- Kannakekokonaisuudesta toiseen ei saa kopioida elementtejä. Kannakkeen sisällä saa kopioida elementtejä, kuten päätylappuja
- Kunkin osuuden (P_n , S_n , D_n) välissä otetaan aika. Jokainen osuus on tarkastettava oikeaksi ennen seuraavaan siirtymistä.
- Kannakkeet tulee keskittää kiinnitettävään runkopalkkiin nähden
- Putkiprofiilien esille jäävät päädyt on tulpattava
- Mallinnusjärjestys S_n ja P_n on suunnittelijan harkinnan varainen. D_n on viimeinen.
- Piirustuksesta on käytävä ilmi:
 - Komponentit mittoineen
 - Putkilinja ja sijainti
 - Primäärin ja sekundäärin välinen suhde
 - Mahdollisten ohjeiden / kynsien välykset ja mitat

KANNAKEKOHTAISET SUUNNITTELUOHJEET:

Ohjearvot ja kuvat ovat rakenneteräksestä valmistettaville komponenteille. Modulaariteräksestä suunniteltaessa käytetään samoja ulkoisia mittoja ja mahdollisimman vastaavaa teräsprofiilia.

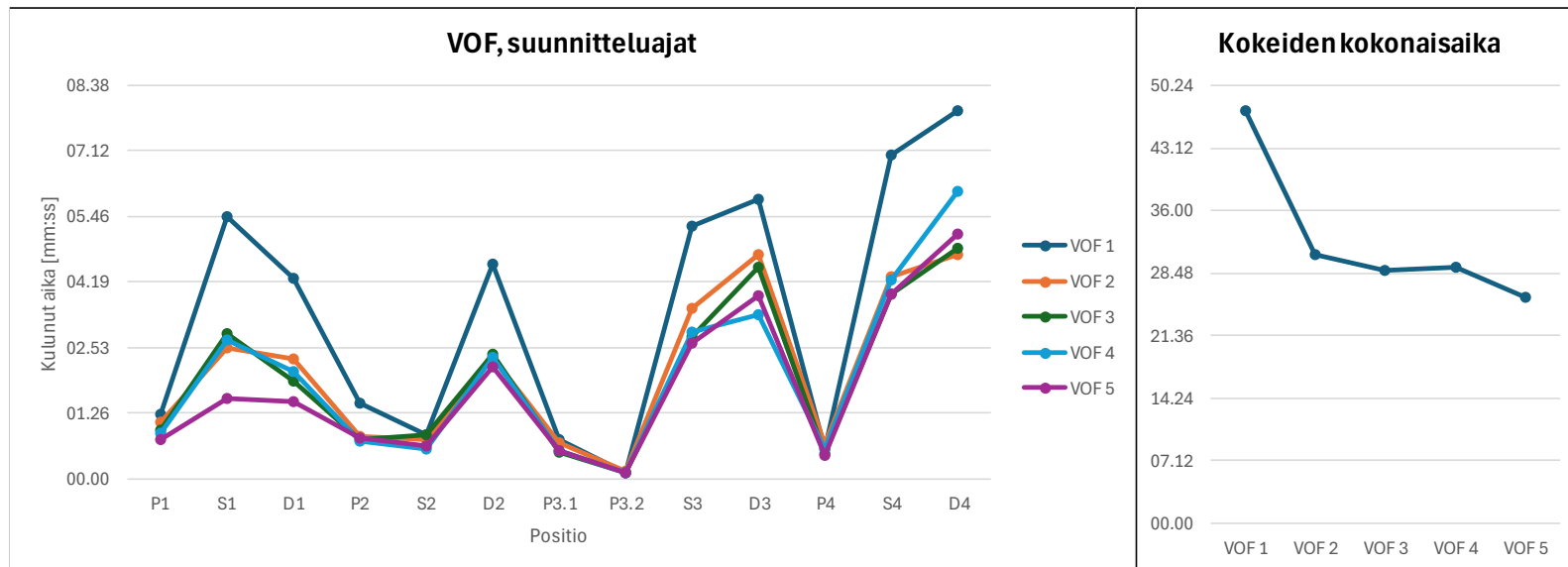
<p>KANNAKE 1</p> <p>Primäärikannake: Liukukannake Sekundäärikannake: Portti</p> <p>Mitat: SHS: 100x100 PL: 2x90x90 Portti: 1192 mm x 1200 mm</p>	
<p>KANNAKE 2</p> <p>Primäärikannake: Kynsihjattu Sekundäärikannake: Vaakapalkki</p> <p>Mitat: RHS: 100x150</p>	
<p>KANNAKE 3</p> <p>Primäärikannakkeet: Liukukannake Sekundäärikannake: Ulokekannake</p> <p>Mitat: Vaakapalk: RHS 100x150x2000 PL: 2x90x140 Reeva: SHS 100x100 30° keskipituus 1500 mm</p>	
<p>KANNAKE 4</p> <p>Primäärikannake: 1-puolinen aksiaali 3 mm E, 5 mm W.</p> <p>Sekundäärikannake: Jalka, betonikakku.</p> <p>Mitat: RHS (SHS) 100x100 Levy: 200x200x10 Betoni: 300x300x200</p>	

Liite 2. Suunnitteluaikakoe, tulokset, VOF-support

Kannakesuunnittelukoe		
Kokeen suorittaja:	-	K _n Kannake
Mittapöytäkirja:	A	P _n Primaari
Kannakejärjestelmä:	VOFSupport	S _n Sekundääri
		D _n Piirustus

Muistiinpanot / Huomiot	
-Zonet / Atribuutit ei esiasetettu ensimmäisen kokeen alussa. Ei vaikutusta suunnittelu aikaan.	

VOF1	1.12.2025	VOF2	2.12.2025	VOF3	2.2.2025	VOF4	3.12.2025	VOF5	3.12.2025	Minimi	Mediaani	Maksimi	Keskiarvo
	[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto				
P ₁	01:24	P ₁	01:14	P ₁	01:04	P ₁	00:59	P ₁	00:51	00:51	01:04	01:24	01:06
K ₁ S ₁	05:45	K ₁ S ₁	02:53	K ₁ S ₁	03:10	K ₁ S ₁	03:02	K ₁ S ₁	01:46	01:46	03:02	05:45	03:19
D ₁	04:24 11:33	D ₁	02:37 06:44	D ₁	02:08 06:22	D ₁	02:20 06:21	D ₁	01:42 04:19	01:42	02:20	04:24	02:38
P ₂	01:39	P ₂	00:55	P ₂	00:52	P ₂	00:50	P ₂	00:53	00:50	00:53	01:39	01:02
K ₂ S ₂	00:58	K ₂ S ₂	00:52	K ₂ S ₂	00:58	K ₂ S ₂	00:39	K ₂ S ₂	00:42	00:39	00:52	00:58	00:50
D ₂	04:43 07:20	D ₂	02:40 04:27	D ₂	02:44 04:34	D ₂	02:40 04:09	D ₂	02:28 04:03	02:28	02:40	04:43	03:03
P _{3.1}	00:52	P _{3.1}	00:48	P _{3.1}	00:35	P _{3.1}	00:37	P _{3.1}	00:37	00:35	00:37	00:52	00:42
P _{3.2}	00:07	P _{3.2}	00:09	P _{3.2}	00:08	P _{3.2}	00:08	P _{3.2}	00:07	00:07	00:08	00:09	00:08
K ₃ S ₃	05:32	K ₃ S ₃	03:44	K ₃ S ₃	03:06	K ₃ S ₃	03:13	K ₃ S ₃	02:58	02:58	03:13	05:32	03:43
D ₃	06:09 12:40	D ₃	04:55 09:36	D ₃	04:38 08:27	D ₃	03:37 07:35	D ₃	04:00 07:42	03:37	04:38	06:09	04:40
P ₄	00:39	P ₄	00:44	P ₄	00:32	P ₄	00:38	P ₄	00:31	00:31	00:38	00:44	00:37
K ₄ S ₄	07:07	K ₄ S ₄	04:25	K ₄ S ₄	04:04	K ₄ S ₄	04:21	K ₄ S ₄	04:03	04:03	04:21	07:07	04:48
D ₄	08:05 15:51	D ₄	04:55 10:04	D ₄	05:03 09:39	D ₄	06:19 11:18	D ₄	05:22 09:56	04:55	05:22	08:05	05:57
Kokonaisaika	47:24	Kokonaisaika	30:51	Kokonaisaika	29:02	Kokonaisaika	29:23	Kokonaisaika	26:00				

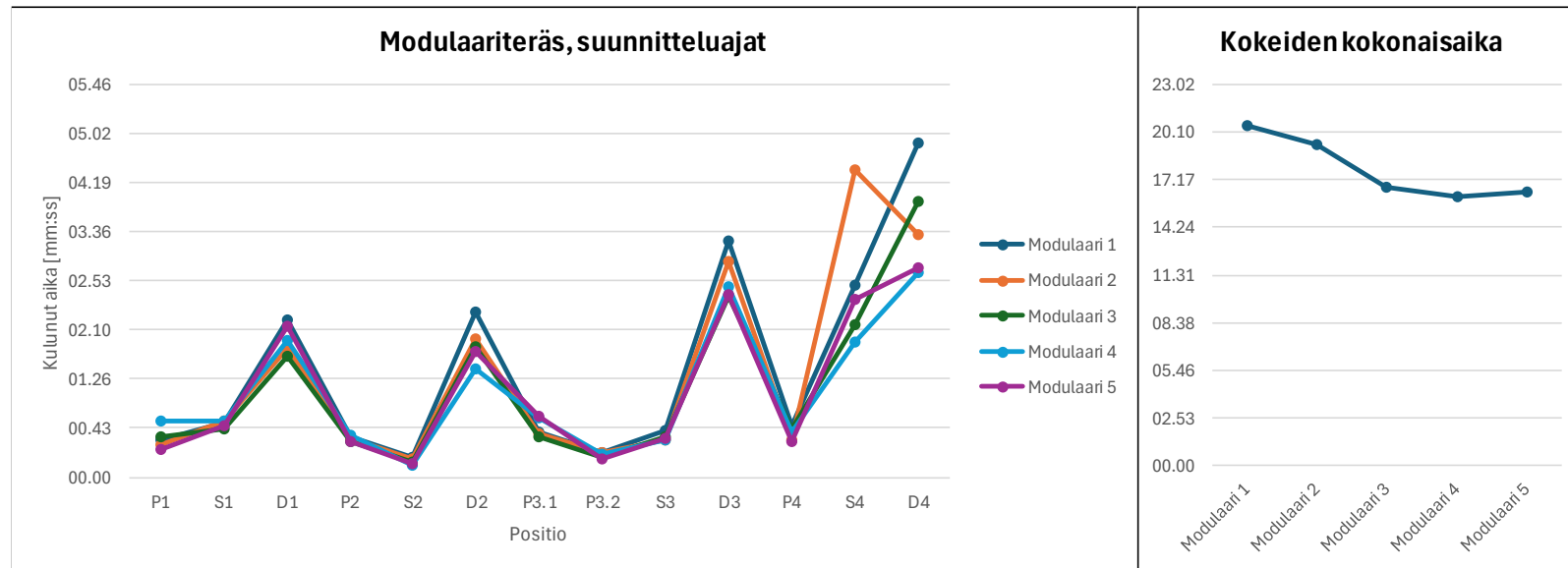


Liite 3. Suunnitteluaikakoe, tulokset, modulaariteräs

Kannakesuunnittelukoe		
Kokeen suorittaja:	-	K _n Kannake
Mittapöytäkirja:	B	P _n Primääri
Kannakejärjestelmä:	Modulaariteräs	S _n Sekundääri
		D _n Piirustus

Muistiinpanot / Huomiot	

Modulaari 1	10.12.2025	Modulaari 2	10.12.2025	Modulaari 3	2.2.2025	Modulaari 4	3.12.2025	Modulaari 5	3.12.2025	Minimi	Mediaani	Maksimi	Keskiarvo
	[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto		[mm:ss] kesto				
P ₁	00:33	P ₁	00:29	P ₁	00:35	P ₁	00:50	P ₁	00:25	00:25	00:33	00:50	00:34
K ₁ S ₁	00:48	K ₁ S ₁	00:50	K ₁ S ₁	00:42	K ₁ S ₁	00:50	K ₁ S ₁	00:45	00:42	00:48	00:50	00:47
D ₁	02:19 03:40	D ₁	01:54 03:13	D ₁	01:47 03:04	D ₁	02:01 03:41	D ₁	02:13 03:23	01:47	02:01	02:19	02:03
P ₂	00:35	P ₂	00:34	P ₂	00:32	P ₂	00:37	P ₂	00:32	00:32	00:34	00:37	00:34
K ₂ S ₂	00:17	K ₂ S ₂	00:16	K ₂ S ₂	00:14	K ₂ S ₂	00:11	K ₂ S ₂	00:12	00:11	00:14	00:17	00:14
D ₂	02:25 03:17	D ₂	02:02 02:52	D ₂	01:55 02:41	D ₂	01:36 02:24	D ₂	01:50 02:34	01:36	01:55	02:25	01:58
P _{3.1}	00:40	P _{3.1}	00:38	P _{3.1}	00:36	P _{3.1}	00:52	P _{3.1}	00:53	00:36	00:40	00:53	00:44
P _{3.2}	00:22	P _{3.2}	00:21	P _{3.2}	00:18	P _{3.2}	00:20	P _{3.2}	00:16	00:16	00:20	00:22	00:19
K ₃ S ₃	00:41	K ₃ S ₃	00:33	K ₃ S ₃	00:35	K ₃ S ₃	00:33	K ₃ S ₃	00:34	00:33	00:34	00:41	00:35
D ₃	03:28 05:11	D ₃	03:10 04:42	D ₃	02:39 04:08	D ₃	02:47 04:32	D ₃	02:40 04:23	02:39	02:47	03:28	02:57
P ₄	00:45	P ₄	00:33	P ₄	00:42	P ₄	00:40	P ₄	00:32	00:32	00:40	00:45	00:38
K ₄ S ₄	02:49	K ₄ S ₄	04:30	K ₄ S ₄	02:14	K ₄ S ₄	01:59	K ₄ S ₄	02:37	01:59	02:37	04:30	02:50
D ₄	04:54 08:28	D ₄	03:33 08:36	D ₄	04:02 06:58	D ₄	03:00 05:39	D ₄	03:04 06:13	03:00	03:33	04:54	03:43
Kokonaisaika	20:36	Kokonaisaika	19:23	Kokonaisaika	16:51	Kokonaisaika	16:16	Kokonaisaika	16:33	16:16	16:51	20:36	17:56



Liite 4. Validointilaskelma, ICC 3,k

		Aika [s]					Odotusarvo \hat{x}_{ij}					Virhe neliötynä $(e_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2$					SS_{error}	MS_E	Keskisarvo, rivin	Keskisarvo, matriisi	Poikkeama	SS_R	MS_R	ICC (3, k)	Luotettavuus				
VOF-SUPPORT	K_1	P_1	00:00	74	64	59	51	156,13	59,80	52,47	52,13	11,47	5203,22	201,64	133,02	47,15	1562,88	66,40		5605,02									
		S_1	345	173	190	182	106	288,93	192,60	185,27	184,93	144,27	3143,47	384,16	22,40	8,60	1464,34	199,20		3356,27									
		D_1	264	157	128	140	102	247,93	151,60	144,27	143,93	103,27	258,14	29,16	264,60	15,47	1,60	12739,87	1592,48	158,20	286,74	141,27	46240,13	23120,07	0,93	Erinomainen			
	K_2	P_2	99	55	52	50	53	110,27	52,60	54,93	46,60	44,60	126,94	5,76	8,60	11,56	70,56	61,80		1324,96									
		S_2	58	52	58	39	42	98,27	40,60	42,93	34,60	32,60	1621,40	129,96	227,00	19,36	88,36	49,80		2342,56									
		D_2	283	160	164	160	148	231,47	173,80	176,13	167,80	165,80	2655,68	190,44	147,22	60,84	316,84	183,00	98,20	7191,04	54292,80	27146,40	0,97	Erinomainen					
	K_3	$P_{3,1}$	52	48	35	37	37	93,80	47,80	30,55	17,55	19,30	1747,24	0,04	19,80	378,30	313,29	41,80		9254,44									
		$P_{3,2}$	7	9	8	8	7	59,80	13,80	-3,45	-16,45	-14,70	2787,84	23,04	131,10	597,80	470,89	7,80		16952,04									
		S_3	332	224	186	193	178	274,60	228,60	211,35	198,35	200,10	3294,76	21,16	642,62	28,62	488,41	222,60		7157,16									
	K_4	P_4	39	44	32	38	31	126,60	10,93	2,60	35,60	8,27	7673,76	1093,40	864,36	5,76	516,80	36,80		36252,16									
		S_4	427	265	244	261	243	377,80	262,13	253,80	286,80	259,47	2420,64	8,22	96,04	665,64	271,15	288,00		3696,64									
		D_4	485	295	303	379	322	446,60	330,93	322,60	355,60	328,27	1474,56	1291,20	384,16	547,56	39,27	17352,53	2169,07	356,80	16796,16	227,20	283724,80	141862,40	0,98	Erinomainen			
MODULAARITERÄS, PLUGIN	K_1	P_1	33	29	35	50	25	39,67	30,67	27,67	40,00	34,00	44,44	2,78	53,78	100,00	81,00	34,40		1133,44									
		S_1	48	50	42	50	45	52,27	43,27	40,27	52,60	46,60	18,20	45,34	3,00	6,76	2,56	47,00		443,80									
		D_1	139	114	107	121	133	128,07	119,07	116,07	128,40	122,40	119,54	25,67	82,20	54,76	112,36	752,40	94,05	122,80	68,07	22864,93	11432,47	0,99	Erinomainen				
	K_2	P_2	35	34	32	37	32	44,47	36,13	32,47	26,80	30,13	89,62	4,55	0,22	104,04	3,48	34,00		449,44									
		S_2	17	16	14	11	12	24,47	16,13	12,47	6,80	10,13	55,75	0,02	2,35	17,64	3,48	14,00		1697,44									
		D_2	145	122	115	96	110	128,07	119,73	116,07	110,40	113,73	286,74	5,14	1,14	207,36	13,94	795,47	99,43	117,60	55,20	3893,76	30203,20	15101,60	0,99	Erinomainen			
	K_3	$P_{3,1}$	40	38	36	52	53	52,75	45,50	37,00	43,00	40,75	162,56	56,25	1,00	81,00	150,06	43,80		625,00									
		$P_{3,2}$	22	21	18	20	16	28,35	21,10	12,60	18,60	16,35	40,32	0,01	29,16	1,96	0,12	19,40		2440,36									
		S_3	41	33	35	33	34	44,15	36,90	28,40	34,40	32,15	9,92	15,21	43,56	1,96	3,42	35,20		1128,96									
	K_4	P_4	208	190	159	167	160	185,75	178,50	170,00	176,00	173,75	495,06	132,25	121,00	81,00	189,06	1614,90	201,86	176,80	68,80	11664,00	79291,60	39645,80	0,99	Erinomainen			
		S_4	45	33	42	40	32	64,13	66,80	34,13	7,80	19,13	366,08	1142,44	61,88	1036,84	165,55	38,40		11067,04									
		D_4	169	270	134	119	157	195,53	198,20	165,53	139,20	150,53	704,02	5155,24	994,35	408,04	41,82	169,80		686,44									
		294	213	242	180	184	246,33	251,00	218,33	192,00	203,33	2085,44	1444,00	560,11	144,00	373,78	14683,60	1835,45	222,60	143,60	6241,00	89972,40	44986,20	0,96	Erinomainen				

Kaavat	
$MSE = \frac{SS_{error}}{df_{error}}$	$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{i.} + \bar{x}_{.j} - \bar{x} = \text{odotusarvo}$
$df_{error} = (r - 1)(c - 1)$	$\bar{x}_{i.} = \text{rivin keskiarvo}$
$df_{error} = (3 - 1)(5 - 1) = 2 \cdot 4 = 8$	$\bar{x}_{.j} = \text{sarakkeen keskiarvo}$
$SS_{error} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c e_{ij}^2$	$\bar{x} = \text{matriisin keskiarvo}$
$MSR = \frac{SS_R}{df_r}$	$x_{ij} = \text{mitattu arvo}$
$ICC(3, k) = \frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$	$df_r = \text{Rivien vapausaste} = r - 1 = 3 - 1 = 2$
	$r = 3$
	$c = 5$

Liite 5. Kannakesuunnittelukokeen kyselylomake

Kannakesuunnittelukoe, vertauskysely.

Vertauskohteina kaksi kokeessa käytettyä suunnittelutyökalua: vof-support sekä erään moduuliteräsiä toimittavan yrityksen lisäosa, joka on integroitu AVEVA E3D -laitossuunnitteluohjelmistoon. Kokeessa mallinnettiin ennalta määritettyyn putkiliinjan neljä kannaketta erillisen ohjeen mukaisesti. Kukin kannake oli oma itsenäinen osuutensa, johon edeltävä tai seuraava kannake ei vaikuttanut. Jokaisesta kannakekokonaisuudesta laadittiin myös piirustus oikealle laitosprojektille ominaiseen tapaan. Koe toistettiin molemmilla mallinnustyökaluilla viisi kertaa.

- Mikä osa mallinnusprosessista tuntui nopeimmalta tai helpoimmalta?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Mikä osa oli hitain tai vaikein, ja miksi?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Kuinka intuitiivisesti ohjelmisto ohjasi sinut seuraavaan työvaiheeseen?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Joutuiko etsimään toimintoja tai komponentteja? kuinka kauan ja miksi?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Tuntuiko työvaihe johdonmukaiselta vai hajanaiselta?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Missä vaiheessa syntyi eniten virheitä tai epävarmuutta?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Vaikuttko ohjelmisto virheiden ehkäisyyn (snap-to, automaattiset rajoitteet, varoitukset)?

vof-support	moduuliteräs-plugin

- Koitto, että mallin tarkkuus kärsi kiireessä tai toistojen aikana?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Tuntuiko tehtävä "kevyeltä" vai "kuormittavalta"? Miksi?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Joutuiko muistamaan monta asiaa samanaikaisesti?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Tuntuiko ohjelmiston logiikka selkeältä vai opettelua vaativalta?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Arvioi, miten tämä ohjelmisto soveltuu laajamittaiseen projektiin.

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Mitkä ovat ohjelmiston vahvimmat ja heikoimmat puolet putkistokannakkeiden suunnittelussa?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Mitä ohjelmiston toimintoja pidät olennaisina tehokkaan kannakesuunnittelun kannalta?

vof-support	moduuliteräs-plugin
- Mikä parannus / ominaisuus nopeuttasi työtäsi eniten?

vof-support	moduuliteräs-plugin

Liite 6. Kysely toimeksiantajan putkisto-osaston suunnittelijoille

Experiences and thoughts on Modular Support Solutions in

A Master's Thesis questionnaire for Valmet Piping Engineering team

Thank you for taking the time from your day to help me with my Thesis Research! All collected answers are anonymous and cannot be tracked to individual persons.

☺

* Required

1. Do you have any prior experience in Modular Secondary Support Solutions? (Sikka, Hilti, etc)

Experience in this case is defined as *"having worked with"* in any capacity. Either being involved in purchasing, designing, installing, supervising installation etc. *

- Yes
 No

2. What was the supplier (manufacturer of supports) and in what project were they used?

3. Need for improvement -observations

This is defined as challenges and negative aspects, such as costs, installation instructions and any other things that you would consider sub-optimal.

4. Positive observations

These are defined as all the good aspects in the used solution. From the modeling software to installation, costs, less need for rework or any other things that you would consider good and/or positive.

5. In your professional opinion, should Modular Support solutions be used in future projects?

If yes, what are your main concerns and focus points?

if no, why?

6. As you stated not having used them before, what preconceptions or thoughts do you have regarding modular secondary supports? (as opposed to "traditional" welded solutions)

These can be either positive, negative or simply *"I don't know if..."* -type answers. Any thought, idea, fear or notion is important data.

7. This questionnaire is fully anonymous with no other data being collected apart from the given answers. If you would like to discuss your thoughts on secondary support solutions with me, you can leave your name here, and I'll get back to you. Like previously stated, all ideas, thoughts and discussion are most welcome and appreciated!

If you want to have further discussion regarding this topic, please leave your name and preferred language of discussion below

This content is neither created nor endorsed by Microsoft. The data you submit will be sent to the form owner.

 Microsoft Forms