



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VOIMALAITOSKATTILOIDEN KEHYSKALKKIEN RAKENNELASKENTA JA KUORMIEN HALLINTA

TEKIJÄ: Ville Laitinen, ERR16SR

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Ville Laitinen			
Työn nimi Voimalaitoskattiloiden kehyspalkkien rakennelaskenta ja kuormien hallinta			
Päiväys	14.06.2020	Sivumäärä/Liitteet	50/0
Ohjaajat lehtori Harry Dunkel ja lehtori Ville Kuusela			
Toimeksiantaja Sumitomo SHI FW Energia Oy			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa kehyspalkkien rakennelaskentaa sekä kuormien hallintaa ohjeistava dokumentti, jota tilaaja pystyisi hyödyntämään tavoitteessaan yhteinäistä kehyspalkkien suunnittelua eri osajien välillä. Opinnäytetyössä tehty tutkimus- ja selvitystyö toimii pohjana tilaajalle myöhemmin tehtävälle manuaalille. Työn tarkoituksena oli kertoa, mitä kaikkea kehyspalkkien rakennelaskennassa ja kuormien hallinnassa otetaan huomioon sekä minkälaisia rakenneratkaisuja kehyspalkkien suunnittelussa käytetään. Työssä on tarkoituksena kuvata erilaisia kehyspalkkeja ja niiden käyttökohteita, kehyspalkkien suunnitteluprosessia, kehyspalkkien valmistusta ja niihin käytettäviä materiaaleja, kehyspalkkien stabiiliutta varmistavia menetelmiä sekä kehyspalkkilaskentamallin hyödyntämistä.</p> <p>Opinnäytetyössä perehdyttiin tilaajan sisäiseen aineistoon kehyspalkkeista, jota hyödynnettiin aiheen itseopiskeluun. Työhön sisältyi myös tilaajan järjestämiä koulutuksia kehyspalkkien mitoitukseen liittyvien ohjelmien käytöstä sekä viikottaisia palavereita, joissa tarkasteltiin tehtyä tutkimus- ja selvitystyötä. Työtä raportoitii itseopiskelun edetessä.</p> <p>Opinnäytetyön tulokseksi saadussa raportissa on kerrottu kehyspalkkien käytön tarkoitus CFB (Circulating Fluidized Bed)-voimalaitoskattiloissa, erilaisten kehyspalkkien toimintaperiaatteita sekä rakenteellisen vuorovaikutuksen vaikutusta kehyspalkkien suunnittelussa. Raportissa on myös tarkasteltu kehyspalkkien valmistukseen ja materiaalivalintaan liittyviä kysymyksiä, esitelty kehyspalkkien suunnitteluprosessia sekä lisäksi kerrottu kehyspalkkien suunnittelutietojen raportoinnista.</p>			
Avainsanat CFB, kehyspalkki, rakenteellinen vuorovaikutus, Staad-laskentaohjelma, stabiilius, voimapolku			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Building and Structural Engineering			
Author Ville Laitinen			
Title of Thesis Structural calculations and load control of buckstay system in power plant boilers			
Date	June 14, 2020	Pages/Appendices	50/0
Supervisors Mr Harry Dunkel, Senior Lecturer and Mr Ville Kuusela, Senior Lecturer			
Client Organisation Sumitomo SHI FW Energy Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final project was to create a document about structural calculations and load control of buckstay system in power plant boilers. The document could be used by the client organization in their attempt to harmonize buckstay designing between various experts. The research work made in the final project will serve as for the manual which will be made for the client in the future. Different types, design process, manufacturing, materials and stabilizing methods of buckstays are to be described in the report.</p> <p>The research work for the final project was started by studying the existing literature about buckstays. The research work also included trainings arranged by the client for using the programs to calculate and design buckstays.</p> <p>As the result of the final project there was a report which presents the purpose of buckstays in CFB (Cirulating Fluidized Bed)-boilers, the operational principles of different types of buckstays and the affect of structural interaction on buckstay designing. The report also presents the design process of buckstays, a way of reporting buckstay DData (Design Data) and reasoning about buckstay manufacturing and material selection.</p>			
<p>Keywords buckstay, CFB, force path, Staad-calculation program, stability, structural interaction</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää Sumitomo SHI FW Energia Oy:tä tämän opinnäytetyön tekemisen mahdollistamisesta sekä mahdollisuudesta päästä näkemään, millaista on työskennellä globaalissa työyhteisössä. Erityiskiitokset haluan osoittaa tilaajapuolen edustaja Heikki Holopaiselle opinnäytetyön aiheen tarjoamisesta sekä suuresta tuesta, hyvistä neuvoista ja aihepiiriin perehdyttämisestä, jotka edesauttoivat työn valmistumista. Haluan kiittää myös aina tarvittaessa apuna olleita kollegoitani hyvistä neuvoista ja tuesta.

Leppävirralla 14.06.2020

Ville Laitinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Toimeksiantaja	6
1.2	Lyhenteet ja määritelmät.....	7
2	VOIMALAITOS.....	8
2.1	Laitteiden seinärakenteet	8
2.2	Laitteisiin kohdistuvat kuormat	10
3	KATTILAN KANNATUSJÄRJESTELMÄ	11
3.1	Rakenteellinen vuorovaikutus	12
3.2	Tuulen vaikutus	15
3.3	Rakenteellisen vuorovaikutuksen huomioon ottaminen	17
4	KEHYSPALKKI	19
4.1	Erlaisia kehyspalkkeja.....	21
4.2	Kehyspalkin tyyppi	23
4.3	Kehyspalkkien päätyliitokset	26
4.4	Kehyspalkin eristäminen	30
4.5	Tasapainottomattoman painekuorman hallinta	31
5	KEHYSPALKKIEN SUUNNITTELUPROSESSI.....	32
5.1	Kehyspalkkien suunnittelu	33
5.2	Kehyspalkkien materiaali	35
5.3	Rakenneteräs ja painelaiteteräs	36
5.4	Kehyspalkkien valmistustapa	37
6	STABIILIUUS.....	39
6.1	Kehyspalkkien stabiiliuden varmistaminen	40
7	KEHYSPALKKILASKENTAMALLI	44
7.1	Layout-piirustuksen korvaaminen.....	44
7.2	Liitosvoimien käsittely	46
8	TULOKSET JA POHDINTA.....	48
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	49

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön taustana toimii tilaajan tavoite yhtenäistää kehyspalkkien suunnittelua eri osajien välillä. Opinnäytetyötä pohjustaa lisäksi tarve kehyspalkkien suunnittelun manuaalin tekemiselle, johon hyödynnetään opinnäytetyössä tehtävää tutkimus- ja selvitystyötä. Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa kehyspalkkien rakennelaskentaa sekä kuormien hallintaa ohjeistava dokumentti sekä esittää kehyspalkkien rakennelaskennassa ja kuormien hallinnassa huomioitavia seikkoja. Työn on tarkoitus pohjustaa tilaajalle tehtävään manuaaliin tulevaa sisältöä.

Opinnäytetyössä esitetään CFB-kattilalaitteita, laitteiden seinärakenteita sekä kerrotaan korkeiden laitteiden ja teräsrakenteen välisestä rakenteellisesta vuorovaikutuksesta. Työssä esitetään laitteiden seinärakenteiden jäykistämistä kehyspalkeilla sekä käydään läpi erilaisia kehyspalkkeja ja niiden käyttötapoja. Opinnäytetyössä käsitellään kehyspalkkien suunnitteluprosessia, kehyspalkkien valmistusta ja materiaalivalintaa, kehyspalkkien stabiiliutta sekä kehyspalkeista tehtävän laskentamallin merkitystä ja suunnittelutietojen käsittelyä.

Aiheeseen tutustuminen aloitetaan tilaajan järjestämällä koulutuksilla, joissa perehdytään kehyspalkkeihin sekä kehyspalkkien suunnittelussa käytettäviin työkaluihin. Työn tekemiseen ja itseopiskeluun hyödynnetään tilaajan sisäistä aineistoa. Työn etenemistä tarkastellaan tilaajan kanssa viikottaisissa palavereissa.

1.1 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantaja Sumitomo SHI FW Energia Oy (jäljempänä SFW) on energia-alan teknologian ja tuotekehityksen edelläkävijä. SFW tarjoaa kattila- ja savukaasunpuhdistuslaitosten suunnittelun, toimituksen ja asennuksen sekä laitosten kunnossapitosopimuksen projektitoimituksiinsa. Yrityksen ydinosaamista on leijukerrosteknologia sekä erityisesti CFB eli kiertopetikattilat. Yrityksen tuotteisiin kuuluu myös BFB eli kuplapetikattilat, CFB- ja BFB-kaasuttimet, savukaasujen puhdistuslaitteistot sekä WHB metallurgian jätelämpökattilat. SFW työllistää Suomessa lähes 500 työntekijää. Vaikka Suomen pääkonttori sijaitsee Espoossa, suurin osa työntekijöistä työskentelee Varkaudessa suunnittelun, huollon ja projektitoimitusten parissa. SFW on osa maailmanlaajuista Sumitomo Heavy Industries Ltd.-yhtiötä, joka työllistää yli 30 maassa noin 21 000 työntekijää. (Company Factsheet 2019, Sumitomo SHI FW).

1.2 Lyhenteet ja määritelmät

BFB = Bubbling Fluidized Bed

CFB = Circulating Fluidized Bed

Code Check = Käytettävän standardin mukainen tarkistus osille laskentamallissa

DData = Design Data

DSM = Design Standard Manual

Evä = putkipaneelin putkia yhdistävä levyosa

Guiding unit = teräsrakenteesta ohjattava vaakasuuntainen massa

Hanging unit = kannatusyksikkö, kannatustangoilla kannatettava laite

Interaction Model = teräsrakenteen laskentamalli, yhteisvaikutusmalli

Putkipaneeli = kattilalaitteen seinärakenne

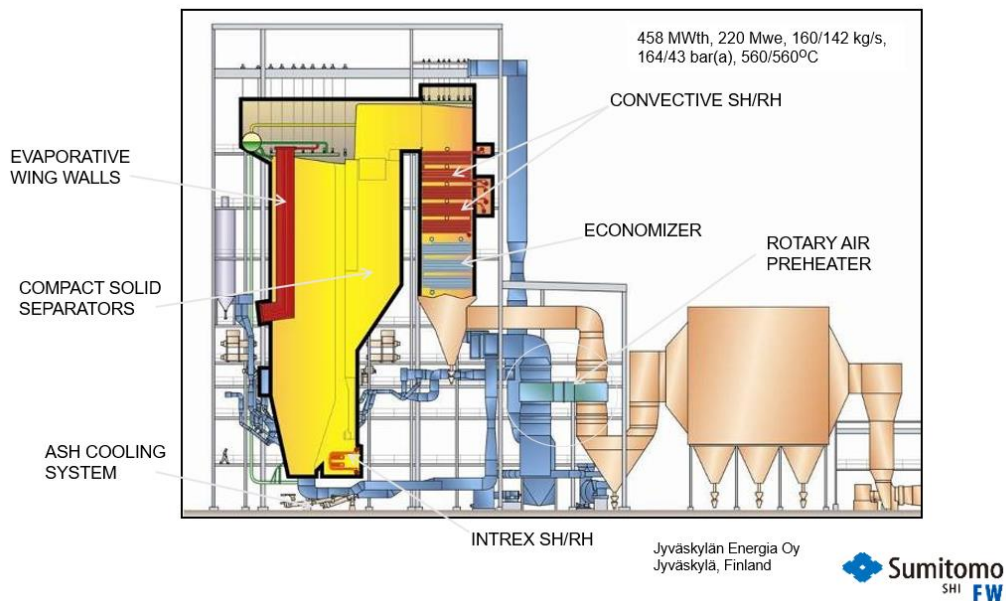
Voimapolku = reitti, jonka kautta voimat kulkevat rakenteessa

WHB = Waste Heat Boiler

2 VOIMALAITOS

Voimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa energiaa erilaisiin teollisuuden ja yhteiskunnan tarpeisiin. Energiantuottolaitokset jaetaan sähköä tuottaviin voimaloihin, lämpöenergiaa tuottaviin voimaloihin tai yhtäaikaaisesti molempia tuottaviin voimaloihin. Polttoprosessikattiloissa energian tuottaminen perustuu polttoaineen polttamiseen. Voimalaitoksen polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi jätteitä, biomassaa, hiiltä tai puuta.

Kattilalaitos tukeutuu teräsrakenteeseen. Voimalaitosrakennuksen tarkoituksena on toimia kantavana rakenteena kattilalaitteille sekä mahdollistaa niiden asennus- ja huoltotyöt. Circulating Fluidized Bed -kattilaa eli CFB-kattilaa käytetään opinnäytetyössä esimerkkinä polttoprosessiin perustuvasta voimalaitoskattilasta. Kuvassa 1 esitetään tyyppillistä CFB-kattilan poikkileikkausta sekä teräsrakenteen poikkileikkausta.



KUVA 1. Esimerkki CFB-kattilasta (Nevalainen 2018-10-03)

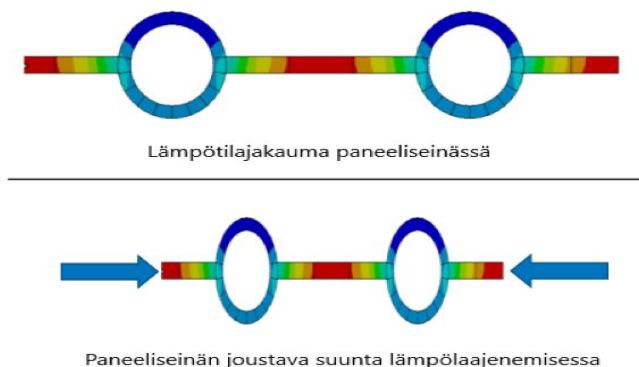
Voimalaitoskattila koostuu useista laitteista sekä kanavista ja putkistoista. Kattilan komponentteja ovat muunmuassa tulipesä, ilman esilämmitin, syöttöveden esilämmitin, höyrystimet ja tulistimet. CFB-kattilan erityispiirteisiin lukeutuvat erotin, palautinjalka, kääntökanava sekä Intrex-tulistin. (SFW CFB Boiler Technology 2018).

2.1 Laitteiden seinärakenteet

Laitteiden seinärakenteet tehdään putkipaneeleina, jossa vierekkäisiä putkia yhdistää levyosa, evä. Tätä putkipaneelia käsitellään levymäisenä rakenteena. Evän materiaalin ja paksuuden valinta perustuu lämpötila-analyysiin. Evät ovat tärkeitä kuormaa välittäviä osia putkipaneelissa ja niiden merkitys leikkausvoimaa välittävänä osina on hyvin tärkeää. Evä voidaan hyödyntää myös kattilaa kannattavina komponentteina, mutta niiden vaikutus ei ole tässä tarkoituksessa läheskään yhtä merkittävä

kuin putkien. Putkipaneelin tarkoituksena on kantaa kattilan paino, joten putkipaneelin ripustuskapasiteetti on kriittinen tekijä varsinkin isoissa kattiloissa. Kuten levyosat yleensä, myös evä on luja molemmissa paneelin tason suunnissa. Evän lujuutta voidaan hyödyntää aksiaalisuuntaisten voimien välittämiseen. Seinärakenne on jäykkä ja luja sen tasossa vaikuttavalle leikkausvoimalle. Putkipaneeli on joustava kohtisuoraan tasoa kohti vaikuttaville voimille, joten kattilan seiä jäykistetään tässä suunnassa kehyspalkeilla. (Seismic Training of Boiler Structures 2012).

Jäykisteen kiinnityksen suunnittelussa otetaan huomioon muun muassa putkipaneelin lämpölaajeneminen. Standardin *EN 12952-3* liitteen D taulukossa D.2 on esitetty ferriittisen teräksen lineaarisen lämpölaajenemisen kertoimet, joita hyödynnetään lämpölaajenemisen määrän arviointiin. Putkipaneeli lämpölaajenee kaikissa suunnissa. Kattilan ollessa käytössä savukaasu muodostuu kulkeutumaalla kattilalaitoksen läpi ensin ilmaa tulipesään, josta ilma polttoprosessin jälkeen kulkeutuu savukaasuna kattilalaitteiden läpi piipulle. Savukaasun kulkeutumisesta aiheutunut lämpörasitus kohdistuu putkiin ja eviin lämmittäen samalla putkissa kuljetettavaa vettä tai höyryä. Savukaasupinnan lämmönsiirtokerroin on hyvin paljon pienempi kuin vesi- tai höyrypinnan lämmönsiirtokerroin, mikä vuoksi paneelirakenteen lämpötila asettuu normaaliajossa lähelle veden tai höyryn lämpötilaa. Savukaasupinnan puolella putkien seinämät ovat muutaman kymmenen astetta veden tai höyryn lämpötilaa korkeammalla. Evän lämpötila riippuu voimakkaasti evän leveydestä, mikä vuoksi suunnittelussa suositaan kapeita eviä. Yleensä evän keskipisteen lämpötila rajataan evän leveyttä rajoittamalla enintään noin 83°C veden tai höyryn lämpötilaa korkeammaksi. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 2 nähdään putkipaneelin poikkileikkauksen lämpötilajakauma sekä putkipaneelin joustava suunta lämpölaajenemisessa.



KUVA 2. Putkipaneelin poikkileikkaus (Aali 2016-03-01)

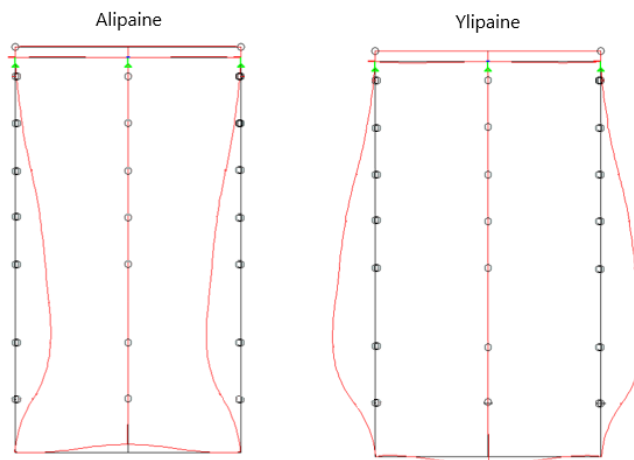
Kehyspalkki kiinnitetään putkipaneeliin yleensä vain yhdestä kohdasta. Kehyspalkin aksiaalisuunnan sitominen voidaan tarvittaessa tehdä useammasta kohtaa, kun seinäputket ovat kehyspalkkiin verrattuna poikittaisessa suunnassa. Tämä on mahdollista, koska seinäputki on melko joustava tilanteessa, jossa kuumen kehyspalkin ja paneelin lämpölaajeneminen tapahtuu eri tahtiin. Seinäputki joustaa soikeaan muotoon, kuten kuvassa 2. Kehyspalkin poikittainen sidonta tehdään kynsillä, jotka sallivat kehyspalkin aksiaalisuuntaisen liikkeen. Putkipaneeliin käytettävien putkien ja evien koot sekä materiaalipaksuudet valitaan prosessiteknisin perustein ja putken aksiaalisen kestävyuden riittävyys varmistetaan lujuusteknisillä perusteilla prosessiteknisten valintojen jälkeen. Valinnassa otetaan huomioon putken seinämän kestävyys sen sisäiselle paineelle sekä evän leveyden asettamat

rajoitukset. Putkien aksiaalista kuormaa lisää sisäisen paineen lisäksi myös kattilan massa. Aksiaalista kuormaa voi aiheutua myös tuulesta ja maanjäristyksistä, mutta näitä kuormituksia ei yleensä tarvitse ottaa huomioon yläpuolelta kannatetussa kattilassa. (Buckstay System Lay-Out 2016).

2.2 Laitteisiin kohdistuvat kuormat

Kattilalaitteisiin kohdistuu käytön aikana lämpörasituksen lisäksi myös muita sisäisiä ja ulkoisia kuormia. Sisäisiä kuormia aiheuttavat savukaasun paine, Bulk Solid -massat sekä laitteiden omapainot. Ulkoisia kuormia aiheuttavat suora tuulenpaine, epäsuora tuulenpaine, maanjäristyskuormat sekä lumikuormat. Kattilan käytön aikana tulipesässä poltetaan polttoainetta, joka synnyttää savukaasua. Savukaasun paine aiheuttaa laitteisiin yli- tai alipainetta, mikä aiheuttaa putkipaneelille paineen suunnan mukaisia rasituksia. Bulk Solid -massat koostuvat tuhkasta sekä hiekasta, jotka kulkevat kattilassa ajon aikana. (Buckstay and Return Leg Staad Modeling 2019). Massat voivat kerrostua epänormaaleissa tilanteissa, kuten paluujalan tukkeutuessa tai tuhkasuppilon tuhkanpoiston häiriintyessä. Kerrostumia voi syntyä kattilan alaosien seinärakenteille sekä vaakasuuntaisten pohjien päälle erityisesti savukaasun nopeuden ollessa hidastunut, sillä hitaasti kulkeva savukaasu ei pysty viemään kaikkea pohjalle pyrkivää massaa mennessään. Savukaasun nopeus alenee silloin, kun kattilan tehoa alennetaan. Esimerkiksi kesäaikaan, kun energiantarve pienentyy kattilaa saatetaan ajaa jopa kuukausia alennetulla teholla. Bulk Solid -massojen kerrostumisesta seuraa putkipaneeliin kohdistuneita paineita. Savukaasun paine aiheuttaa tasapainottomattomia painekuormia paljetasaimien kohdalla. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Bulk Solid -massojen aiheuttamien paineiden jakaumia arvioidaan siiloille tarkoitetuilla menetelmillä standardia *EN 1991-4* soveltaen.

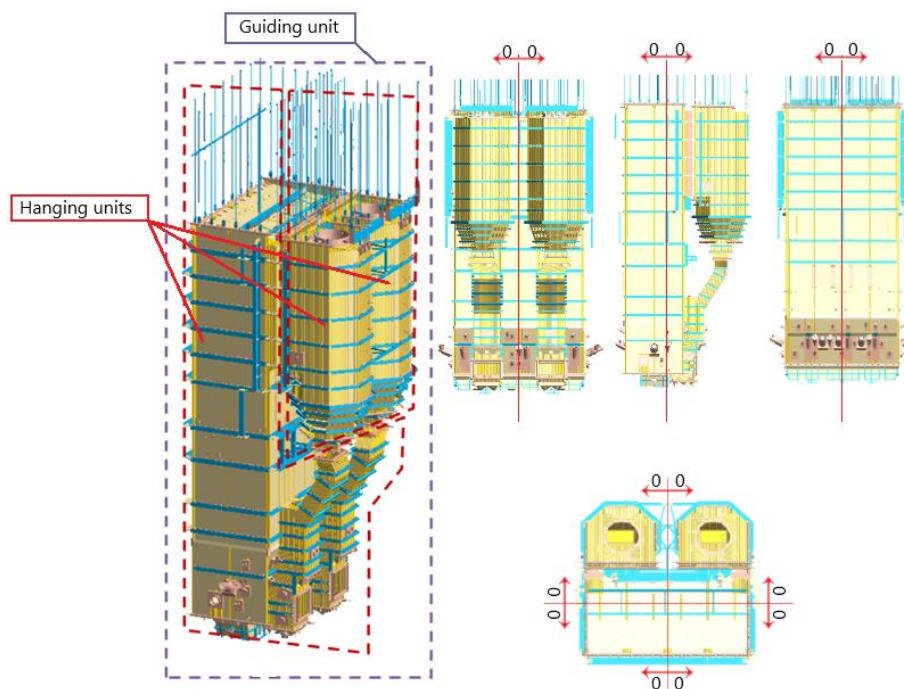
Suora tuulenpaine käyttäytyy kuormana samankaltaisesti kuin savukaasun paine. Mikäli kyseessä on kattilarakennus, jolla ei ole ulkoseiniä, pääsee tuuli kohdistumaan suoraan kattilan seiiniin aiheuttaen siihen painekuormaa. Putkipaneelia ei mitoiteta kestävänsä paineen tai ulkoisten kuormitusten aiheuttamia rasituksia itsenäisesti. Kuvassa 3 esitetään putkipaneelin käyttäytymistä, kun siihen kohdistuu erilaisia painekuormia.



KUVA 3. Putkipaneelin muodonmuutokset

3 KATTILAN KANNATUSJÄRJESTELMÄ

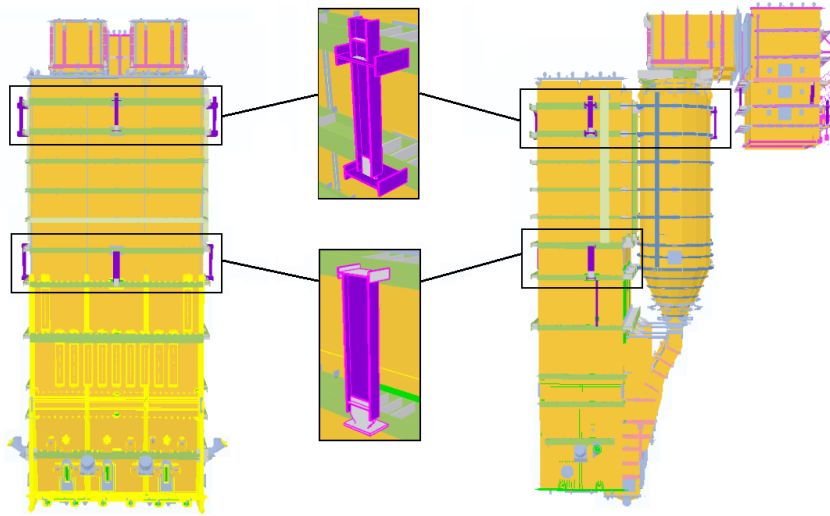
Kattilalaitteisto voi olla tuettu alapuolelta, yläpuolelta tai keskeltä. Yleensä kattila kannatetaan yläpuolelta käyttäen kannatustankoja, jotka kantavat pystysuuntaiset kuormat laitteistolta. Usein kattilan massaa kantavan putken ja kannatustangon välissä on kammio, johon kannatustangot kiinnitetään. Mikäli kammiota ei ole, yleensä kannatustangot kiinnitetään paneelitaipeseen sijoitettuun kannatuskorvakkeeseen. Laitteet, jotka kannatetaan käyttäen kannatustankoja jaetaan kannatusyksiköihin, eli hanging unit -yksiköihin. Yksi hanging unit sisältää kaikki pystysuuntaiset kuormat, jotka kohdistuvat kannatustangoille kyseiseltä laitteelta. Kuvan 4 esimerkissä on kolme eri hanging unitia: tulipesä, joka sisältää palautinjalat ja Intrex-kammiot sekä vasemmanpuoleinen erotin ja oikeanpuoleinen erotin. Nämä kolme hanging unitia muodostavat yhden kattilan ohjausyksikön, guiding unitin. Guiding unit sisältää kaikki vaakasuuntaiset massat, joita ohjataan teräsrakenteesta. (Integrated Guide System of Furnace and Separator 2015)



KUVA 4. Hanging ja guiding-yksiköt sekä lämpölaajenemisen nollalinjat (Aali 2015-07-15)

Kannatustangot mahdollistavat kattilalle suhteellisen vapaan lämpölaajenemisen. Kattilan vaakasuuntaista liikettä säädetään kehyspalkkijärjestelmään integroidulla ohjurijärjestelmällä. Kattilaohjurit toimivat osana kehyspalkkijärjestelmää ja niiden tarkoituksena on säätää kattilan lämpölaajenemisesta aiheutuvaa liikettä, estää kattilan ja teräsrakenteen yhteentörmäystä, siirtää vaakasuuntaisia voimia perustukselle sekä toimia uhrattavana osana suojatessa muita komponentteja vahingoilta maanjäristyksen sattuessa. Kuvassa 4 esitetään kannatusyksiköiden lisäksi lämpölaajenemisen nollalinjat. Kattilaohjurit sijoitetaan yleensä kattilalaitteen lämpölaajenemisen nollalinjoille, silloin kun se on mahdollista. Kylmien kehyspalkkien tapauksessa ohjurit voidaan sijoittaa vapaasti valittuun kohtaan. Teräsrakenne vastaanottaa ohjureilta tulevat kuormat siihen sijoitettujen ohjurihaarukoiden välityksellä. Kattilaohjureiden kautta kattilan ja teräsrakenteen välille syntyy voimapolkuja.

(Intergrated Guide System of Furnace and Separator 2015). Kuvassa 5 on esitetty kattila, jota ohjataan käyttäen kolmitasoista ohjurijärjestelmää. Kuvassa näkyy kaksi tasoa ja nämä tasot kuuluvat kehyspalkkijärjestelmään.

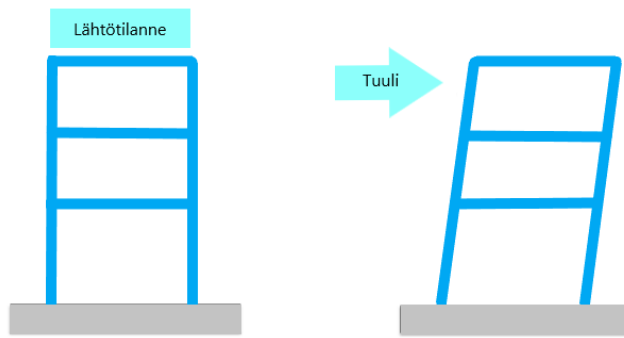


KUVA 5. Kattilaohjurit

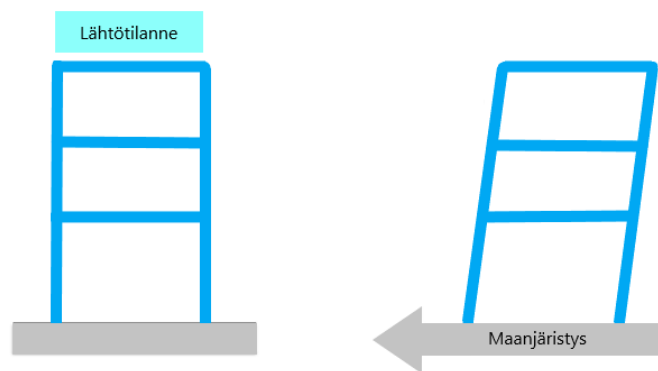
Kattilaohjuri sijoitetaan yleensä kahden kehyspalkkitason väliin ja ohjurin kohdalle teräsrakenteeseen sijoitetaan ohjurihaarukka. Ohjurihaarukka sijoitetaan teräsrakenteeseen jäykistettyyn tasoon. Kattilaohjureista pyritään suunnittelemaan samanlaiset kaikille tasoille, mutta teräsrakenteeseen sijoitettavaa ohjurihaarukkaa ei välttämättä saada halutulle korkeudelle. Tällöin ohjuria jatketaan, kuten kuvan 5 yläpuolisille ohjureille on tehty. Myös kehyspalkkijako määrittää kattilaohjureiden pituuksia, jolloin ohjurit voivat olla eri mittaisia. (Intergrated Guide System of Furnace and Separator 2015).

3.1 Rakenteellinen vuorovaikutus

Rakenteellinen vuorovaikutus vaatii kolme asiaa: tukirakenteen, siihen tuettavan ja siitä ohjattavan korkean laitteen sekä kuormituksen. Voimalaitosrakennus koostuu teräsrakenteesta sekä siihen tuetusta kattilalaitteistosta. Ulkoiset voimat, kuten tuuli ja maanjäristykset, aiheuttavat teräsrakenteelle kuormituksia ja siirtymiä. Kun teräsrakenteeseen kohdistuu kuormia, se pyrkii muuttamaan muotoaan. Kuvissa 6 ja 7 havainnollistetaan tuulen sekä maanjäristyksen aiheuttamia muodonmuutoksia teräsrakenteeseen.

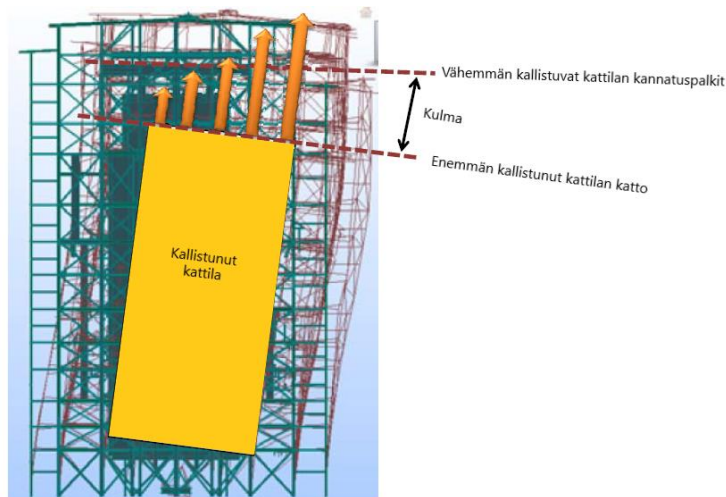


KUVA 6. Tuulen vaikutus teräsrakenteeseen (Holopainen 2012-12-31)



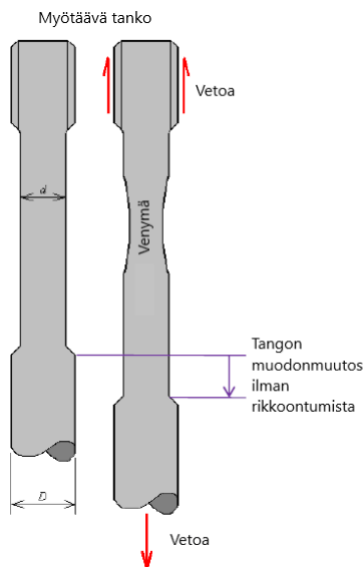
KUVA 7. Maanjäristyksen vaikutus teräsrakenteeseen (Holopainen 2012-12-31)

Teräsrakenteen muodonmuutoksista aiheutuvat voimat kulkeutuvat rakennetta pitkin ohjureille, jotka ohjaavat kuormitukset kehyspalkkijärjestelmälle. Teräsrakenteen siirtymät aiheuttavat kuormituksia myös kattilan kannatustankoihin ja sitä kautta kattilalle. Kun kattilarakennuksessa ei ole ulkopuolisia seiniä, tuuli pääsee vaikuttamaan suoraan kattilaan. Tämä aiheuttaa kattilalaitteen kallistumisen. Kattila kallistuu myös rakennuksen mukana silloin, kun kattilarakennuksessa on ulkoseinät. Kallistuessaan laite aiheuttaa teräsrakenteelle pystysuuntaisia voimia kannatustankojen välityksellä sekä vaakasuuntaisia voimia ohjureiden välityksellä. Kattilaa voidaan hyödyntää teräsrakenteen jäykistämiseen, koska kattila korkeana laitteena on erittäin jäykkä ja hyperstaattisesti tuettu. Kaikki kattilan osat lukuunottamatta yksittäisiä putkia ovat jäykkiä verrattuna niitä tukevaan teräsrakenteeseen. Maanjäristysvoimia voi esiintyä kaikissa suunnissa. Suurin ero maanjäristyssuunnittelulla tavanomaiseen rakennesuunnitteluun on vaakasuuntaisten kiihtyvyyksien huomioon ottaminen. Pystysuuntaiset kuormat eivät ole maanjäristyssuunnittelussa ongelma, ellei rakenne pysty muuttamaan vaakasuuntaisia kuormia pystysuuntaisiksi kuormiksi. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Vaakasuuntaiset kuormat voivat muuttua pystysuuntaisiksi kuormiksi, kun kattila tuetaan kannatusjärjestelmällä. Kuvassa 8 esitetään, miten vaakasuuntaiset kuormat muuttuvat pystysuuntaisiksi kuormiksi kattilan katon kallistuessa.



KUVA 8. Kattilan aiheuttama kuormitus (Holopainen 2013-05-29)

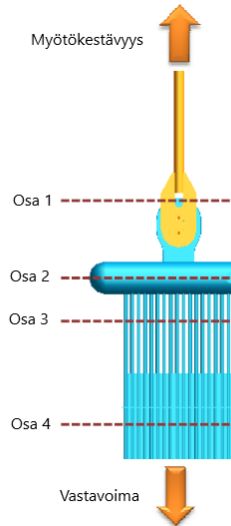
Vaakasuurteisista voimista aiheutuneet pystysuuntaiset kuormat kattilalle voidaan jättää huomiotta mikäli rakenteellinen stabiiliuden menetys ei ole mahdollista ja rakenne voi muuttua muotoaan plastisesti. Yläpuolelta kannatetun kattilan stabiiliuden menettäminen ei ole mahdollista. Kannatustangoista voidaan tehdä muodonmuutoskykyisiä käyttämällä pitkiä nettopoikkileikkauksia, jotka pysyvät muuttamaan muotoaan ilman rikkoontumista. Rakenne voi muuttua muotoaan plastisesti, mikäli kaikista komponenteista kunkin kannatustangon voimapolulla tehdään tangon myötövoiman kestäviä. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 9 esitetään plastisesti muodonmuutoskykyisen poikkileikkauksen myötääminen.



KUVA 9. Poikkileikkauksen myötö (Holopainen 2012-12-31)

Plastinen muodonmuutoskyky vaatii myös sen, että kattila on kestävämpi kuin kannatustangot. Tämnäkaltaista rakennetta voidaan kutsua nimellä "deformable structure in tension", eli muodonmuutoskykyinen vedolla kuormitettu rakenne. Kattilan ollessa tankoja kestävämpi rakenteen plastinen muodonmuutoskyky voidaan todentaa myötöjärjestysanalyysillä. Analyysissä tarkastetaan ensin ta-

saisesti myötävään osan myötökestävyys. Tämän jälkeen kaikista voimapolulla olevista osista tehdään myötävää osaa kestävämpiä. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 10 havainnollistetaan myötöjärjestysanalyysin periaate kannatustangon, kannatustangon liitoksen, kammion, putkien ja putkipaneelin avulla. Vastaava kestävyysperusteinen mitoittaminen tehdään myös jokaiselle tangon liitokselle kannatuspalkistoon.

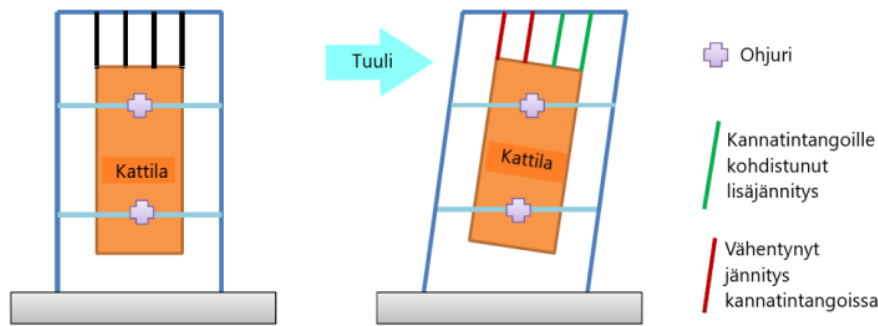


KUVA 10. Myötöjärjestysanalyysi (Holopainen 2012-12-31)

Vaakasuuntaisiksi muuttuneet pystykuormat otetaan huomioon kattilarakennuksen mitoittamisessa. Toistaiseksi ainoa tunnettu tapa kuormien huomioon ottamiseksi on mallintaa kannatustangot rakennuksen laskentamalliin riittävän luotettavuuden saavuttamiseksi. Laskentamalliin mallinnetaan lisäksi kattilan jäykkyys sekä ohjaus. Kattilaa ohjataan vähintään kahdelta tasolta. Suurissa kattiloissa kohdalaisen tai korkean seismisyyden alueilla voi tulipesällä olla useampi kuin kaksi ohjuritason. Useamman kuin kahden tason ohjaus johtaa rakenteellisen vuorovaikutuksen lisääntymiseen. Kattilan jäykkyyden mallintamisessa otetaan huomioon kattilan seinän leikkausjäykkyys. Putkiseinän leikkausvoimakapasiteetti sekä kattilaohjurien ja putkiseinän väliset liitokset ovat kriittisiä erityisesti maanjäristysmitoituksen kannalta. Nämä voivat olla kriittisiä mitoituskohteita myös pelkästään tuulen kuormituksen vuoksi. (Seismic Training of Boiler Structures 2012).

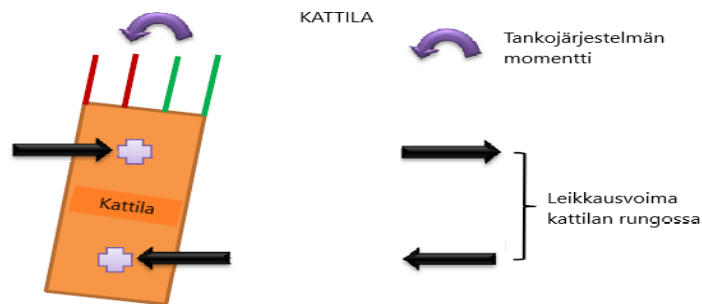
3.2 Tuulen vaikutus

Rakenteellisen vuorovaikutuksen kannalta tuuli vaikuttaa kuten maanjäristys. Esimerkkinä tuulen vaikutuksesta esitetään teräsrakenteesta kannatettua laitetta, joka on tuettu kannatustangoilla ja varustetaan kahden tason ohjurijärjestelmällä. Tuulen kuormittaessa teräsrakennetta, se pyrkii taipumaan tuulen suuntaan. Teräsrakenteen muodonmuutokset aiheuttavat pystysuuntaisia voimia kannatustankojärjestelmään, koska teräsrakenne pyrkii vetämään kattilaa mukanaan. Kannatustankoihin kohdistuu vetäviä ja puristavia voimia. Kattila pysyy jäykkyytensä ansiosta rakenteellisesti lähes muuttumattomana. Kattilaohjurit mahdollistavat kattilan pysymisen keskeisenä teräsrakenteeseen nähden, vaikka kattila kääntyisi rakenteen mukana. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 11 on esitetty kuinka kannatustankojen jännitykset jakautuvat kattilan kallistuessa teräsrakenteen mukana kahdelta tasolta ohjatussa systeemissä.



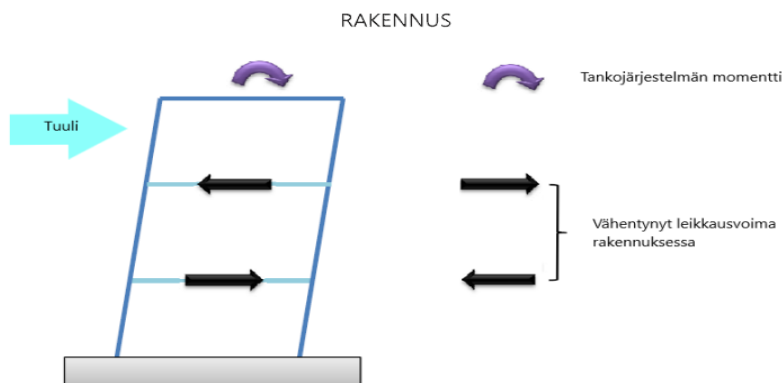
KUVA 11. Rakenteellinen vuorovaikutus (Holopainen 2013-05-29)

Erisuuruiset jännitykset kannatustangoissa synnyttävät tankojärjestelmälle momenttia. Ohjureiden estäessä kattilan liikkumista teräsrakenteen sisällä niihin kohdistuu leikkausvoimaa. Leikkausvoima kulkee ohjurijärjestelmän kautta kehyspalkeille, joiden välityksellä voima siirtyy kattilarungolle, kuten kuvassa 12 on esitetty.



KUVA 12. Rakenteellinen vuorovaikutus kattilassa (Holopainen 2013-05-29)

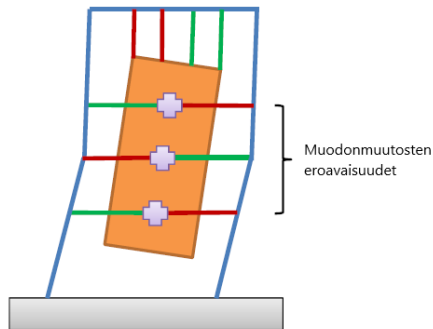
Leikkausvoimien vastaanottamiseen osallistuva kattilarungon osa sijaitsee ohjuritason välisellä alueella. Leikkausvoimat kulkevat osittain rakennuksen ja osittain kattilan kautta, jolloin voidaan puhua rinnakkaisista voimapoluista. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kattilasta teräsrakenteeseen kohdistuvat kuormat rakenteellisessa vuorovaikutuksessa on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Rakenteellinen vuorovaikutus teräsrakenteessa (Holopainen 2013-05-29)

Rinnakkaiset voimapolut lisäävät rakenteen redundanttisuutta. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden voimapolun myödetessä vaihtoehtoisilla voimapoluilla on jäljellä käyttämätöntä kapasiteettia voiman siirtä-

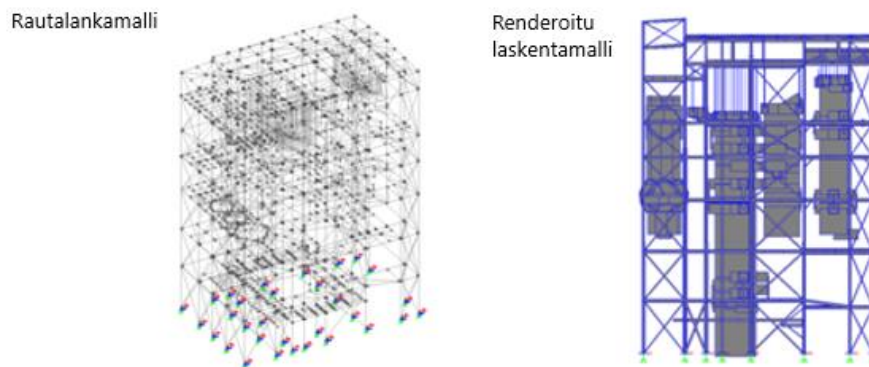
miseksi. Kattilan tulee olla riittävän kestävä siirtääkseen leikkausvoimia. Muodonmuutoskuviot kattilan ja rakennuksen välillä eroavat toisistaan. Ohjaukseen käytettävät kehyspalkit mallinnetaan rakennemalliin, koska niiden jäykkyydellä on vaikutus rakennejärjestelmän voimien jakaantumiseen. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 14 esitetään rakenteellisesta vuorovaikutuksesta syntyneiden muodonmuutoskuvioiden eroja monitasoisessa ohjurijärjestelmässä. Useammalta tasolta ohjattu kattila toimii siis mutkikkaammin rakenteellisessa vuorovaikutuksessa.



KUVA 14. Monitasoinen ohjurijärjestelmä (Holopainen 2012-12-31)

3.3 Rakenteellisen vuorovaikutuksen huomioon ottaminen

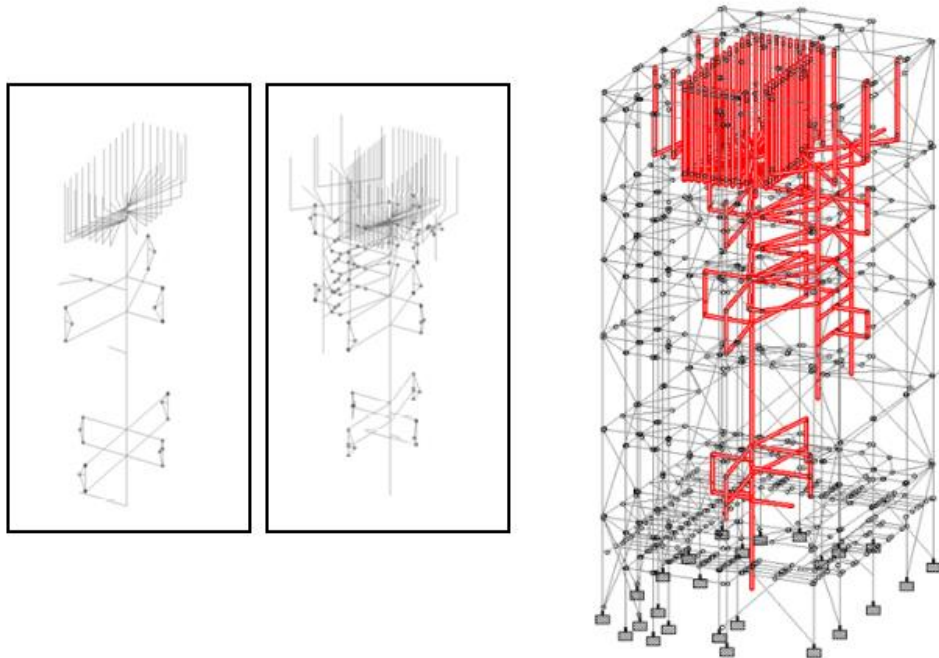
Rakenteellinen vuorovaikutus otetaan huomioon Interaction Model:ksi kutsutulla laskentamallilla. Tarkastelu tapahtuu Staad-laskentaohjelmalla. Yhteisvaikutusmalli sisältää teräsrakenteen laskentamallin, sekä siihen sisällytetyn kattilalaitteiston. Kattilalaitteistoa kuvaavat elementit näkyvät kuvassa 15 osana teräsrakenteen laskentamallia.



KUVA 15. Teräsrakenteen laskentamalli (Matilainen 2018-12-03)

Tämä yhteisvaikutusmalli toimii teräsrakenteen laskentamallina eikä teräsrakenteesta tehdä omaa laskentamallia ilman kattilalaitteistoa. Yhteisvaikutusmallista saadaan teräsrakenteen ja kattilan väliset vuorovaikutusvoimat. Rakenteelliseen vuorovaikutukseen osallistuva kattilan kehyspalkisto mitoitetaan omana osanaan erillisellä laskentamallilla hyödyntäen myös yhteisvaikutusmallista saatuja kuormatietoja. Yhteisvaikutuslaskentamalli kuvaa korkeiden laitteiden tuottamaa jäykkyyttä sekä massan jakautumista. Se myös auttaa määrittämään osiin kohdistuvat voimat sekä rakenteen siirtymät, mitkä aiheutuvat niihin kohdistetuista kuormista. Jotta vuorovaikutuksen määrää voidaan arvioida, mallinnetaan korkeat laitteet yhteisvaikutusmalliin. Mallin tulee sisältää niiden elementtien jäykkyyttä sekä lujuutta kuvaavat arvot, jotka toimivat merkittävänä voimien ja muodonmuutosten

välittäjinä. Näiden elementtien tulee myös esittää paikallista massanjakoa sekä jäykkyyttä koko rakenteen osalta. Kattilarakennuksessa on monia korkeita ja jäykkiä laitteita, joita ohjataan teräsrakenteesta. Näitä ovat esimerkiksi tulipesä, erottimet, takaveto sekä siilot. (Structural Interaction and Representative Modeling 2018). Kuvassa 16 on esimerkkejä laitetta edustavista palkkielementeistä, jotka sisällytetään yhteisvaikutusmalliin.

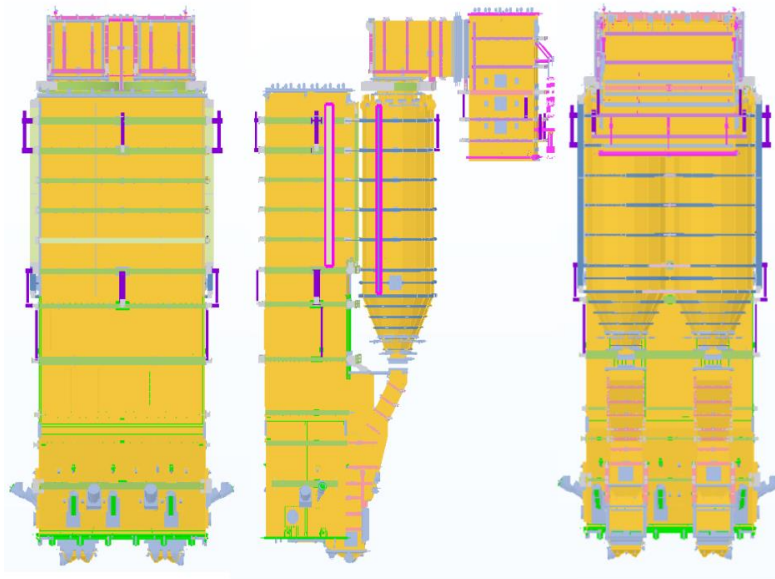


KUVA 16. Laitte-esimerkkejä sekä yhteisvaikutusmalli (Matilainen 2018-12-05)

Mallinnusvaatimukset yhteisvaikutusmalliin saadaan esimerkiksi *ASCE 7-10 [12.7.3]* standardista. Kattila määritetään yhteisvaikutusmalliin "structural component"-osana sekä luokitellaan "nonbuilding structure"-osaksi esimerkiksi *ASCE 7-10 [15.3.2]* mukaan. Jäykkyyden realistisen mallintamisen vaateita löytyy myös muista asianmukaisista standardeista. Kattilan jäykkyyttä edustavat osat kiinnitetään teräsrakenteeseen kannatustangoilla, linkkielementeillä sekä ohjureilla. Kattilaa edustavat osat tuottavat kuvaavan jäykkyyden sekä massan jaon, jotka syntyvät korkeista laitteista. Ohjureiden tuenta kehyspalkistoon vastaa niveltuentaa ja ohjureiden aksiaalisuunta vapautetaan toisesta päästä. Ohjureiden tuenta kattilaa edustaviin elementteihin toteutetaan vastaavalla tavalla. Hyperstaattisesti tuettujen kattilaosien kannatustangot lisätään laskentamalliin. Kannatustangot on kannattavaa lisätä laskentamalliin myös mikäli painevoimia tasapainotetaan niiden välityksellä. Kuorien jakautumisreitit on helpointa arvioida laskentamallissa representative-elementtien avulla. (Interaction Models and Boiler Rod Balancing 2018).

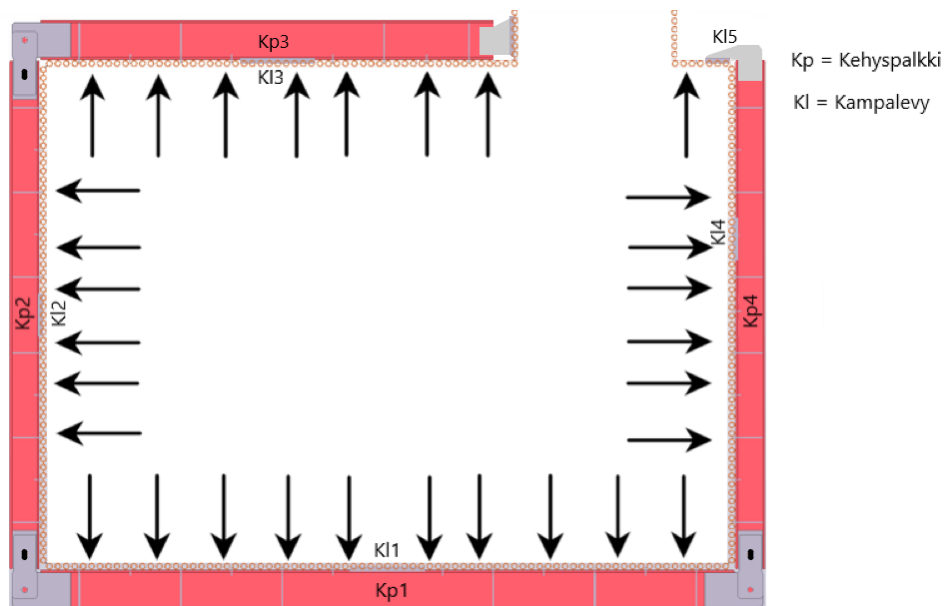
4 KEHYSPALKKI

Putkipaneelin yksittäisten putkien voidaan ajatella toimivan kuten monitukinen taivutusalkki. Kun putkipaneelille kohdistuu kuormaa se pyrkii taipumaan, mutta seinää ei suunnitella kestävään taivutusta itsenäisesti. Kehyspalkit toimivat tällöin taivutusalkin tukipisteinä. Kehyspalkkijärjestelmän päätarkoitus on hallita savukaasun paineista aiheutuvia voimia. Kehyspalkkijärjestelmällä hallitaan myös rakenteellisesta vuorovaikutuksesta aiheutuneita kuormia, sekä muita kattilaan kohdistuvia voimia. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 17 esitetään CFB-kattilalaitteistoa sekä kehyspalkkijärjestelmää 3d-kuvannossa.



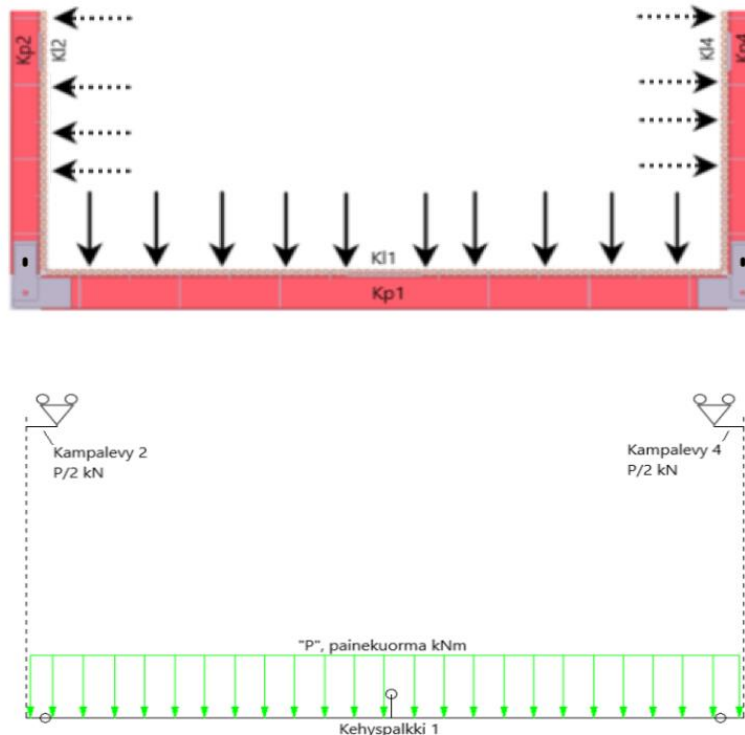
KUVA 17. Kattila sekä kehyspalkit

Kehyspalkit ovat yleensä I-profiilisiä hitsattuja tai valssattuja jäykisteitä. Kehyspalkit kiinnitetään seinään kampalevyjen sekä kynsien avulla. Kampalevy toimii kehyspalkin aksiaalisuuntaisten voimien välittäjänä. Savukaasun paineesta johtuva putkipaneelin taipuma välitetään kehyspalkkeille kynsien avulla. Taipumista syntyvät voimat ohjataan kehyspalkin päätyliitoksilla viereisten seinien kehyspalkkirakenteille, josta ne voivat ohjautua kampalevyjen kautta esimerkiksi putkipaneelin leikkausvoimaksi. (Seismic Training of Boiler Structures 2012). Kuvassa 18 havainnollistetaan, miten ylipaineen aiheuttamat kuormat kohdistuvat putkipaneelille kattilalaitteen vaakaleikkauksessa. Putkipaneelin kestävyys tarkastetaan kampalevyjen kautta kulkeville voimille ja kampalevyt mitoitetaan kestäväksi niihin kohdistuvat leikkausvoimat. Yksinkertaisessa kuormitustapauksessa voimien suuruus saadaan laskemalla viereisen seinän kehyspalkin tukireaktiot kampalevyissä. Usein viereisiltä seiniltä tulevat voimat kumoavat toisensa ainakin osittain. Myös esimerkiksi kattilaohjureilta tulee voimia. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020).



KUVA 18. Kattilaitteen vaakaleikkaus

Voimien jakautumista kehyspalkilta 1 viereisten seinien kampalevyille yksinkertaisessa ylipaineen kuormitustapauksessa voidaan havainnollistaa kuvan 19 esittämällä tavalla. Alipaineen tapauksessa vain kuormituksen suunta muuttuu.



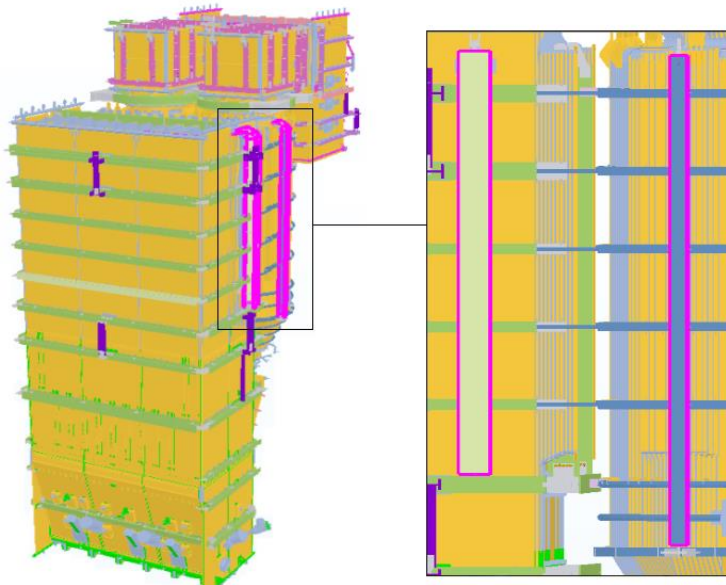
KUVA 19. Kuormien jakautuminen kehyspalkilta kampalevyille

Myös kehyspalkkitasojen välillä tapahtuu voimien siirtymistä. Yleensä nämä leikkausvoimat siirtyvät lopulta ohjuritason kehyspalkkeille. Kylmän ja kuuman rakenneosan liitos sijoitetaan lämpölaajenemisen nollalinjalle. Kylmän kehyspalkin tapauksessa liitos kuumaan rakenneosaan toteutetaan stopper plate, eli leikkauslevy nimisellä osalla. Kampalevyliliitos sijoitetaan kehyspalkkien keskivaiheille. Kehyspalkit voivat olla myös seinäputkien kanssa samansuuntaisia. Silloin putkipaneelin ja kehyspalkin

välillä tulee olla vain yksi aksiaalisuuntainen kiinteä kiinnitys, jotta lämpölaajenemista ei rajoitettaisi liikaa paneelin jäykässä suunnassa. Lämpölaajenemisen liiallinen rajoittaminen voisi johtaa kehyspalkin vääranlaiseen toimintaan jäykisteenä ja aiheuttaisi rakenteisiin ylimääräisiä rasituksia. (Buckstay Beam Element Modeling 2015).

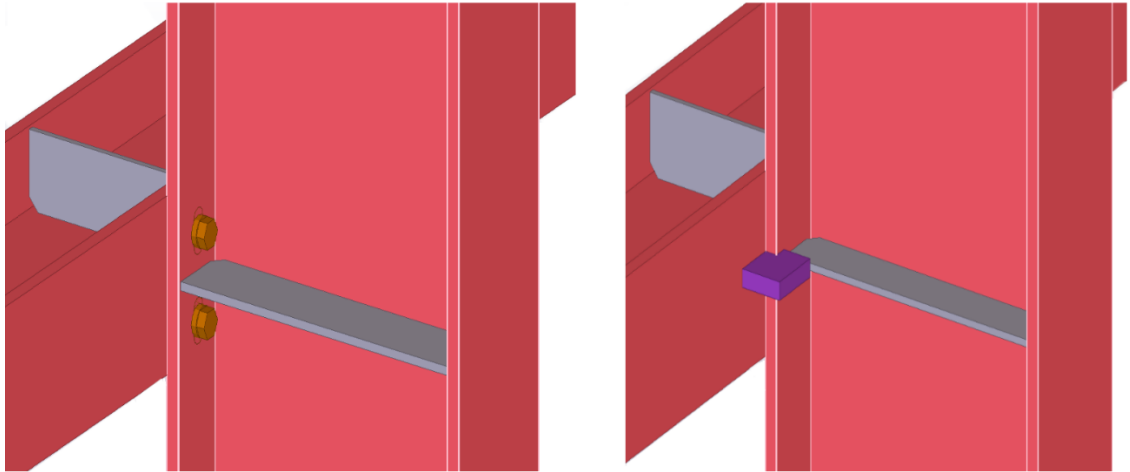
4.1 Erilaisia kehyspalkkeja

Pystysuuntaisia kehyspalkkeja käytetään vaakasuuntaisten kehyspalkkitasojen tukemiseen esimerkiksi tulipesän ja erottimen välisen kaasuaukon kohdalla, kun vaakasuuntaisten kehyspalkkien tukireaktioiden välittäminen suoraan tulipesän takaseinälle ei ole mahdollista. Pystysuuntainen palkki ottaa vastaan vaakasuuntaisten kehyspalkkien tukireaktiot sekä välittää kehyspalkkitasoilta tulleet kuormat putkipaneeleille ylä- ja alapäänsä liitosten kautta. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki pystysuuntaisista kehyspalkkeista tulipesän ja erottimen kaasuaukon vieressä. Palkin pään tukireaktiot siirretään kehyspalkista putkipaneeliin liitoksella, joka esitetään myöhemmin kuvassa 31.



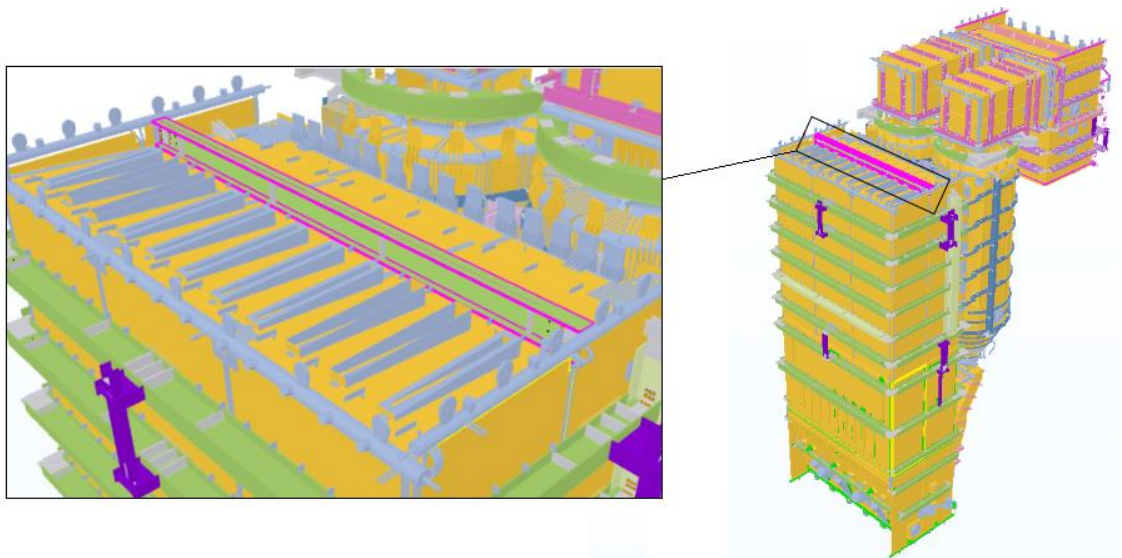
KUVA 20. Pystysuuntaiset kehyspalkit

Yleensä risteävien kehyspalkkien liitos on toteutettu pultein. Liitos voidaan myös toteuttaa vaakapalkkien laippoihin hitsatuilla kynsillä, jotka kiinnittyvät pystysuuntaisen kehyspalkin laippaan. Kuvassa 21 on esimerkki tällaisista liitoksista. Kynsiinnityksen tapauksessa ei tarvita pultteja. Kynsiä käytettäessä on pystysuuntaiseen kehyspalkkiin lisättävä uumajäykiste kynnen ja vaakasuuntaisen kehyspalkin uuman kohdalle. Uumajäykiste toteutetaan sen verran pienempänä, että se mahtuu kynnen kohdalle. Liitoksen suunnittelussa otetaan huomioon, että molempien risteävien palkkien tulee jatkuva momenttijäykkinä. Tällainen momenttia välittävä liitos onnistuu yleensä hyvin vain silloin, kun pystypalkki sijoitetaan vaakapalkkien päälle.



KUVA 21. Risteävien palkkien liitos

Kattilalaitteiden kattoa voidaan tarvittaessa jäykistää kehyspalkilla. Katolla olevalla kehyspalkilla vastaanotetaan laitteen katon putkipaneelille kohdistuneita voimia sekä välitetään niitä kattilan sivuseinille. Esimerkiksi tulipesän katolle voidaan sijoittaa kehyspalkki, mikäli putkipaneelin taivutusjäykkyys itsenäisesti ei riitä tarvittavan kestävyuden saavuttamiseksi. Yleensä suunnitellut kattilalaitteistot ovat niin suuria, että tulipesän katon putkipaneeli tarvitsee kehyspalkin. Pienempien laitteiden katolle ei välttämättä tarvitse suunnitella kehyspalkkia. Kuvassa 22 havainnollistetaan tulipesän katolla sijaitsevaa kehyspalkkia. Kehyspalkki kiinnitetään putkipaneeliin tavanomaiseen tapaan kynsillä.

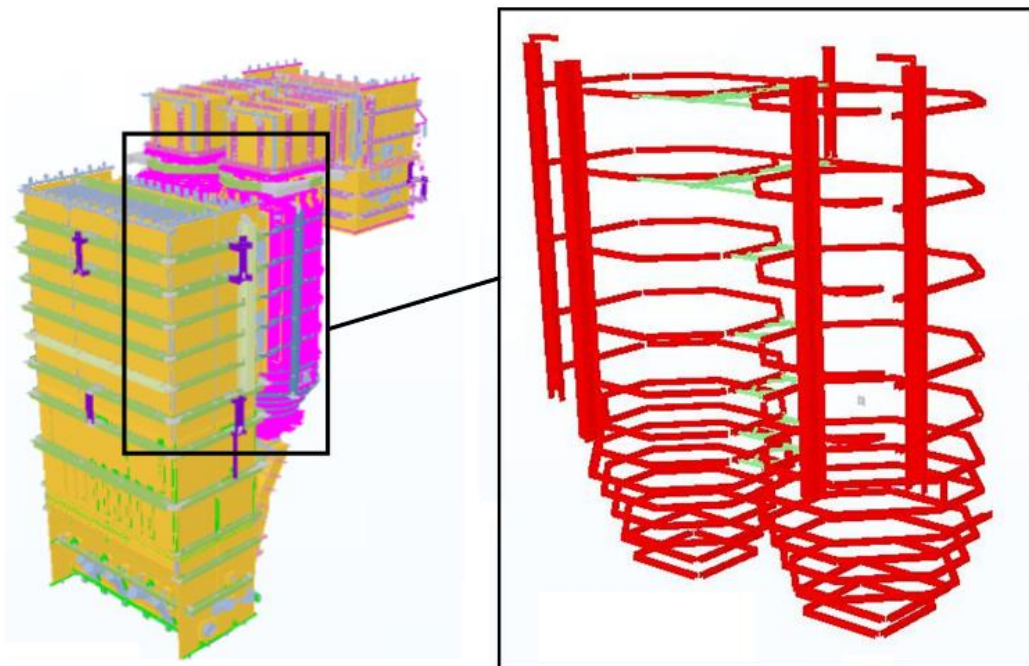


KUVA 22. Tulipesän katon kehyspalkki

Tavallisesti kehyspalkkeja ei käytetä kattilan kannatustarkoitukseen. Pystysuuntaisia kuumia kehyspalkkeja voidaan kuitenkin tarvittaessa käyttää kattilan kannattamiseen. Tätä kannatustapaa voidaan suosia pienemmissä laitteissa silloin, kun putkipaneelin putket ovat vaakasuuntaisia. Tyypillinen kattilan paneelikannatin on suunniteltu toimimaan parhaiten pystysuuntaisten putkien kanssa. Kun kehyspalkkia käytetään kannatustarkoitukseen kampalevyistä tulee isokokoisempia kuin jäykistystarkoitukseen käytettävien kehyspalkkien kampalevyistä, johtuen mitoituksessa mukana olevista kannat-

tusvoimista. Kamparauta, pystykehyspalkki ja sen liitos mitoitetaan yleensä kannatustankojen toteutuvalla kapasiteetilla. Mikäli komponenttiin ei kohdistu rakenteellisen vuorovaikutuksen kuormia, voidaan kampalevyn mitoituksessa käyttää harkintaa mitoitusvoiman suuruudesta. (Buckstay System Lay-Out 2016). Esimerkiksi maanjäristyksistä ja tuulesta aiheutuvat tankovoimat lisätään kuormitukseen manuaalisesti, mikäli mitoitusta ei tehdä tangon myötökapasiteetin mukaan. Kapasiteettiperusteisessa mitoituksessa voimapolku mitoitetaan kannatustangon toteutuvan myötökestävyyden mukaan. Vain voimapolun myötökestävyyden määräävä kohta on tarpeen tehdä myötävänä rakenteena. Muiden voimapolulla olevien osien ei tarvitse olla myötäviä. Muiden osien osalta riittää, että ne kestävät vähintään määräävän osan toteutuvan myötökestävyyden verran voimaa. (Essar Structural Training 2012).

Erottimen kehyspalkkijärjestelmä tehdään momenttia vastustavana kehänä, johtuen erottimen pyöreästä muodosta. Kiinnitystapa putkipaneeliin on samanlainen kuin muissakin kehyspalkkistoissa, mutta kehään ei tule päätyliitoksia kehyspalkkien välille. Kehyspalkkikehän päädyt kiinnitetään putkipaneeliin kampalevyliitoksilla. (Buckstay System Lay-Out 2016). Kuvassa 23 on esimerkki erottimen kehyspalkkijärjestelmästä.

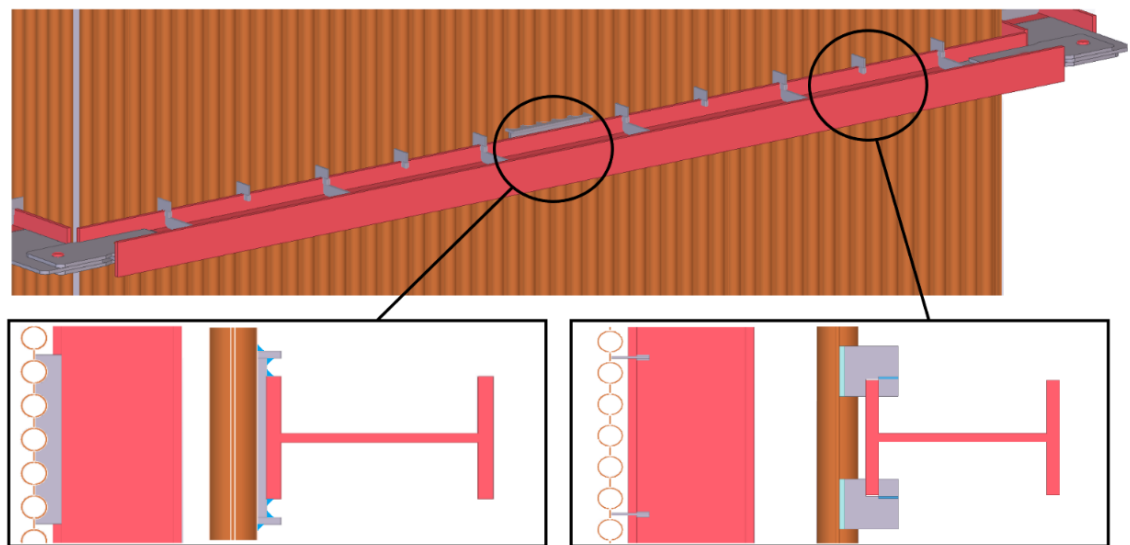


KUVA 23. Erottimen kehyspalkkisto

4.2 Kehyspalkin tyyppi

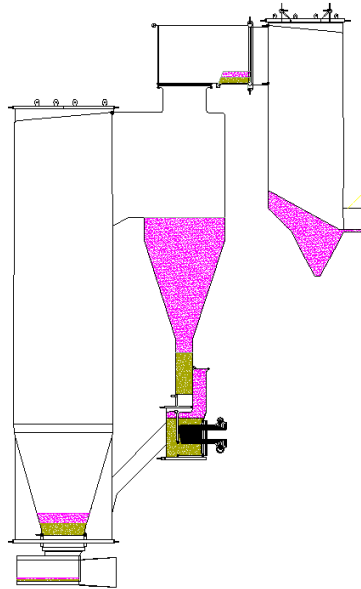
Kehyspalkkeja on kahdenlaisia: kuumia ja kylmiä. Tyypin valinta riippuu pääasiassa jäykistettävän laitteen käyttölämpötilasta. Kun seinälämpötilat ovat suhteellisen matalia, suositetaan kuumien kehyspalkkien käyttöä. Kuumat kehyspalkit välittävät kuormat toisille kuumille kehyspalkkeille tai esimerkiksi kylmien kehyspalkkien satulalatoille. Kuumien kehyspalkkien käyttö vähentää järjestelmän osien määrää. Tämä myös yksinkertaistaa putkipaneelin valmistusta ja kehyspalkkien eristämistä. Kuuma kehyspalkki eristetään koko matkalta seinää vasten, jolloin seinä sekä kehyspalkki kuuluvat samaan

lämpötila-alueeseen. Kuuma palkki kiinnitetään seinään kiinteästi kampalevyjen avulla yhdestä kohdasta kehyspalkin pituusakselilla. Kuuma kehyspalkki kiinnitetään seinään liukukiinnikkeillä useasta kohdasta putkipaneelin kohtisuorassa suunnassa. Liukukiinnitys seinän ja kehyspalkin välillä toteutetaan kynsien avulla. Kynnet koostuvat kahdesta erillisestä levystä sekä kiinnityspalasista, jotka yhdessä pitävät kehyspalkin laippaa kiinni seinässä. Kynsiä tarvitaan määrävälein, jotta seinäpaneeliin kohdistuvasta paineesta johtuvat voimat pääsisivät välittymään kehyspalkeille. Kynsi voi koostua myös yhdestä C-mallisesta levyosasta sekä kiinnityspaloista, mutta tätä kiinnitystapaa hyödynnetään yleensä vain korkean Bulk Solid -kuormituksen alueella sekä pienien kehyspalkkien kohdalla. (Buckstay Systems Lay-Out 2016). Kuvassa 24 on havainnollistava esimerkki kuumasta kehyspalkista. Uumajäykistelevyjen merkityksestä puhutaan luvussa 6 Kehyspalkkien stabiilius.



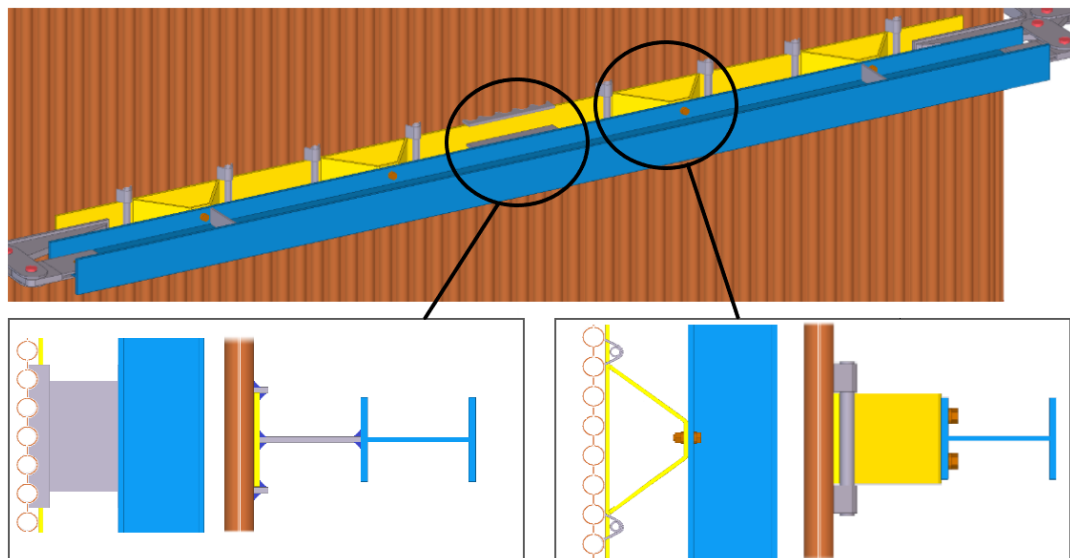
KUVA 24. Esimerkki kuumasta kehyspalkista

Kynnet hitsataan seinään sen valmistuksen aikana ja kiinnityspalat hitsataan kynsiin kehyspalkin asennuksen yhteydessä. Kehyspalkkia ei hitsata kiinni kynsiin tai kiinnityspaloihin, jotta lämpölaajenemista ei rajoiteta. Kynnet vastustavat kehyspalkin taipumista sen heikoimman akselin suhteen, vääntymistä sen pituusakselin suunnassa sekä mahdollistavat seinän ja kehyspalkin lämpölaajenemisen. Kynnet eivät lisää kehyspalkin taivutusvastusta sen vahvemman akselin suhteen. Mikäli jäykistettävällä alueella on suuri Bulk Solid -kuorma, käytetään kehyspalkin kiinnittämiseen yhtenäistä kiinnityskynttä sekä tarvittaessa myös evään hitsattavia välikappaleita kynsien välisellä alueella. Välikappaleet toimivat ylipainetta välittävinä rakenneosina. (Buckstay System Lay-Out 2016). Kuvassa 25 havainnollistetaan alueita kattilalaitteista, joissa voi esiintyä normaalia tai epänormaalia Bulk Solid -kuormitusta. Esimerkissä kattilalaitteita ovat tulipesä, erotin, palautinjalka, käänötökanava sekä takaveto. Keltainen väri kuvastaa normaalia Bulk Solid -kuormitusalueetta, violetti väri kuvastaa epänormaalia Bulk Solid -kuormitusalueetta.



KUVA 25. Bulk Solid -kuormitukset (Bulk Solid Load Definition Drawing)

Jos seinälämpötilat ovat korkeita tai jäykistettävät seinät huomattavan leveitä, käytetään kylmiä kehyspalkkeja. Kylmä kehyspalkki on järjestelmänä moniosaisempi. Se sisältää kampalevyt, satulalattan, leikkauslevyn, satulat, satulalattaa seinässä kiinni pitävät tappiliitokset sekä pulttiliitoksin satuloihin liitettävän kehyspalkin. Kylmien kehyspalkkien päätyliitokset toteutetaan kahden tapin linkkuna. Satularakenteen löysyyden vuoksi kylmä kehyspalkki on varustettava useammin ulomman laipan stabiiliutta varmistavilla vinosauvoilla. Kamparauta sijoitetaan samalla tavalla, kuin kuumen kehyspalkin kampalevyliitos. Satularakenne kiinnitetään seinään kiinteästi yhdestä kohdasta satulalattan pituusakselin suhteen. Satulalatta kiinnitetään seinään tappiliitoksilla, jonka kiinnikkeet ovat hitsattuina putkiseinään. Tämä mahdollistaa satularakenteen liikkumisen seinän liikkeiden mukana ilman, että lämpölaajenemista rajoitetaan. Kylmä kehyspalkki liitetään satulalattaan leikkauslevyllä, joka sijoitetaan kattilan lämpölaajenemisen nollalinjalle. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Kylmä kehyspalkki on havainnollistettuna kuvassa 26. Uumajäykistelevyjen merkityksestä puhutaan luvussa 6 Kehyspalkkien stabiilius.

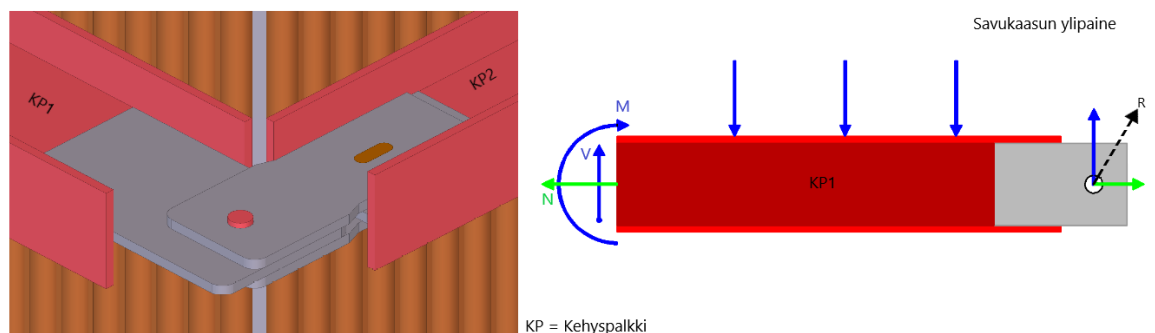


KUVA 26. Esimerkki kylmästä kehyspalkista

Satulalatta välittää viereisen seinän kehyspalkin tukireaktion toisen puolen seinälle tai kamparaudan välityksellä putkipaneelille. Kehyspalkin ja satulalatan välinen leikkauslevy toimii leikkausvoimien välittäjänä kehyspalkilta paneelille. Satulalatta voidaan tarpeen mukaan jäykistää poikittaisella levyllä nurjahduksen estämiseksi. Kehyspalkki kiinnitetään pulttiliitoksin satulalattassa oleviin satuloihin. Satuloiden soikeat pultinreiät mahdollistavat lämpölaajenemisen aiheuttamat liikkeet satularakenteessa, kun kehyspalkki pysyy paikallaan. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020).

4.3 Kehyspalkkien päätyliitokset

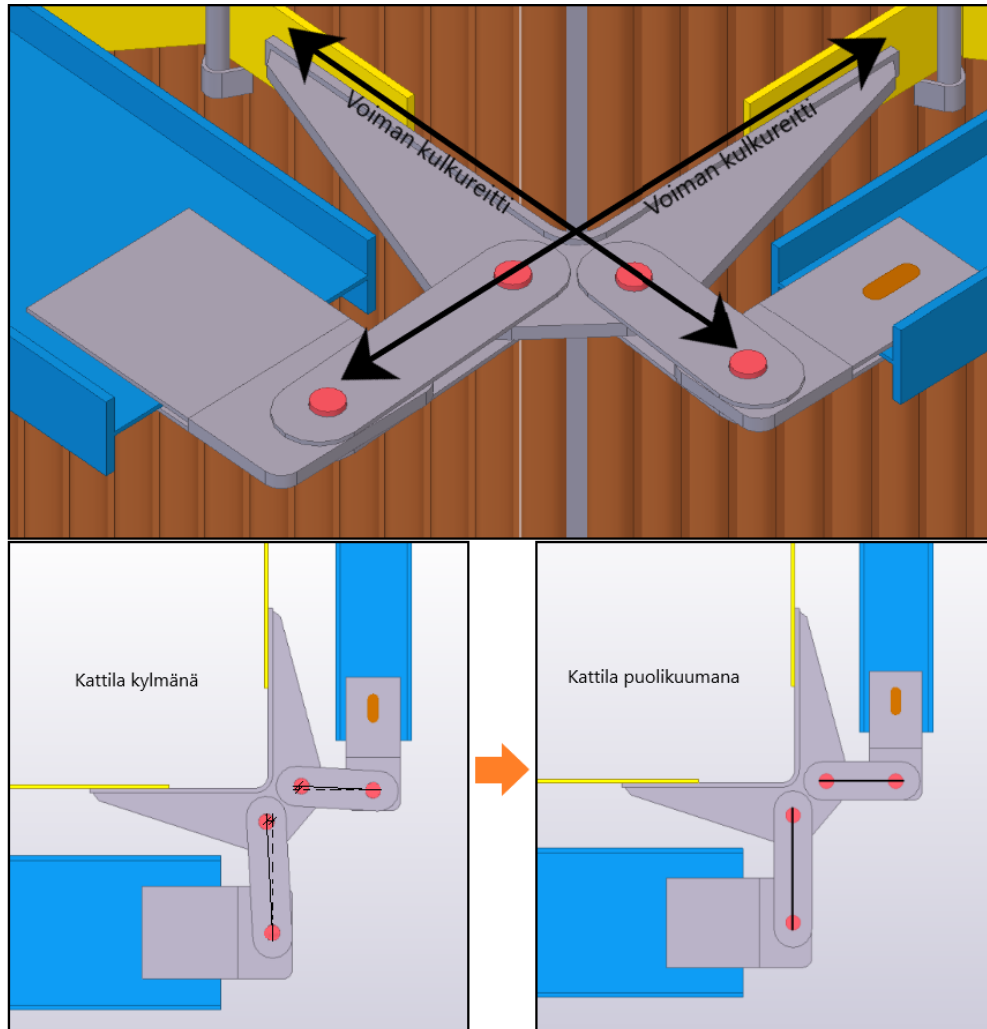
Kehyspalkkien liitostapa riippuu kehyspalkin tyypistä. Kehyspalkkien päätyliitokset suunnitellaan siten, että ne mahdollistavat voimien kulkeutumisen toisille kehyspalkeille tai muille rakennejärjestelmän osille. Kuumien kehyspalkkien päät kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi tappiliitoksella. Päätyliitoksen tappi sijoitetaan kehyspalkkien keskilinjojen mukaisesti, jotta välttäisiin ylimääräiseltä epäkeskisydestä aiheutuvasta momentista. Kuumien kehyspalkkien päätyliitoksessa aksiaalivoimat kulkeutuvat kehyspalkin keskilinjan mukaisesti viereisen sivun kehyspalkin keskilinjalle. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Esimerkki kuumien kehyspalkkien päätyliitoksesta on esitetty 3d-kuvannolla kuvassa 27. Samassa kuvassa havainnollistetaan voimien kulku liitoksen välityksellä. Siniset nuolet kuvastavat kehyspalkkiin kohdistuvia voimia ja vihreät nuolet kuvastavat näkymättömissä olevalta paltilta tulevia voimia. Liitos mitoitetaan vihreän ja sinisen nuolen resultantille.



KUVA 27. Kuumien kehyspalkkien päätyliitos

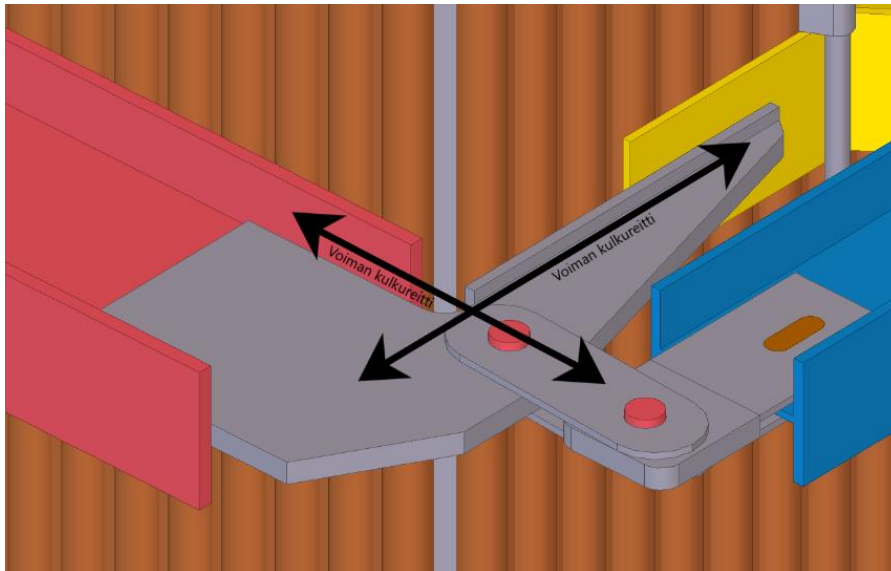
Kylmien kehyspalkkien päätyliitos on mutkikkaampi. Liitoksen periaate on samanlainen. Vastakkaisen seinien kehyspalkkien tukireaktiot tasapainottavat toisensa satulalatan kautta. Mikäli vastakkaisella seinällä ei ole kehyspalkkia, voima kulkeutuu satulalatta pitkin putkipaneelin leikkaukseksi kamparaudan kautta. Satulalatat välittävät aksiaalivoimia liitoksen välityksellä. Kylmä kehyspalkki ei välitä aksiaalivoimia, sillä kylmällä kehyspalkilla voidaan yleensä ottaa vastaan vain taivutusta muiden osien lämpöliikkeiden vuoksi. Kylmän kehyspalkin aksiaalisuunnassa on mahdollista välittää lähinnä vain teräsrakenteen ja kampalevyjen välisiä ohjurivoimia. Liitoksen suunnittelussa otetaan huomioon kehyspalkkien liikkuminen satularakenteen lämpölaajenemisen mukana. Lämpölaajeneminen otetaan huomioon liitoksessa ennakolla, eli kehyspalkin päässä oleva tappi sijoitetaan hieman pidemmälle kuin linkussa oleva tappi. Tapit ovat kohdakkain, kun lämpölaajenemisen aiheuttamasta pituuden muutoksesta on tapahtunut puolet. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Päätyliitoksen sisemmät tapit sijoitetaan viereisten satulalattojen keskilinjojen mukaan ja ulommat tapit sijoitetaan

kehyspalkkien keskilinjojen mukaan. Mikäli levyliitosta ei pystytä ympäröimään kehyspalkin matalan uuman takia, voidaan palkin pituussuuntaiset hitsit korvata soikeisiin reikiin sijoitetuilla kolopienahitseinä. Kuvassa 28 havainnollistetaan voimien kulkeutuminen kylmien kehyspalkkien päätyliitoksissa sekä soikeat reiät, joista levy voidaan hitsata kehyspalkkiin. Kuvassa esitetään myös lämpölaajenemisennakko liitoksessa, sekä liitoksen tila, kun lämpölaajenemisesta on tapahtunut puolet.



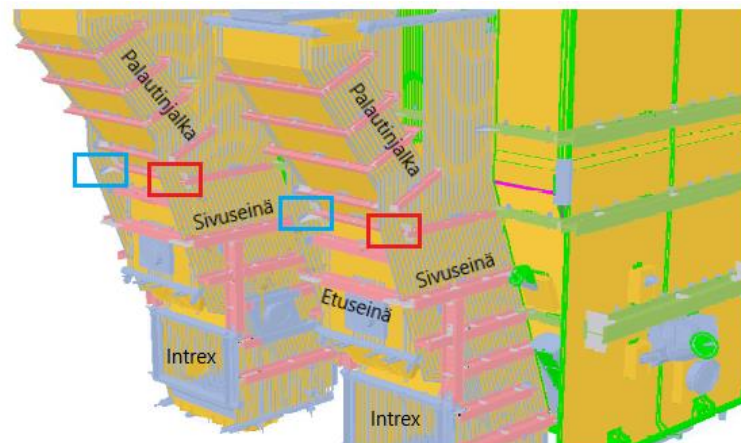
KUVA 28. Kylmien kehyspalkkien päätyliitos

Päätyliitos voidaan tarvita myös kylmän ja kuuman kehyspalkin välille. Tällainen kuuman ja kylmän kehyspalkin välinen liitos on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin aikaisemmin esitetyt tapaukset. Liitoksessa yhdistyy kuuman ja kylmän kehyspalkin liitokselle ominaisia ratkaisuja. Kuuma kehyspalkki sekä satulalatta välittävät liitoksen kautta aksiaalivoimia. Kylmä kehyspalkki ei välitä aksiaalivoimia. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Voimien kulkureitit kuuman ja kylmän kehyspalkin päätyliitoksessa on esitetty kuvassa 29. Liitoksessa on otettu huomioon kylmän puolen lämpölaajeneminen ennakkolla, kuten edellisessä kuvassa 28.



KUVA 29. Kylmän ja kuuman kehyspalkin päätyliitos

On myös tilanteita, joissa kehyspalkkien päätyliitosta ei voida toteuttaa yllä olevia liitoksia soveltaen. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi palautinjalan kehyspalkistossa, jossa kehyspalkkien päätyliitos toteutetaan liittämällä kehyspalkkien päät ulokkeena olevan putkipaneelin läpi. Kuvassa 30 havainnollistetaan, miten putkipaneelin läpi toteutetaan kehyspalkkien päätyliitos. Palautinjalan etuseinällä olevan kehyspalkin päät sidotaan seinään kampalevyillä. Vierekkäisillä seinillä olevien kehyspalkkien tukireaktiot siirretään levyliitoksia pitkin palautinjalan etuseinän kehyspalkille. Putkipaneelin evään tehdään levyjä varten aukot.



Päätyliitos putkipaneelin läpi sivuseinän kehyspalkille

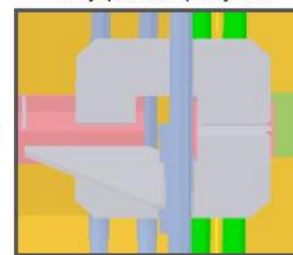


Kehyspalkin pään kamparautakiinnitys putkipaneeliin

Päätyliitos putkipaneelin läpi etuseinän kehyspalkille

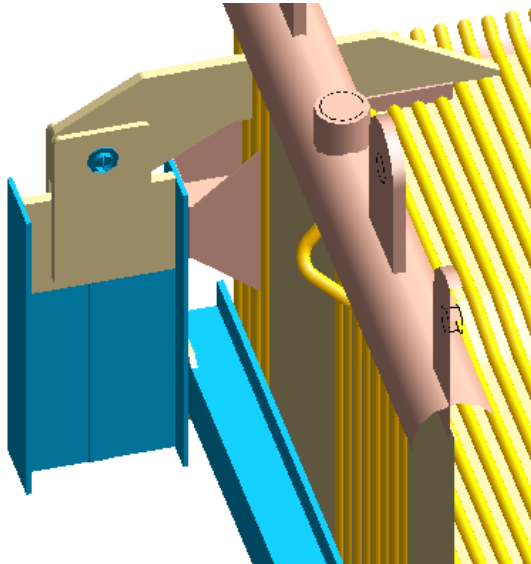


Kehyspalkkien päätyliitos



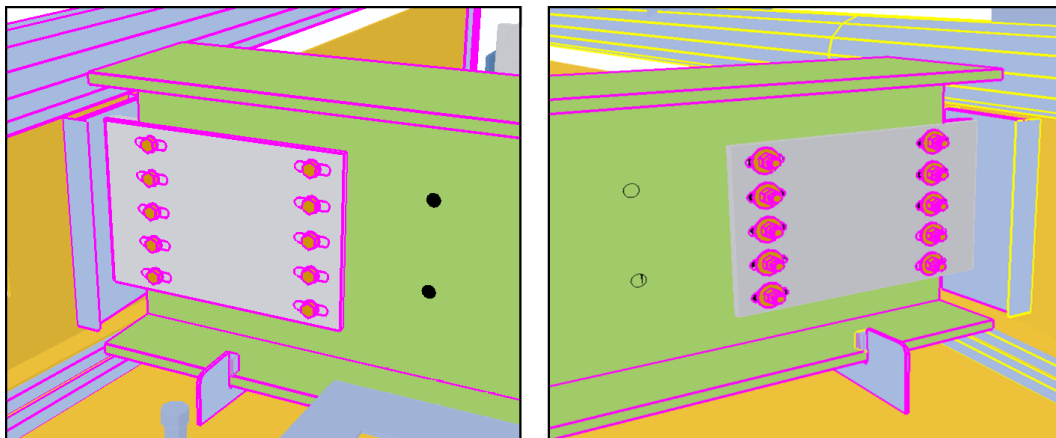
KUVA 30. Liitos putkipaneelin läpi

Tulipesän sivuseinän pystypalkin yläpää kiinnitetään tulipesän kattopaneeliin. Pystypalkki voi olla kylmä tai kuuma. Kylmän kehyspalkin liitos toteutetaan tappiliitoksena, jotta profiili saadaan pysymään kylmänä. Liitoksessa oleva tappi sijoitetaan samaan korkoon kuin putkipaneeli, jotta vältetään ylimääräiseltä epäkeskisyydeltä. Kuuman kehyspalkin liitos voidaan toteuttaa jäykkänä tai tappiliitoksena, kuten kylmässä kehyspalkissa. Myös tällöin kehyspalkkiin kohdistuneista voimista aiheutuva momentti kohdistuu palkkiin sekä liitokseen, ei putkipaneeliin. Pystysuuntaisen kehyspalkin päätyliitos tapilla on esitetty kuvassa 31.



KUVA 31. Pystysuuntaisen kehyspalkin päätyliitos (Holopainen 2013-01-17)

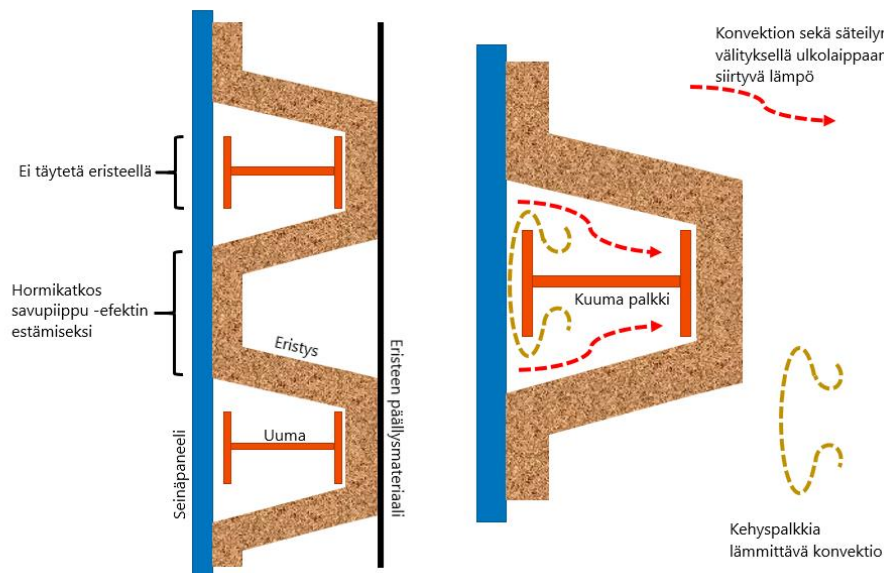
Tulipesän katon putkipaneelin jäykistämiseen käytettävän kehyspalkin päätyliitos toteutetaan liitoksena painerunkoon. Kehyspalkin pääty kiinnitetään levyliitoksella katon yli ulottuvan sivuseinän putkipaneeliin kiinnityslevyn välityksellä. Levyliitos kiinnitetään kehyspalkkiin pultteilla. Tässä liitostyyppisessä pulttien reiät ovat soikeita. Kuvassa 32 on esimerkki katon kehyspalkin päätyliitoksesta sivuseinän putkipaneeliin.



KUVA 32. Katon kehyspalkin päätyliitos

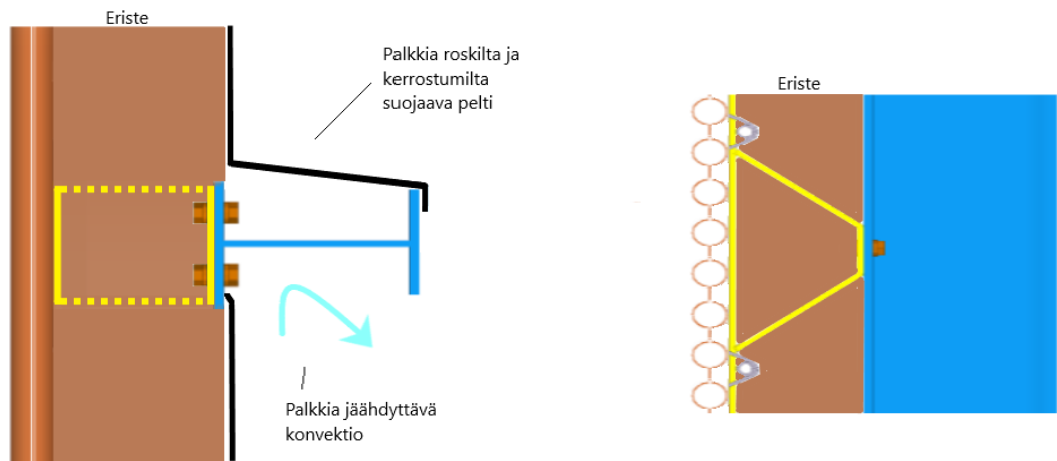
4.4 Kehyspalkin eristäminen

Kehyspalkin eristämistapa riippuu kehyspalkin tyypistä. Kehyspalkkien eristämiseen sovelletaan esimerkiksi standardeja *SFS 3977* sekä *SFS 5744*. Kuuma kehyspalkki ja seinä eristetään samaan eristetilavuuteen. Eristämisellä varmistetaan, että kuumat osat pääsevät laajenemaan vapaasti suhteessa kylmiin osiin. Kuuman kehyspalkin ja putkipaneelin väliin ei laiteta eristettä, vaan kehyspalkki ympäröidään riittäväällä tilavuudella sitä vastaavan paljaan seinäpinta-alan mukaisesti. Tämä mahdollistaa kehyspalkin laippojen sekä uuman lämpenemisen säteilyn ja konvektion avulla. Yleensä jokainen kehyspalkki eristetään omaan tilaansa. Kehyspalkkien väliin tulevalla putkipaneelin eristyksellä varmistetaan, että lämpö ei pääse siirtymään savupiippu-efektillä kehyspalkkien välillä. Kehyspalkin eristäminen samaan eristetilavuuteen varmistaa, ettei lämmin ilma pääsisi virtaamaan kattilalaitoksen yläosiin. (Design of Insulation from Structural Point of View 2014). Kuuman kehyspalkin eristämistä havainnollistetaan kuvassa 33.



KUVA 33. Kuuman kehyspalkin eristäminen (Holopainen 2019-11-26)

Kylmän kehyspalkin tapauksessa eriste sijoitetaan paneelin ja kehyspalkin väliin. Kylmän kehyspalkin tilanteessa satularakenne eristetään siten, että kaikki satularakenteessa olevat aukot ja välit täytetään eristemateriaalilla. Eristekerroksen paksuus on suurinpiirtein yhtä suuri kuin satularakenteen korkeus. Kehyspalkki jätetään eristyksen ulkopuolelle. Jättämällä kylmä kehyspalkki eristeen ulkopuolelle varmistetaan kylmäksi tarkoitetun osan tuulettuminen sekä estetään sen kuumeneminen. Paneelin ja satulalatan väliin ei laiteta eristettä haittaamaan paneelin ja satulalatan välistä lämmönsiirtoa. (Design of Insulation from Structural Point of View 2014). Kuvan 34 esimerkissä havainnollistetaan kylmän kehyspalkin eristämistä pysty- ja vaakaleikkauksessa.

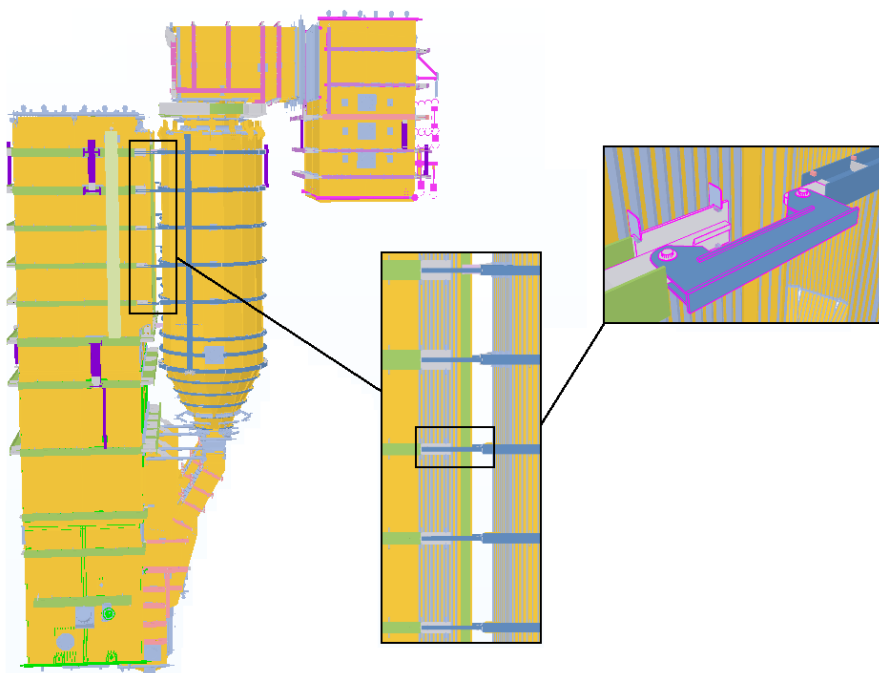


KUVA 34. Kylmän kehyspalkin eristäminen

Kylmän kehyspalkin yläpuolta suojataan roskien ja kerrostumien estämiseksi vinolla pellillä. Eristekerros ulotetaan satularakenteen tasalle, mutta ei uloteta kehyspalkin päälle. Eristettä ei laiteta kehyspalkin päälle, jotta se ei estäisi konvektion kautta tapahtuvaa uuman jäähtymistä.

4.5 Tasapainottamattoman painekuorman hallinta

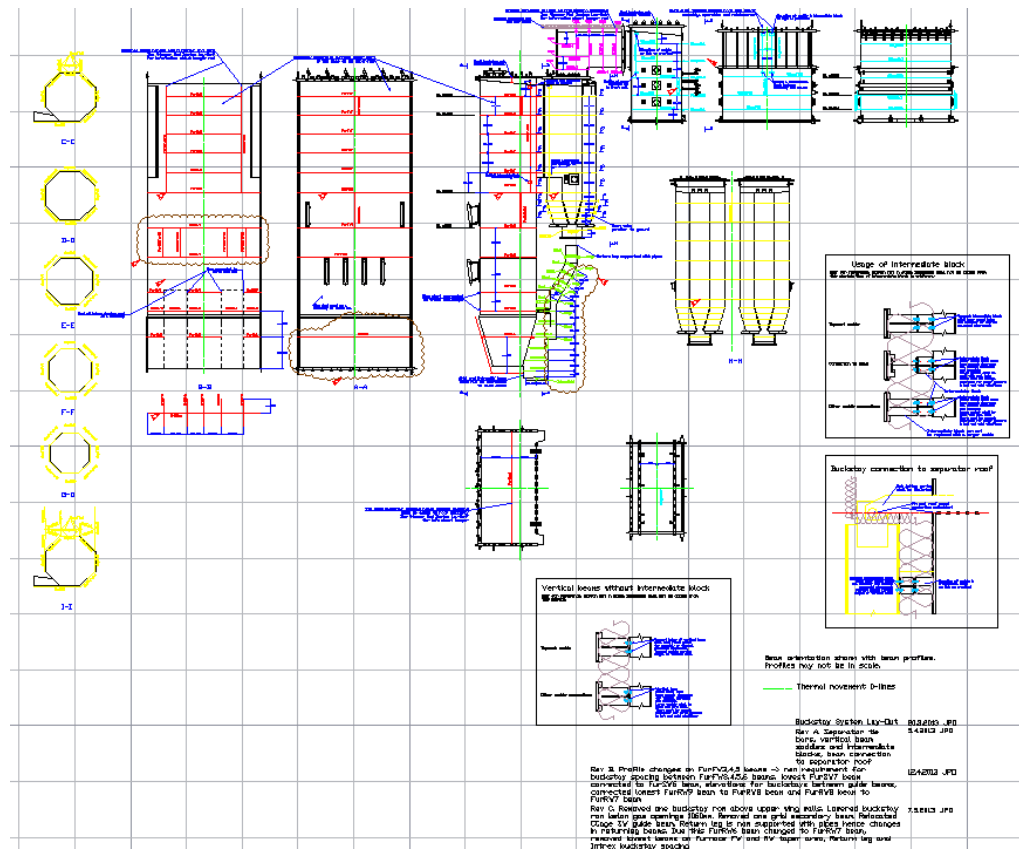
Laitteiden väliset kaasuaukot voivat aiheuttaa tasapainottamattomia painekuormia. Tasapainottamaton ylipaine pyrkii työntämään laitteita pois päin toisistaan, joten esimerkiksi tulipesän sekä erottimen kehyspalkkijärjestelmät kiinnitetään toisiinsa. Kehyspalkkijärjestelmien välinen liitos suunnitellaan siten, että se mahdollistaa lämpölaajenemisen aiheuttamat liikkeet pysty- ja vaakasuunnassa sekä voimien kulkeutumisen kehyspalkkijärjestelmien välillä. Monisuuntainen liike mahdollistetaan käyttämällä tappiliitoksia sekä riittävän suuria välyksiä liitoslevyjen välillä. (Buckstay Systems Lay-Out 2016). Kuvassa 35 on esimerkki tulipesän ja erottimen välisestä liitoksesta.



KUVA 35. Kehyspalkkijärjestelmien liitos

5 KEHYPALKKIEEN SUUNNITTELUPROSESSI

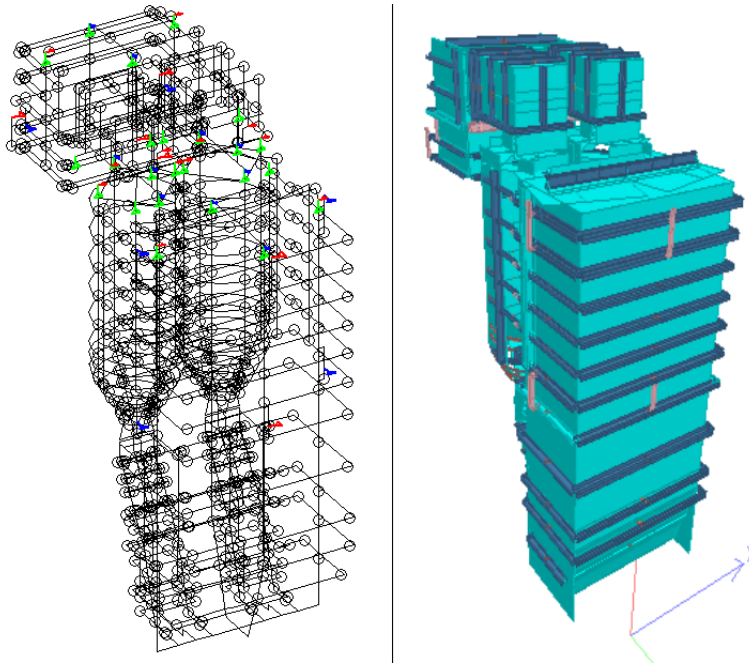
Kehyspalkkien suunnittelu on jaettu eri ammattiosajien välille. Suunnittelu aloitetaan Boiler Structural Engineering (BSE) -osastolla suurimman sallitun kehyspalkkijaon määrityksellä. Sitä varten on tarkastettava paneelin taivutuskapasiteetti siihen luodulla laskentatyökälulla. Kapasiteetin tarkistuksen jälkeen valitaan alustavat kehyspalkkijaot, sekä on tavallisesti luotu kehyspalkkien layout-piirustus. (Buckstay and Return Leg Staad Modeling 2019). Kuvassa 36 on esimerkki layout-piirustuksesta.



KUVA 36. Layout-piirustus (Buckstay System Lay-Out)

Layout-piirustuksesta on nähtävissä kaikkien jäykistettävien laitteiden kehyspalkkien sijainti, orientaatio, stabiiliuden varmistamiseen käytettävä menetelmä sekä esivalittu profiilikoko. Lisäksi piirustuksessa tai sen liitteessä olevassa taulukossa esitetään kehyspalkkien jako kuumiin ja kylmiin rakenteisiin. Liitteessä esitetään myös kehyspalkin laipan pinnan etäisyys paneeliputken harjasta. Stabiiliuden varmistamiseen käytettyjä menetelmiä ovat esimerkiksi ”palkista palkkiin” ja ”palkista pystyprofiiliin”, joita esitetään myöhemmin kappaleessa 6. (Buckstay Systems Lay-Out 2016).

Kun alustavat tiedot kehyspalkkeista on selvillä tehdään järjestelmästä Staad-laskentamalli. Laskentamallilla voidaan varmistaa kehyspalkkijärjestelmän oikea toiminta ja mitoittaa kehyspalkit lopulliseen kokoonsa. Laskentamallista saadaan kehyspalkkien väliset liitosvoimat liitoslaskentaa varten. (Buckstay and Return Leg Staad Modeling 2019). Kuvassa 37 on esimerkki kehyspalkkien laskentamallista rautalanka- ja rendered calculation model -mallina.



KUVA 37. Kehyspalkkien laskentamalli

Kehyspalkit on mahdollista mitoittaa erillisellä excel-pohjaisella laskentatyökalulla, mutta esimerkiksi erottimen ympärillä monikulmaisen kehyspalkiston mitoittamiseen Staad on laskentatyökalua kätevämpi. Tarvittaessa kehyspalkkien käyttöasteiden optimointi tehdään kuitenkin excel-työkalulla, sillä se on tehty hoikkarakenteiset profiilit mahdollistavalla tavalla.

Kehyspalkkien mitoittamisen jälkeen ”Tekla-tiimi” mitoittaa ja suunnittelee kehyspalkkien väliset liitokset hyödyntäen laskentamallista sekä Layout-piirustuksesta saatavaa suunnittelutietoa. Kehyspalkkien liitoksien mitoittamiseen ja suunnitteluun hyödynnetään olemassa olevia standardisoituja liitostyyppisiä sekä laskentatyökaluja. Suunnitelluista kehyspalkkeista ja liitoksista tehdään mitoittamisen jälkeen 3d-malli, jonka avulla niille tuotetaan konepaja sekä kokoonpano piirustukset. Suurin osa liitoksista halutaan mitoittettavan juuri kyseiselle projektille, kuten myös rakennusten suunnittelussa toimitaan. (Buckstay and Return Leg Staad Modeling 2019).

5.1 Kehyspalkkien suunnittelu

Kehyspalkkien suunnittelulle ei ole määritetty omaa suunnittelustandardia. Kehyspalkkien suunnitteluun käytetään yleensä standardeja *EN 1993-1-1*, *EN 1993-1-5* sekä *EN 1993-1-8*. Kehyspalkit laskeaan yksinkertaisesti tuettuina palkkeina. Kehyspalkin profiilin koko määräytyy kehyspalkille asetettujen vaatimusten perusteella. Näitä ovat esimerkiksi suurin sallittu palkkijako, palkin suurin sallittu taipuma, alin sallittu ominaistajuus tai tihein sallittu jako stabiiliutta varmentaville osille. Kehyspalkkien uumien korkeudet pidetään samana, mikäli kehyspalkit ovat optimaalisilta päämitoiltaan muutoin samankaltaisia. Mikäli kehyspalkin profiilia on tarvetta muuttaa, voidaan uuman korkeuden nostamisen sijasta harkita ensin muiden mittojen muokkaamista. Tämä mahdollistaisi samojen liitososien käyttämisen useissa eri sijainneissa. Kehyspalkkeihin kohdistuvien painekuormien voidaan yleensä ajatella olevan tasaisesti jakautuneita kuormituksia. Kehyspalkkien mitoituksessa käytettäviä kuormitusyhdistelmiä ovat normaalit olosuhteet, savukaasun paineen epänormaali yli- ja alipaine,

höyryn tai veden epänormaali lämpötila sekä accidental savukaasun paine. Kehyspalkin aksiaalivoimat, epäkeskiset ohjurikuormat sekä erottimen tuhkasuppilon Bulk Solid -kuormat otetaan huomioon mitoituksessa. Suora tuulenpaine kuormittaa kehyspalkkeja sellaisilla alueilla, joita ei ole suojattu rakennuksen ulkoseinillä. Vaakakuormina otetaan huomioon 1-2 prosenttia massasta. Profiilin poikkileikkauksen kuormituskapasiteetti mitoitetaan riittävän kestäväksi lujuuden, stabiiliuden, taipumien sekä värinän osalta. Profiilin uuman lommahdus sekä laipan nurjahdus tarkastetaan. Myös profiilin virumislujuus otetaan huomioon mitoituksessa. Kehyspalkkijako määritetään putkipaneelin taivutuskestävyyden ja paneelin suurimman sallitun taipuman perusteella. Mikäli kattilaa kannatetaan alapuolelta, kannatuksesta aiheutuva puristusjännitys otetaan huomioon mitoituksessa. Myös paneelin lujuus voi olla rajoittava tekijä kehyspalkkijaon määrittämisessä. Putkipaneelien putket mitoitetaan jatkuvina palkkeina. Putkien taipumalle on määritetty taipumaraja. Myös kehyspalkkien taipumalle on määritetty taipumaraja perustuen niiden jännemittaan. (Buckstay Analysis Criteria 2015).

Kehyspalkin aksiaaliliitos sijoitetaan kunkin kehyspalkin keskivaiheille. Mikäli useampaa kuin yhtä aksiaalista liitosta käytetään palkin kiinnitykseen, on varottava ettei niiden välityksellä tuoda rakennemalliin ylimääräistä jäykkyyttä. Aksiaalikiinnityksiä ei käytetä taivutusmomentin tai poikittaisten voimien kantamiseen. Kehyspalkkien stabiiliutta voidaan varmistaa lisäämällä siihen uumajäykisteitä. Stabiiliuden varmistamisen tarve osoitetaan laskentatyökalulla. Uumajäykisteiden määrä on pidettävä sopusuhtaisena. Ylimääräisiä uumajäykisteitä tarvitsee lisätä ainakin pistekuormien sijainteihin sekä risteävien palkkien kohdalle mikäli tarkempaa tutkimusta palkin suunnittelusta ilman näitä jäykisteitä ei ole tehty. Stabiiliutta varmistavia vinojäykisteitä käytetään, mikäli palkki sitä tarvitsee. Vinojäykisteiden tarve osoitetaan uumajäykisteiden tapaan laskentatyökalulla, mutta itse jäykiste mitoitetaan erikseen. Vinojäykisteen puristuskapasiteettiin kiinnitetään erityistä huomiota. On suositumpaa, että vinojäykisteitä ei tarvitsisi käyttää, sillä ne aiheuttavat ylimääräistä asennustyötä sekä ongelmia lay-outin tekemisessä. (Buckstay Analysis Criteria 2015).

Kuumien kehyspalkkien mitoituslämpötila saadaan Fin temperature analysis-työkalusta, jolla määritetään myös putkipaneelin ulkopinnan keskilämpötila. Kuumien kehyspalkin lämpötila on sama sisälaipan, uuman sekä ulkolaipan osalta. Kylmien kehyspalkkien kohdalla laippojen sekä uuman osalta lämpötilana käytetään normaalioloissa 60°C ja epänormaaleissa oloissa 120°C, mikäli muuta tietoa ei ole annettu. (Buckstay Analysis Criteria 2015).

Ohjurit liitetään kehyspalkkeihin. Ohjureiden mitoitus tapahtuu yleensä teräsrakennesuunnittelijan toimesta, riippuen sovitusta työnjaosta. Ohjureiden mahdollinen detaljisuunnittelu sekä liitossuunnittelu ovat yleensä kehyspalkkisuunnittelijan tehtävänä. Korkean seismisyyden alueilla käytetään yleensä uhrattavia kattilaohjureita, jotka mitoitetaan dissipative osina. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjuri myötää ennen muita rakenneosia. Mitä tarkemmin ohjurin plastinen kestävyys saadaan hyödynnettyä, sitä matalammaksi mitoitusvoimat uhrautuvan rakenneosan takaisille kattilarakenteille saadaan. Ohjuripalkin stabiilius ei saa olla mitoittava tekijä uhrautumistilanteessa. Plastisen taivutuskapasiteetin hyödyntämisen varmentamisen vuoksi uhrattavat ohjurit tehdään koteloprofiilina, jotta vältytään epästabiiliden aiheuttamilta ongelmilta. Ohjureiden sekä muiden dissipoiivina osina tehtävien teräsrakenteiden mitoituksessa käytetään samoja R/I/p arvoja. On suositeltavaa sijoittaa ohjurit

siten, että teräsrakenteessa oleva ohjurihaarukka sijaitsee kehyspalkkitasojen välissä. Uhrattavan ohjuripalkin ei tarvitse välttämättä olla helposti vaihdettavissa uuteen maanjäristyksen jälkeen, mutta sopimusvaatimukset otetaan huomioon. (Buckstay Analysis Criteria 2015).

Kehyspalkkien alustava mitoitus tehdään laskentatyökalulla ja Staad-laskentaohjelmaa hyödynnetään muunmuassa Code Check:in tekemiseen. Staad-laskentaohjelmalla tehtävällä kehyspalkkien laskentamallilla saadaan selville kehyspalkkijärjestelmän sisäiset voimat sekä putkipaneelikiinnityksissä vaikuttavat voimat. Erottimen kehyspalkit mitoitetaan palkkielementti-laskentamallilla. Kehyspalkin kuormitetuin alue sijaitsee yleensä palkin keskellä. Yleensä kuormitus vähenee edetessä kehyspalkin päitä kohden, jolloin tärkein alue kehyspalkin kestävyuden kannalta sijoittuu palkin keskialueelle. Kehyspalkin kunkin rakenneosan muunnettu hoikkuus lasketaan lineaarisesta stabiiliusanalyysistä saatavan kriittisen jännityksen ja materiaalin myötölujuuden perusteella. Sitä käytetään materiaalissa esiintyvien epätäydellisyyksien huomioon ottamiseksi. Vastauksena saadaan oikean rakenteen puristuslujuutta vastaava arvo. (Selecting Buckstay Profiles 2016).

5.2 Kehyspalkkien materiaali

Kattilarakenteet luokitellaan kolmeen kategoriaan: kuormia kantaviin, voimia välittäviin sekä ei-kantaviin komponentteihin. Kuormia kantaville sekä voimia välittäville komponenteille on määritetty lämpötilarajat, joilla voidaan ylläpitää komponenttien mekaanisia ominaisuuksia. Kuormia kantavien komponenttien sortuminen johtaisi tapaturmaan. Kuormia kantavien komponenttien virumislujuudet tulee ottaa huomioon koko niiden suunnitellun käyttöajan ajalle. Tällaisia komponentteja ovat muunmuassa kannatustangot, TAPH, eli Tubular Air Pre Heater -pilarit sekä pystysuuntaiset putkipaneelit, kuten tulipesän seinät, joita käytetään kannatustarkoitukseen. (Buckstay Material Selection and Substitution 2016).

Voimia välittävien komponenttien pettäminen ei johtaisi vakavaan vaurioon. Mikäli tällaisille komponenteille on sovittu rajattu kesto-aika on niille vaara-arvioinnin näkökulmasta mahdollista suunnitella lyhyempi käyttöikä kuin kuormaa kantaville komponenteille. Voimia välittäviä komponentteja ovat esimerkiksi kehyspalkit sekä kampalevyt. (Buckstay Material Selection and Substitution 2016).

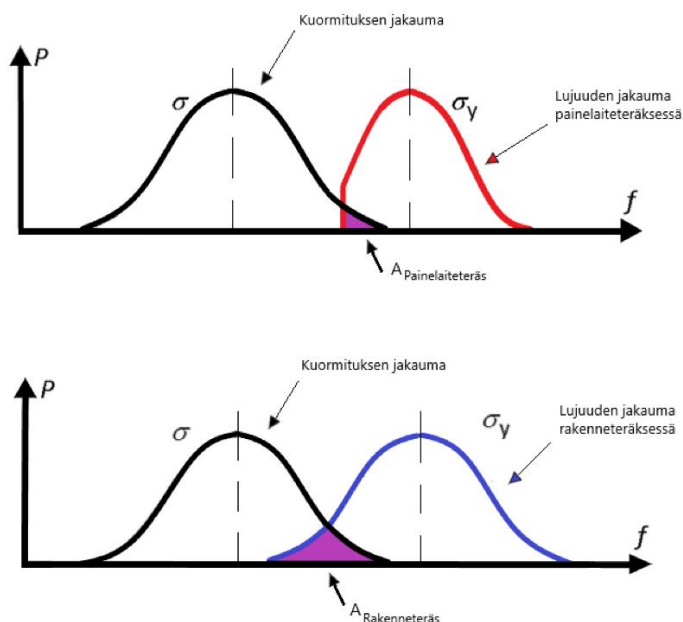
Ei-kantavat komponentit ovat sellaisia, joilta ei vaadita merkittävää kuorman välityskykyä. Lujuus tarkistusta tai mitoitusta ei tarvitse tehdä tällaisille osille. Ei-kantavien komponenttien lämpötilarajat on määritetty siten, että välttyttäisiin materiaalin hilseilyltä. Esimerkkejä ei-kantavista komponenteista ovat tiivistyslevyt sekä evät, joita käytetään vain kaasutiiveyden saavuttamiseksi. Myös muurauskotelot ja värähtelynestolevyt ovat tällaisia komponentteja. (Buckstay Material Selection and Substitution 2016).

Kehyspalkkiin käytettävät materiaalit valitaan käyttäen esimerkiksi *EN 10025-2* ja *EN 10028-2* standardeja. Kehyspalkkien materiaalin valinta perustuu materiaalin soveltuvuuteen suunnitellussa käyttölämpötilassa. Materiaalin valinnassa otetaan huomioon virumat, grafitoituminen sekä mahdollinen korrosio. Hiiliterästen mekaaniset ominaisuudet ovat käyttökelpoisia noin 400°C asteeseen asti.

Erilaisilla lisäaineilla teräsmateriaaleille saadaan korkeampi käyttölämpötiloja. Kehyspalkkeihin käytettävän teräksen tulee olla hitsattavaa. (Buckstay Material Selection and Substitution 2016).

5.3 Rakenneteräs ja painelaiteteräs

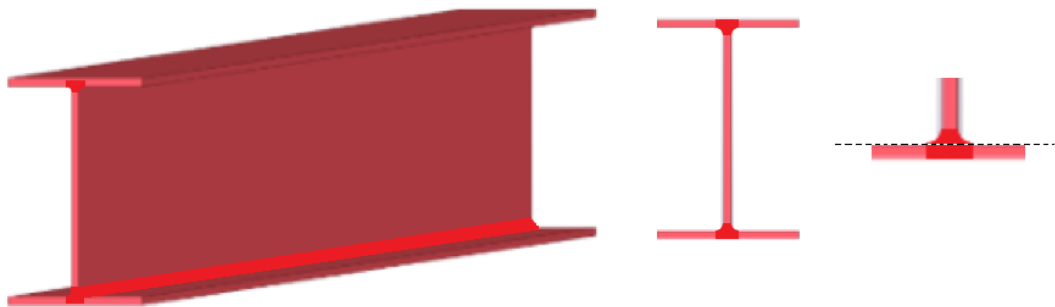
Kattilalaitteen seinälämpötilat ovat jatkuvasti korkeita. Kehyspalkkien tulee kestää jatkuvasti korkeita lämpötiloja niiden suunnitellun käyttöajan ilman lujuusominaisuuksien heikentymistä. Suunniteltu käyttöikä mitoitetaan kehyspalkin käyttötarkoituksen mukaan. Kehyspalkkeja voidaan tehdä rakenneteräksestä tai painelaiteteräksestä. Panielaiteteräs on parempilaatuista kuin rakenneteräs. Panielaiteteräksen parempi laatu syntyy huolellisesta valmistusmenetelmästä. Tiettävästi noin yksi prosentti painelaiteterästuotteista kierrätetään jo terästehtaalla standardin määrittämän lujuusarvon alittuessa. Rakenneteräksien kuumalujuuksille ei ole asetettu raja-arvoja. Lujuusarvon alarajan ylittävien tuotteiden hylkääminen nostaa painelaiteteräksen keskiarvolujuuden suuremmaksi kuin rakenneteräksen, vaikka kummankin materiaalin nimellislujuus olisi yhtä suuri. Rakenteen vaurioitumisriski kasvaa sitä suuremmaksi, mitä enemmän kuormituksen jakauma ylittää materiaalin lujuuden jakaumaa. Tällä tarkoitetaan sitä, että vaurioitumisriski kasvaa, kun materiaalin nimellislujuus on pienempi kuin samanhetkinen kuormitus. (Rakenneterästen mitoituslujuus jatkuvasti korkeissa lämpötiloissa 2009). Kuvassa 38 verrataan painelaitete- ja rakenneteräksen vaurioitumisriskiä kuumassa rakenteessa väritetyn pinta-alan avulla. Panielaiteteräksen kuvaajassa näkyy hylätyn materiaalin osuus. Kehyspalkkien materiaalivalinnassa otetaan huomioon grafitoituminen ja hilseily sekä käyttöikämitoitus.



KUVA 38. Teräsmateriaalin vaurioitumisriskiä kuvaavat pinta-alat kuumassa rakenteessa (Holopainen 2009-02-17)

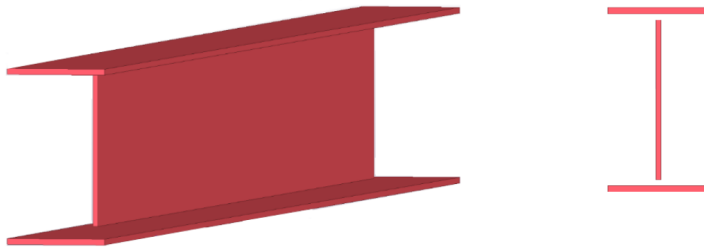
5.4 Kehyspalkkien valmistustapa

Kehyspalkit voidaan valmistaa valssattuina tai hitsattuina profiileina. Kehyspalkin teräsmateriaalin valinta sekä kustannukset vaikuttavat valmistustavan valintaan. Valssatut palkit ovat tehty hiiliteräksestä, jotka soveltuvat kuumiin lämpötiloihin rajoitetusti. Valssattuja profiileja käytettäessä kehyspalkin profiilit ovat standardisoituja rakenneteräskokoja. Kehyspalkin mitoittaminen käyttäen valssattua profiilia voi hankaloittaa palkin painon optimointia erityisesti isojen kehyspalkkien kohdalla. Valssatun palkin käyttö voisi olla taloudellista, mikäli ne olisivat huomattavasti halvempia kuin hitsatut profiilit. Kehyspalkkeihin hitsataan usein myös vahvistettuja levyjä uuman tilalle päätyliitoksia varten, minkä vuoksi valssattuun palkkiin on leikattava konepajalla aukot. Nurkkaliitoksia varten saatetaan joutua myös poistamaan paloja laipoista. Mikäli valssatuista teräsprofiileista ei löydy kehyspalkille sopivaa profiilia, on valmiin profiilin muokkaaminen työlästä. Sopivan valssatun profiilin käyttäminen kehyspalkkina voi olla edullisempaa itse palkin osalta, mutta mahdolliset leikkaukset uumassa ja laipoissa sekä osien muokkaaminen tuovat valmistukseen lisätyötä. Liitostyypeistä aiheutuvat leikkaukset on otettava huomioon jo kehyspalkin profiilityyppiä valittaessa. (Selecting Buckstay Profiles 2016). Kuvassa 39 on esimerkki valssatusta I-profiilista, mistä kehyspalkin valmistus aloitetaan. Kuvassa esitetään myös leikkauslinja, mistä kehyspalkin uumaa leikataan mahdollista liitoslevyä varten pyörityksen kohdalta.



KUVA 39. Valssattu I-profiili

Kehyspalkkien valmistaminen hitsattuna voi olla profiilivalinnan kannalta helpompaa. Profiili on levyosista valmistettu kokoonpano, jossa esivalmistetut levyosat hitsataan toisiinsa kiinni. Hitsattu profiili on mahdollista valmistaa painelaiteteräksestä. Kehyspalkin profiilia varten voidaan mitoittaa oikeankokoiset levyt, jolloin otetaan huomioon riittävä tilavaraus tarvittaville osille jo ennen valmistusta. Hitsattua profiilia käytettäessä kehyspalkki saadaan optimoitua juuri oikeankokoiseksi ja vältytään liian painavilta palkeilta. Hitsatusta profiilista saadaan yhtä luja tai lujempi, kuin samankokoisesta valssatusta profiilista. (Selecting Buckstay Profiles 2016). Kuvassa 40 on esimerkki hitsatusta I-profiilista, mistä kehyspalkin valmistus alkaa.



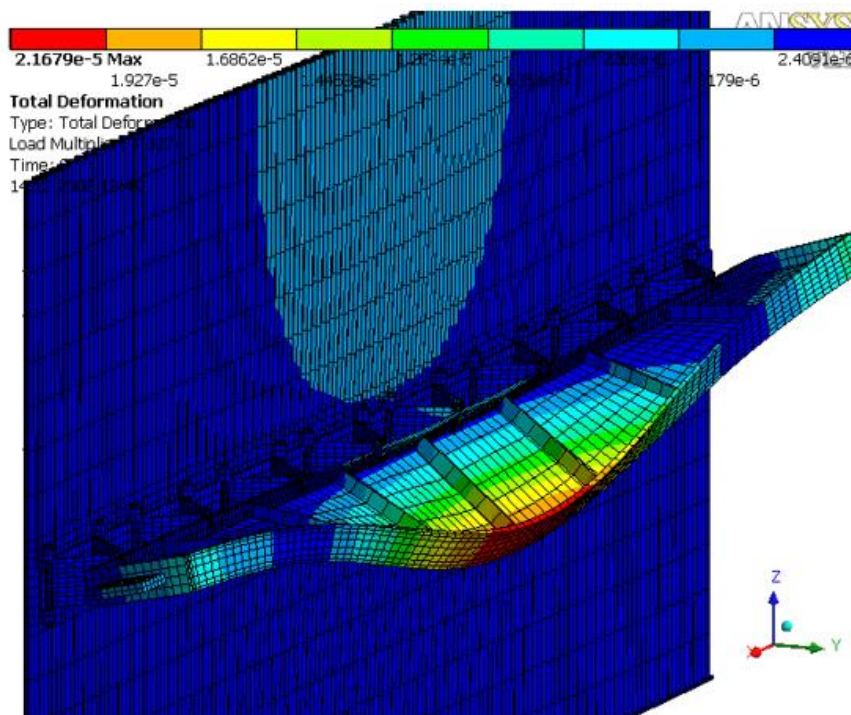
KUVA 40. Hitsattu I-profiili. Uuman osuutta on lyhennetty liitoslevyjä varten.

Suuren kokoluokan kattilassa voi olla jopa 1 000 000 kilon edestä kehyspalkkeja. Näin suuressa kokoluokassa on mahdollisuuksia säästää materiaalikustannuksissa, vähentää valmistuspainoja sekä vähentää kuljetuspainoja. Tällaisen kehyspalkkien optimoinnin tavoitteena on minimoida massat, sekä kulut materiaaleista, valmistuksesta, kuljetuksesta sekä asennuksesta. Rajoitteita kehyspalkkien optimoinnille luovat palkkien lujuus, stabiilius ja taipuma, putkipaneelin ja palkkien väriä sekä käytävissä oleva tila. Kehyspalkkeja voidaan kaventaa päistään, jolloin palkin keskiosasta tulee profiiltaan korkeampi. Palkin laipoista voidaan myös tehdä suppenevia. Sisäpuolen laipan supistaminen ei ole käytännöllistä johtuen kiinnityksestä putkipaneeliin. Kehyspalkin mittasuhteiden optimoinnin etuina on vähentynyt materiaalin käyttö, helpompi asentaminen sekä pienentyneet kuljetuskustannukset. Muuttuvasta poikkileikkauksesta kuitenkin seuraa muunmuassa suunnittelun hankaloitumista ja lisätyötä valmistukseen. (Selecting Buckstay Profiles 2016).

6 STABIILIUS

Oletettavasti mekaniikan systeemi on tasapainossa normaalitilassaan. Jos systeemiä häiritään, joutuu se pois tasapainostaan. Osan stabiiliuden varmistamisella pyritään varmistamaan käyttäytyminen, jossa tasapainotilan menettäminen ei pääse tapahtumaan ennen osalle suunnitellun kuormituksen ylittymistä. Stabiiliusteorian mukaisia, teräsrakenteiden kannalta tärkeitä epästabiilius ilmiöitä ovat nurjahdus, kiepahdus sekä levyn lommahdus. Näissä ilmiöissä osa menettää tasapainotilansa, eikä se toimi enää suunnitellusti.

Savukaasun paine kattilalaitteessa aiheuttaa putkipaneelin taipumaa paneelin tason suhteen. Tätä taipumaa rajoitetaan sitä varten suunnitelluilla kehyspalkkeilla. Koska kehyspalkit ovat kiinnitettyinä putkipaneeliin, ne vastustavat paneelin taipumia. Kun savukaasun paine aiheuttaa paneelille alipainetta, kehyspalkin sisemmälle osalle syntyy vetoa ja ulommalle osalle syntyy puristusta. Kuvassa 41 havainnollistetaan, miten kehyspalkin ulompi laippa käyttäytyy, kun siihen kohdistuu puristusta. Laitan nurjahduksen suunta voi olla kumpaan tahansa vertikaalipositioon päin. Kehyspalkin kannalta ilmiössä on kyse koko profiilin kiepahduksesta. (Buckstay Structural Training 2011).



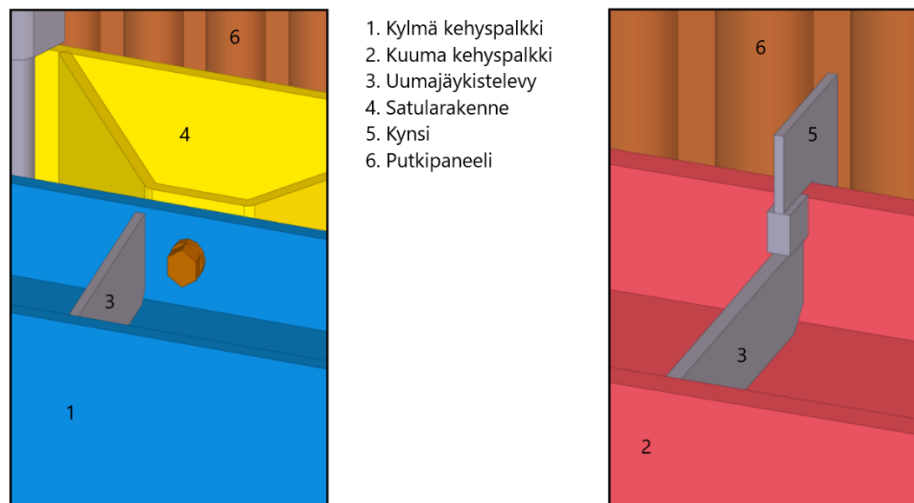
KUVA 41. Ulomman laipan nurjahdus (Holopainen 2010-11-22)

Korkeat ja hoikat profiilit tuottavat yleensä kustannustehokkaita kehyspalkkeja. Korkeat profiilit ovat alttiita kiepahdukselle. Mitä korkeampi ja hoikempi profiili on, sitä nurjahduserkempi sen laipasta tulee. Puristettu laippa on altis nurjahdukselle, mikäli sitä ei tueta. Kehyspalkin uuma on altis lommahdukselle. Kehyspalkkien stabiiliutta voidaan hallita profiilivalinnalla, jäykisteillä sekä vinotuilla. Kehyspalkin stabiiliuden varmistamista jäykisteillä ei tule vaatia, mikäli sille ei ole tarvetta. Tarve määritetään laskennan perusteella. Eräänlaisena nyrkkisääntönä on, että stabiilius varmistetaan jäy-

kisteillä kehyspalkin profiilikorkeuden ollessa yli 300 - 500 millimetriä. Alle tämän korkuisten kehyspalkkien stabiiliutta ei yleensä tarvitse varmistaa asentamalla siihen jäykisteitä. (Selecting Buckstay Profiles 2016).

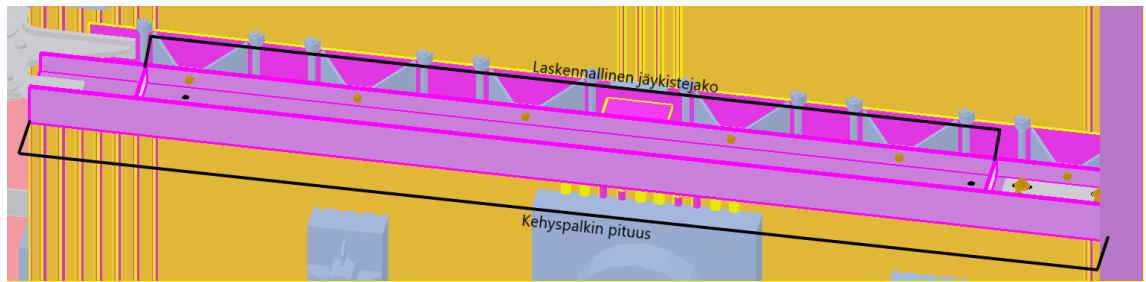
6.1 Kehyspalkkien stabiiliuden varmistaminen

Kehyspalkin stabiiliuden varmistamismenetelmä riippuu kehyspalkin tyypistä. Kehyspalkkien stabiiliutta voidaan varmistaa uumajäykisteillä sekä uumajäykisteisiin kiinnitetyillä diagonaali tuilla. Kehyspalkin mittasuhteiden valinnassa otetaan huomioon niiden edellyttämä stabiiliuden varmistus. Profiiliin matalan palkin tapauksessa voi riittää stabiiliuden varmistus uumajäykisteiden kanssa. Korkean palkin tapauksessa stabiiliuden varmistaminen toteutetaan vinojäykisteillä. Uumajäykisteitä käytettäessä levyt tulee sijoittaa kylmän kehyspalkin satuloiden välittömään läheisyyteen. Kuumen kehyspalkin stabiiliutta varmistavat uumajäykisteet sijoitetaan putkipaneeliin kynnen kohdalle. Uumajäykisteellä kehyspalkin ulompi laippa saadaan yhdistettyä putkipaneelin taivutusjäykkyyteen. Suurin sallittu stabiiliutta varmistavien uumajäykisteiden tai vinositeiden jako ilmoitetaan suunnittelijalle profiililistalla. Suunnittelija sijoittaa stabiiliutta varmistavat jäykisteet kehyspalkkeille siten, ettei niiden suurin sallittu jako ylity. (Stabilizing of Buckstay System Members 2019). Kuvassa 42 on esimerkki uumajäykisteiden sijoittamisesta kylmässä ja kuumassa kehyspalkissa.



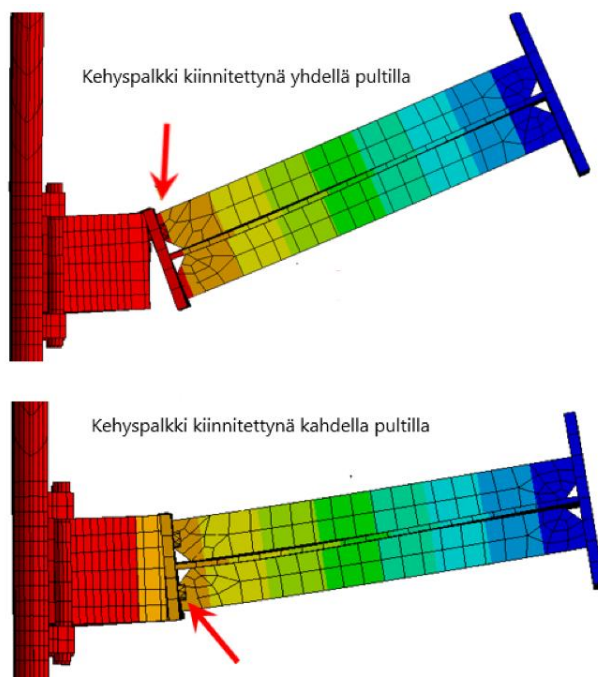
KUVA 42. Uumajäykisteiden sijoittaminen

Kehyspalkin ollessa lyhyt tai matala, voi jäykistejaosta tulla melkein yhtä suuri kuin palkin pituudesta. On myös mahdollista, että kehyspalkki ei laskennallisesti tarvitse uumajäykisteitä. Suunnittelija tekee tällöin harkinnanvaraisen päätöksen uumajäykisteiden tarpeellisuudesta muilla kuin lujuusteknisillä perusteilla. Kehyspalkin suurin taivutusmomentti sijaitsee yleensä sen keskialueella. Päädyissä sijaitsevilla jäykisteillä ei siitä syystä ole yhtä suurta merkitystä kehyspalkin stabiiliuden kannalta. Kehyspalkkeihin saattaa tarvita jäykistystä, vaikkei sitä olisi laskennallisesti todennettu tarpeelliseksi. Tällä estetään palkin roikkuminen. Kuvassa 43 on esimerkki kehyspalkin epätoivotusta jäykistejaosta. Jako on liian suuri palkille ja uumajäykisteet on sijoitettu liian kauas satularakenteen välittömästä läheisyydestä.



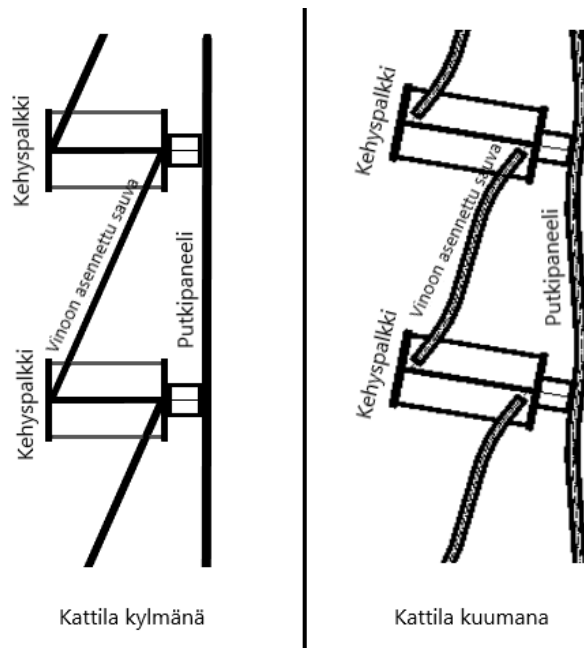
KUVA 43. Ei toivottu jäykistejako

Kylmä kehyspalkki kiinnitetään satulaan kahdella pultilla. Yhdellä pultilla kiinnitettäessä kehyspalkin ulompi laippa ei käytännössä saa satulan kautta lainkaan tukea nurjautamista vastaan. Kahden pultin kiinnityksen vaikutus stabiiliuteen esitetään kuvassa 44.



KUVA 44. Kahden pultin satulakiinnitys (Holopainen 2010-11-22)

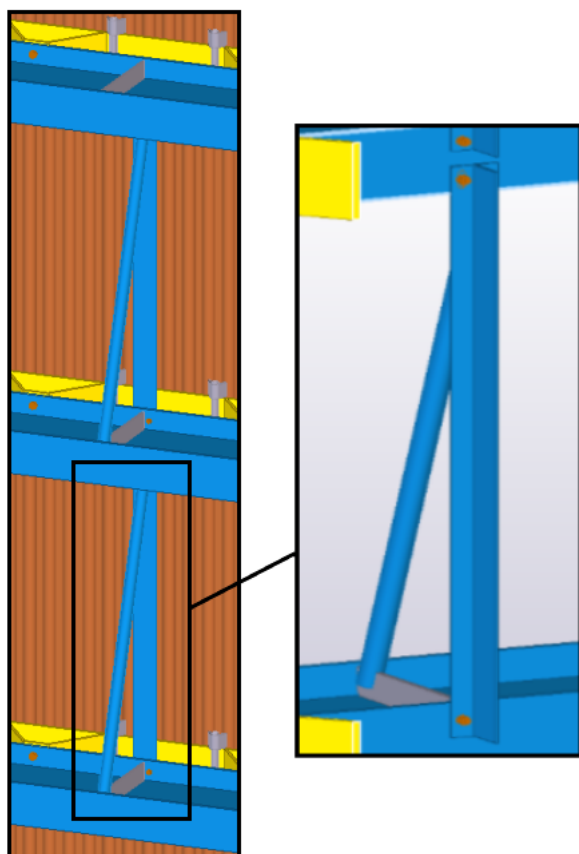
”Palkista palkkiin” -konseptissa kylmien kehyspalkkien on sallittu kallistuvan putkipaneelin taipumien mukana. ”Palkista pystyprofiiliin” -konseptissa diagonaalien käyttäminen T-rautaan yhdistettynä ei edellytä kehyspalkkien kallistumista. Kehyspalkkien ei tarvitse päästä kallistumaan Palkista pystyprofiiliin -konseptissa. (Stabilizing of Buckstay System Members 2019). Palkista palkkiin -konseptin toimintaperiaatetta kylmän kehyspalkin stabiiliuden varmistamisessa havainnollistetaan kuvalla 45. Osien muodonmuutokset johtuvat putkipaneelin lämpölaajenemisesta



KUVA 45. Palkista palkkiin -konsepti (Holopainen 2012-08-15)

Kylmien kehyspalkkien stabiiliutta on varmistettu kuvan 45 konseptissa sisälaipasta ulkolaippaan asennetulla sauvalla. Sauvoilla on oltava puristuslujuutta myös omaa nurjahdustaan vastaan, jotta ne voivat antaa tukea ulomman laipan ylöspäin suuntautuvaa nurjahdusta vastaan. (Stabilizing of Buckstay System Members 2019).

Palkista pystyprofiiliin -konseptissa kylmien kehyspalkkien välille tuleva T-rauta tarjoaa lämpölaajenemattoman kiinnityskohdan kylmän vinositeen yläpäälle. Profiililtaan korkeamman palkin kohdalla tarvitaan vinositeitä. Vinositeet voidaan sijoittaa vapaasti lujuuslaskelmien perusteella, joten niitä ei tarvitse sijoittaa satuloiden välittömään läheisyyteen. Profiilin mittasuhteet valitaan siten, että vinositeitä tulee palkille sopusuhtainen määrä. Uumajäkisteellä tuotetaan liitos vinosauvan ja kehyspalkin ulomman laipan välille. T-rauta kiinnitetään kehyspalkkien välille pulttiliitoksin ja ylemmän kehyspalkin kiinnitystä varten T-rautaan tehdään soikeat reiät. Kun kehyspalkin ulompi laippa pyrkii nurjahtamaan alaspäin, vinosauvalle kohdistuu vetoa. Vinosauvan yläpää tukeutuu T-profiiliin, jolloin vinosauvan tukireaktio aiheuttaa pystysuuntaista puristusta. Tästä syystä käytettävälle T-profiilille tehdään nurjahdustarkastus. Uumajäkistelevyt ja T-profiilit sijoitetaan kehyspalkkiin vinosauvojen kohdalle. Vinosauvojen jako lasketaan, jonka jälkeen niille valitaan sijainnit. Diagonaali toimii stabiiliutta varmistavana osana tällaisessa jäykistystyylissä. Diagonaali kiinnitetään päistään uumalevyyn ja T-profiiliin hitsaamalla. (Stabilizing of Buckstay System Members 2019). Kuvassa 46 havainnollistetaan kylmän kehyspalkin stabiiliuden varmistamista vinosauvalla.



KUVA 46. Palkista pystyprofiiliin -konsepti. Oikeanpuoleisesta kuvasta on poistettu putkipaneeli.

7 KEHYSPALKKILASKENTAMALLI

Kehyspalkkijärjestelmän rakennesuunnittelun kokonaisuudessaan hallitsevien osajien määrä on rajallinen. Kehyspalkkien voimapolut ovat epäselviä tai näkymättömiä monelle projektiin osallistuvalla. Rakennesuunnittelijan on ymmärrettävä mistä voimat tulevat, miten ne siirtyvät, mihin voimat ovat menossa sekä miten estetään systeemin muuttumista mekanismiksi. Kehyspalkeista tuotetaan niiden toimintaa kuvaava laskentamalli, jotta suunnitteluprosessin myöhemmissä vaiheissa ei enää tarvita rakennejärjestelmän kokonaisosaamista. Tavoitteena on, että laskentamallin käyttöä osaava henkilö voisi osallistua kehyspalkkien suunnitteluun ilman kokonaisosaamista. Samanlaista lähestymistapaa hyödynnetään myös teräsrakenteiden perussuunnittelussa. (Buckstay Beam Element Modeling 2015).

Kehyspalkkilaskentamallin tavoitteena on havainnollistaa tarpeelliset elementit kuormien siirrossa. Laskentamallissa tuotetaan kuormat kehyspalkeille, kehyspalkkiliitoksille, satulalatoille, kampalevyille sekä muille osille. Laskentamallilla pystytään määrittämään kehyspalkkien koot sekä sijainnit ja satulalattojen profiilit. Siitä saadaan myös linkkujen, kampalevyjen sekä leikkauslevyjen sijainnit. Jos jotain kehyspalkkia ei pystytä mitoittamaan laskentamallissa, se mitoitetaan erillisellä kehyspalkin mitoitustyökälulla. Esimerkiksi poikkileikkausluokkaan PL4 kuuluville palkeille ei kaupallisissa palkkielementtiohjelmassa useinkaan ole riittävää toiminnallisuutta. Laskentamallia voidaan myös hyödyntää palautinjalan tukireaktioiden määrittämiseen. Usein palautinjalan tuenta toteutetaan tulipesän kautta. (Buckstay Beam Element Modeling 2015).

Kaikki kuormien siirron kannalta tärkeät elementit tulee esiintyä laskentamallissa. Kehyspalkkimalli helpottaa kuormien määrittämistä. Esimerkiksi varusteosista tulevat kuormat ovat helpommin käsiteltäviä. Myös tarvittavat kuormitusyhdistelmät ovat helposti luotavissa peruskuormista. Kehyspalkkimallin kuormien määrittämistapa on yhteneväinen teräsrakenteen suunnittelun kanssa. Laskentamallista on nähtävissä järjestelmän kuorman siirron kannalta tarpeelliset ja ei-tarpeelliset osat. Se myös mahdollistaa vapaammat kädet kehyspalkkijärjestelmän suunnittelun kannalta, koska sillä pystytään muuttamaan järjestelmää tarpeen tullen. Laskentamalli mahdollistaa momenttijäykkien runkojen paremman hyödyntämisen, josta on apua etenkin erottimen kehyspalkiston sijoittelussa. (Buckstay Beam Element Modeling 2015).

7.1 Layout-piirustuksen korvaaminen

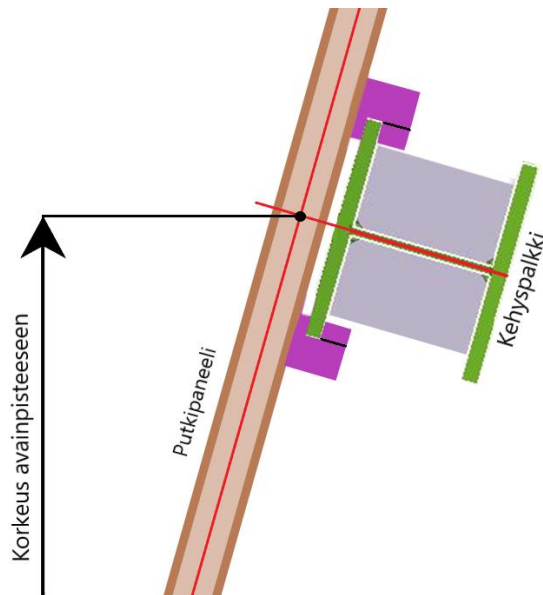
Aikaisemmin kehyspalkeista tuotettu Layout-piirustus ks. kuva 36, sisälsi kaiken oleellisen esivalintavaiheen tiedon kehyspalkkien laskentamallin luomiseen. Layout-piirustuksen laatiminen vaatii saman rakenneteknisen osaamisen, kuin laskentamallin tekeminen. Tulevaisuudessa on tarkoituksena siirtyä pois piirustuksen tekemisestä ja korvata se laskentamallilla. Layout-piirustuksen korvaamiseksi tarkastellaan tapoja raportoida kehyspalkkien "Design Dataa" (DData), eli suunnittelussa käytettävää tietoa laskentamallilla tuotettuna. Tarkoituksena on raportoida kaikki tiedot, joita kehyspalkkisuunnittelija tarvitsee ja mitkä ovat olleet aikaisemmin saatavissa piirustuksesta.

Ennen kuin Staad-mallintamistekniikka otettiin käyttöön, layout-piirustuksella ja sitä tukevalla dokumentaatiolla esitettiin kehyspalkkisuunnittelijan tarvitsemat DData. Näitä tietoja olivat kehyspalkkien sijainnit ja jakovälit, kehyspalkkien tyypit, etäisyydet paneeliputken harjan ja kehyspalkkien välillä, kehyspalkkien tunnisteet profiilin määrittystä varten sekä stabiiliutta varmentava menetelmä ja niihin käytettävien jäykisteiden jakoväli. Kiinteänä osana ”buckstay system layout deliverables”, eli kehyspalkkien suunnitteludokumentaatiota on aina kuulunut kehyspalkkiprofilien listaus. Myös esimerkiksi kuumaksi tai kylmäksi tarkoitettujen liitososien detaljeja lisättiin layout-piirustukseen havainnollistamaan oikeanlaista eristämistapaa, mistä on esimerkki kuvassa 36. Tällöin liitosten mitoitus kuului BSE-ryhmän töihin. Kuvassa 47 esitetään esimerkki layout-piirustuksen liitteenä olevan dokumentaation sisällöstä.

	Minimum allowed height of profile	Inner flange thickness	Inner flange width	Outer flange thickness	Outer flange width	Web thickness	Hot/Cold Buckstay	0 = no saddle 1 = is saddle	lateral support: 0 = outer flange with web stiffeners 1 = outer flange with bracing	max spacing of outer flange bracing/stiffening (mm)	Distance from tube crown	Clamp type	Material	Weight of profile
	hbs (mm)	sif (mm)	bif (mm)	sof (mm)	bof (mm)	sw (mm)								
Fur. FW5	620 mm	16.0 mm	500 mm	16.0 mm	500 mm	8.0 mm	Hot	0	0	4 224 mm	12 mm	a1	Q345B	162.5 kg/m

KUVA 47. Layout-piirustuksen liite (Buckstay Profile Sizing)

Kehyspalkkien Staad-toimintamallin myötä liitosten mitoitus siirtyi Tekla-tiimin työksi vuonna 2015. Tähän kuuluu nykyään myös liitosten eristyslinjojen määrittäminen liitosten mitoituksessa huomioon otettavana asiana. Layout-piirustuksen tuottaminen on poistettu laskentamallin myötä buckstay system layout deliverablesta. Laskentamallista saatavaa renderöityä havainnemallia voidaan hyödyntää layout-piirustuksella aiemmin esitettyjen tietojen tuottamiseen. Laskentamalli esitettiin aiemmin kuvassa 37. Laskentamallin tekijän työsuoritteeseen kuuluu kehyspalkkien mitoitus excelillä sekä laskentamallilla. Laskentamallia hyödynnetään kaikkiin niihin osiin, joihin ei ole tehty excel-työkalua. Näitä ovat esimerkiksi kylmien kehyspalkkien päätyliitosten linkut sekä kylmien kehyspalkkien leikkauslevyt. Laskentamallin tekijän työsuoritteeseen kuuluu myös buckstay system layout deliverablen tuottaminen, sekä kampalevy- ja nurkkaliitosvoimien dokumentointi. Myös liitossuunnittelijan ohjeistaminen työkaluilla sekä viittauksilla DSM, eli Design Standard Manual -ohjeisiin kuuluu laskentamallin tekijälle. Kehyspalkkien erittely kuumiin ja kylmiin riittää pelkän profiilin osalta. Lisäksi kynsityypin määrittäminen sekä kehyspalkin korkoaseman määrittäminen avainpisteen avulla kuuluu laskentamallin tekijälle. Avainpiste-korkoasema esitetään kuvassa 48 kaltevan putkipaneelin ja siihen asennetun kehyspalkin avulla.



KUVA 48. Avainpisteen sijainti

Kuvan 48 avainpisteen merkitys korostuu varsinkin vinolla seinällä olevan vinoon asetetun kehyspalkin korkoaseman määrittämisessä. Avainpisteen avulla korkoasema voidaan määrittää putkipaneelin keskilinjan ja kehyspalkin leikkauspisteen mukaan. Tällöin ei tarvitse miettiä mitataanko korkoasema kehyspalkin sisä- vai ulkolaipasta tai uumasta. Tavoitteena on antaa kehyspalkin sijaintitiedot 0,1 metrin tarkkuudella ja avainpisteen korko on yksi tärkeimmistä sijaintitiedoista.

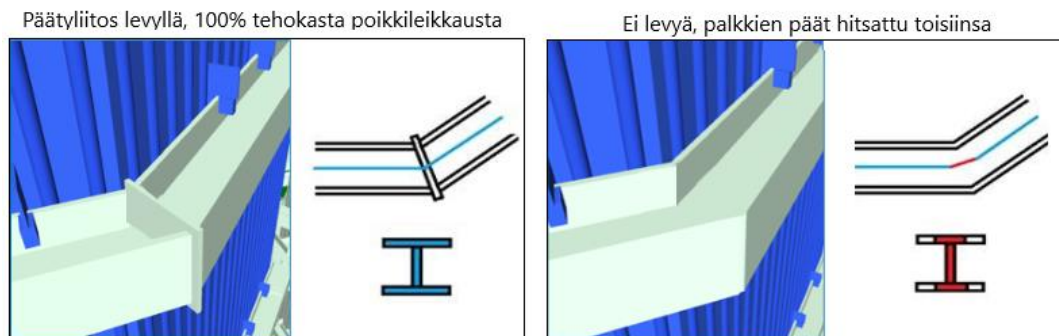
7.2 Liitosvoimien käsittely

Tekla-tiimi vastaa kehyspalkkien liitosmitoituksesta laskentamallin tekijän dokumentoinnin pohjalta. Liitosvoimien dokumentointiin voidaan käyttää kahta tapaa: tuottamalla excel-tiedosto tai tarjoamalla liitoslaskijoille laskentamalli. Excel-tiedoston lisäksi liitossuunnittelijalle tulee tarjota jokin havainnollistava kuva, jotta kehyspalkkeja koskevat voimat lasketaan oikeille palkeille. Liitosvoimien dokumentointiin excel-taulukko toimii yksinkertaisten liitosten kohdalla hyvin. Riskinä tällaisessa on kuitenkin se, ettei toiselta kehyspalkilta tulevia voimia välttämättä oteta huomioon liitoksen mitoittamisessa. Kuten aiemmin kuvassa 27 on esitetty, kehyspalkin päätyliitokseen tulee voimia kahdesta eri suunnasta. Kuvassa 49 on esimerkki liitosvoimataulukon sisällöstä, jossa esitetään etu- ja sivuseinän kehyspalkkien liitosvoimia samaan päätyliitokseen. Kehyspalkkien välisiin päätyliitoksiin kohdistuvat voimat eri seinien kehyspalkeilta on merkitty kuvaan samalla värillä. Liitos mitoitetaan näiden voimien resultanteille, kuten kuvassa 27 on esitetty.

DESIGN DATA			
BUCKSTAY NAME	JOINT DESCRIPTION	PARALLEL FORCE (kN)	PERPENDICULAR FORCE (kN)
Fur_FW1	middle joints hot-hot corners / End joints	± 68 kN	± 181 kN
Fur_FW2	middle joints hot-hot corners / End joints	± 73 kN	± 192 kN
Fur_FW3	middle joints hot-hot corners / End joints	± 75 kN	± 196 kN
Fu_FW4	middle joints hot-hot corners / End joints	± 80 kN	± 206 kN
Fur_FW5	middle joints hot-hot corners / End joints	± 98 kN	± 258 kN
DESIGN DATA			
BUCKSTAY NAME	JOINT DESCRIPTION	PARALLEL FORCE (kN)	PERPENDICULAR FORCE (kN)
Fur_SW1	middle joints hot-hot corners / End joints	± 181 kN	± 83 kN
Fur_SW2	middle joints hot-hot corners / End joints	± 192 kN	± 87 kN
Fur_SW3	middle joints hot-hot corners / End joints	± 196 kN	± 93 kN
Fur_SW4	middle joints hot-hot corners / End joints	± 206 kN	± 99 kN
Fur_SW5	middle joints hot-hot corners / End joints	± 252 kN	± 120 kN

KUVA 49. Liitosvoimataulukko-esimerkki (Scallop and Corner Connection Forces)

On olemassa myös tapauksia, jossa laskentamallin tekijä voisi vastata joidenkin liitosten mitoituksesta. Tällaisista esimerkkinä voidaan käyttää erottimen kehänurkkien välisiä liitoksia. Yleensä nämä liitokset toteutetaan siten, että palkkien päädyt liitetään toisiinsa levyllä. Tällöin kehyspalkkien välisessä liitoksessa on 100 prosenttia tehokasta poikkileikkauslevyyttä taivutusmomenttia vastaan. Liitos voidaan toteuttaa myös siten, että palkkien päät hitsataan suoraan toisiinsa ilman välilevyä. Tällöin liitos mitoitetaan käyttäen Reduced Section, eli redusoitu poikkileikkaus -laskentatapaa. Laskentamallin tekijä valitsee käytettävän liitostyyppin ja mitoittaa sen laskentaohjelmalla, jolloin liitossuunnittelija ei vastaa liitoksen mitoittamisesta. (S1 SMG Buckstay Staad Model 2020). Kuvassa 50 on esimerkki erottimen kehänurkasta molemmilla eri liitostyypleillä, sekä havainnollistava kuva Reduced Section-osuudesta liitoksessa.



KUVA 50. Erottimen kehänurkan liitos (Kumar 2020-02-24)

8 TULOKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tuloksena saatiin raportti, mihin on koottu tilaajan tietämystä raportissa esiintyvistä aiheista yksiin kansiin. Raportissa esitetyistä aiheista on saatavissa peruskäsitys kattilalaitteista, kehyspalkeista sekä kehyspalkkien suunnittelusta. Opinnäytetyön tuloksena saatu raportti toimii hyvänä pohjana tilaajalle tulevaisuudessa tehtävälle manuaalille. Manuaalin tarkoituksena on opastaa kehyspalkkien suunnittelua.

Opinnäytetyön tekeminen sujui kaikin puolin hyvin. Aihepiirin mielenkiintoisuus auttoi eteenpäin itseopiskelussa sekä raportin kirjoittamisessa. Mikäli työnteon puitteissa heräsi kysymyksiä tai jotain asiaa ei ymmärtänyt, oli tilaajan puolelta ohjaaja aina valmiina auttamaan ja neuvomaan. Suurimmaksi ongelmakohtaksi työn tekemisessä nousi ajoittain aiheisiin liittyvä ymmärryksen puute sekä nopea aikataulu näin laajalle aiheelle. Raportin kirjoittamisessa hyödynnettyjen aineistojen etsiminen tilaajan tietokannasta oli työlästä, koska aineistoa on kertynyt vuosien varrella melkoinen määrä. Osasta aiheita ei ollut saatavilla yksityiskohtaista kirjallista aineistoa ja täysin uuden asian oppiminen ja säistäminen vei aikaa.

Olen tyytyväinen opinnäytetyöni lopputulokseen, vaikka aina löytyy kehitettävää. Olen myös kiitollinen tilaisuudesta tehdä opinnäytetyöni kansainvälisessä yrityksessä ja mahdollisuudesta oppia uutta sekä parantaa omaa ammattiosaamistani rakennesuunnittelijana. Uskon, että opinnäytetyöstäni löytyy monille mielenkiintoisia aiheita. Toivottavasti opinnäytetyöni innostaisi uusia osaajia kattilatekniikan sekä rakennesuunnittelun pariin. Tämän kaltaista opinnäytetyön aihetta ammattikorkeakouluopiskelijalle on harvemmin tarjolla.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

AMEC FOSTER WHEELER. 2015. Aali, Janne. Integrated Guide System of Furnace and Separator [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

AMEC FOSTER WHEELER. 2015. Pollari, Jussi. Buckstay beam element modelling [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

AMEC FOSTER WHEELER. 2016. Aali, Janne. Buckstay System Lay-out [Powerpoint-esitys]. Shanghai. Dokumentti yrityksen hallussa.

AMEC FOSTER WHEELER. 2016. Pollari, Jussi. Buckstay Material selection and Substitution [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

AMEC FOSTER WHEELER. 2016. Pollari, Jussi. Design of pressure supports of power boilers with process typical to steel structure design [PDF-tiedosto]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2009. Holopainen, Heikki. Rakenneterästen mitoituslujuus jatkuvasti korkeissa lämpötiloissa [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2011. Holopainen, Heikki. Boiler Structural Training: Buckstays [Powerpoint-esitys]. Shanghai. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2012. Holopainen, Heikki. CFB Training for Licensees Boiler Structural Engineering (Essar) [Powerpoint-esitys]. Mumbai. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2012. Holopainen, Heikki. Seismic Training of Boiler Structures [Powerpoint-esitys]. Shanghai. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2013. Holopainen, Heikki. Boiler Structural Engineering Osastopalaveri [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2013. Holopainen, Heikki. Korkeiden laitteiden ja rakennuksen välinen rakenteellinen vuorovaikutus [PDF-tiedosto]. Teräsrakenneyhdistys.fi. Saatavissa: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/117/1d136a0/hho_2013_05_29_korkeiden_laitteiden_ja_rakennuksen_vlinen.pdf

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2014. Holopainen, Heikki. Design of Insulations from Structural Point of View [Powerpoint-esitys]. Shanghai. Dokumentti yrityksen hallussa.

FOSTER WHEELER ENERGIA OY. 2014. Pollari, Jussi. Sacrificial Boiler Guide Beams [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2016. Holopainen, Heikki. Selecting Buckstay Profiles [Powerpoint-esitys]. Noida. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2015. Pollari, Jussi. Buckstay Analysis Criteria [Word-tiedosto]. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2018. Matilainen, Jussi-Pekka. Structural Interaction and Representative Modelling [Powerpoint-esitys]. Mumbai. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2018. Matilainen, Jussi-Pekka. Interaction Models and Boiler Hanger Rod Balancing [Powerpoint-esitys]. Mumbai. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2018. Nevalainen, Teemu. SFW CFB Boiler Technology [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2019. Holopainen, Heikki. Stabilizing of Buckstay System Members [Powerpoint-esitys]. Noida. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2019. Holopainen, Heikki. Integrated Guide System of Furnace and Separator [Powerpoint-esitys]. Noida. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2019. Holopainen, Heikki. Buckstay Spacing and Layout [Powerpoint-esitys]. Noida. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. 2019. Kumar, Vishal. Buckstay and Return Leg Staad Modelling [Powerpoint-esitys]. Noida. Dokumentti yrityksen hallussa.

SUMITOMO SHI FW. Company Factsheet [verkkoaineisto]. Sumitomo SHI FW [viitattu 2020-03-04]. Saatavissa: <https://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/2019/06/Sumitomo-SHI-FW-CompanyFactsheet.pdf>

SUMITOMO SHI FW. 2020. Kumar, Vishal. S1 SMG Buckstay STAAD Model [Powerpoint-esitys]. Varkaus. Dokumentti yrityksen hallussa.

KUVAT 3, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 43, 46, 48 ovat tekijän itse opinnäytetyötä varten tekemiä tai ottamia kuvia.