

Milla Uusitalo

Kattilan kannatusrakenteen verifiointi

Kattilan kannatusrakenteen verifiointi

Milla Uusitalo
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Milla Uusitalo

Opinnäytetyön nimi: Kattilan kannatusrakenteen verifointi

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: The verification of the boiler support structure

Työn ohjaajat: DI Juho-Martti Vinkki (OAMK) ja DI Juhamatti Alaluusua (Ramboll Finland Oy)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 66

Teräsrakenteiden uudelleenkäyttö on olennainen askel kohti kestävämpää tulevaisuutta, erityisesti teollisuusrakentamisen kontekstissa. Tässä tutkimuksessa keskityttiin Salmisaaren A-voimalaitoksen K7-kattilan kannatinrakenteiden verifointiin, kun voimalaitosta muunnetaan polttoainekonversion myötä kuplapetikattilaksi. Projektin yhteydessä tarkasteltiin olemassa olevien kannatinrakenteiden kestävyyttä.

Kannatinrakenteisiin kuuluivat kattilapilarit, -palkit ja tertiäripalkit, jotka mitoitettiin STAAD.pro-analyysohjelman avulla elementtimenetelmään perustuen. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti kattilapilareiden ja kattilapalkkien mitoitukseen, joka toteutettiin eurokoodin mukaisesti. Tarvittavat oletukset olemassa olevien teräsrakenteiden kestävydestä perustuivat pääasiassa Teräsrakenneyhdistyksen ja Mekaniska Verkstädernas Riksförbund:n julkaisuihin sekä alan asiantuntijoiden kokemukseen.

Kannatinrakenteen mitoituksen avulla arvioitiin rakenteen stabiilisuutta ja kestävyyttä ottaen huomioon sekä nykyiset että uuden teknologian aiheuttamat kuormat. Tutkimuksen tuloksena pyrittiin varmistamaan, että kattilan kannatinrakenteet vastaavat kestävä kehityksen vaatimuksia ja kestävät myös tulevaisuuden haasteita. Opinnäytetyö oli osa Ramboll Finland Oy:n projektia ja edisti kestävä kehityksen tavoitteita teräsrakenteiden uudelleenkäyttöä koskevissa hankkeissa.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House building Engineering

Author: Milla Uusitalo

Title of thesis: The verification of the boiler support structure

Supervisors: MSc Juho-Martti Vinkki (OAMK) and MSc Juhamatti Alaluusua (Ramboll Finland Oy)

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 66

The reuse of steel structures is a crucial step towards a more sustainable future, especially in the context of industrial construction. This study focused on verifying the support structures of the K7 boiler at the Salmisaari A-Power Plant as the plant undergoes a fuel conversion to a fluidized bed boiler. The project included an examination of the durability of the existing support structures.

The support structures consisted of boiler columns, boiler beams, and tertiary beams, which were dimensioned using the STAAD.pro analysis software based on the finite element method. The study particularly emphasized the dimensioning of boiler columns and boiler beams, adhering to Eurocode standards. Assumptions regarding the durability of existing steel structures were primarily based on publications from the Teräsrakenneyhdistys and the Mekaniska Verkstädernas Riksförbund as well as expert knowledge in the field.

Through structural dimensioning, the study evaluated the stability and durability of the support structure, considering both current and new technology-induced loads. The research aimed to ensure that the boiler's support structures met the requirements of sustainable development and could withstand future challenges. This thesis was part of a project undertaken by Ramboll Finland Oy, contributing to the goals of sustainable development in projects involving the reuse of steel structures.

Keywords: boiler plants, steel frame, steel structural design

ALKULAUSE

Haluan aluksi esittää sydämelliset kiitokseni perheelleni ja luokkakavereilleni heidän jatkuvasta tuestaan ja kannustuksestaan.

Kiitokset myös ohjaavalle opettajalleni diplomi-insinööri Juho-Martti Vinkille, joka on johdattanut minua ammatillisessa kasvussani ja tarjonnut arvokasta palautetta sekä ohjausta.

Esitän kiitokseni myös Rambollissa toimivalle projektipäällikölleni, diplomi-insinööri Juho Liiakselle, sekä lähiesimiehelleni, diplomi-insinööri Juhamatti Alaluusuelle. Heidän joustavuutensa, kannustuksensa ja ammattitaitonsa ovat mahdollistaneet opinnäytetyöni sujuvan etenemisen.

Lopuksi haluan osoittaa syvän kiitollisuuteni Rambollille, joka on tarjonnut minulle ainutlaatuisen mahdollisuuden soveltaa oppimaani käytäntöön ja tukenut opinnäytetyöprosessiani monin tavoin. Ramboll on ollut innostava ympäristö kasvaa ammatillisesti ja kehittyä urallani, ja arvostan syvästi heidän panostaan ja tukeaan.

Oulussa 3.5.2024



Milla Uusitalo

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	15
2	SALMISAAREN VOIMALAITOS	16
2.1	Pölypoltto.....	18
2.2	Kuplapetikattila, BFB	20
3	KATTILAN KAANNATINRAKENTEET	22
3.1	Kattilapalkit, tertiäärikannattajat ja kattilapilarit	23
3.2	Kattilan kannatus	24
3.3	Kannatinrakenteen jäykistys	26
4	TERÄKSEN UUDELLEENKÄYTTÖ	28
4.1	Kelpoisuuden osoittaminen	28
4.2	Käytettävä materiaali	30
4.3	Lähtötietona laserkeilaus.....	30
5	SUUNNITTELUPERUSTEET	32
5.1	Käytettävät ohjelmat	32
5.2	Seuraamusluokka	32
5.3	Sallitut siirtymät ja taipumat.....	33
5.4	Kuormitusyhdistelmät	33
5.4.1	Murtorajatila	34
5.4.2	Käyttörajatila	35
6	KUORMITUKSET	36
6.1	Pysyvät kuormat	36
6.2	Muuttuvat kuormat	37
6.3	Laitte- ja putkistokuormat	37
6.4	Lisävaakavoimat	37
7	KATTILAN KANNATUSRAKENTEEN VERIFIOINTI	39
7.1	Poikkileikkausluokka.....	39
7.2	Kattilapilarien mitoitus.....	42
7.2.1	Nurjahduskestävyys.....	42

7.2.2	Vääntö	45
7.2.3	Taivutus ja aksiaalinen voima	46
7.2.4	Aksiaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus puristetussa poikkileikkauksessa	49
7.2.5	Leikkaus	51
7.3	Kattilapalkkien mitoitus	52
7.3.1	Nurjahduskestävyys.....	52
7.3.2	Taivutus ja aksiaalinen voima	52
7.3.3	Leikkaus	54
7.3.4	Kiepahdus	55
8	TULOSTEN JOHTOPÄÄTÖS	58
9	YHTEENVETO	64
	LÄHTEET.....	65

SANASTO

verifiointi	Prosessi, jolla varmistetaan, että jokin asia täyttää sille asetetut vaatimukset ja standardit
polttoainekonversio	Prosessi, jossa muutetaan polttoaine toiseen energianlähteeseen, esimerkiksi kivihiilestä puuperäiseen pellettiin
3D-malli	Kolmiulotteinen digitaalinen mallinnus
LBT	Eng. Lateral Torsional Buckling eli kiepahdus
BIM	Eng. Building Information Modeling eli rakennuksen tietomalli
FEM	Eng. Finite Element Method eli elementtimenetelmä
$G_{kj,inf}$	Edullinen pysyvän kuorman ominaisarvo
$G_{kj,sup}$	Epäedullinen pysyvän kuorman ominaisarvo
K_{FI}	Seuraamusluokasta johtuva ominaisarvo
$Q_{k,i}$	Muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo
$Q_{k,1}$	Määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$\psi_{0,i}$	Muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\psi_{1,1}$	Määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\psi_{2,i}$	Muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

j	Pysyvän kuorman indeksi
i	Muuttuvan kuorman indeksi
G_{kj}	Pysyvän kuorman ominaisarvo
γ_{M0}	Poikkileikkausluokasta riippumaton poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku
γ_{M1}	Sauvan stabilisuustarkastuksissa käytettävä kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M2}	Poikkileikkausten kestävyys vetomurtuman suhteen
$\bar{\lambda}$	Nurjahduskestävyyden tarkastelussa käytettävä muunnettu hoikkuus
N_{Ed}	Normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{b,Rd}$	Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
χ	Nurjahduskestävyyden tarkastelussa käytettävä pienennystekijä
A	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	Poikkileikkauksen nimellinen myötöraja
Φ	Muuttuja, jota tarvitaan pienennystekijän χ määrittämisessä
N_{cr}	Nurjahdusmuodon kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma, mikä perustuu bruttopoikkileikkauksen ominaisuuksiin.
α	Epätarkkuustekijä

a_0, a, b, c ja d	Nurjahduskäyrän tunnuks
$y-y$	Poikkileikkauksen akseli
$z-z$	Poikkileikkauksen akseli
$\sigma_{x,Ed}$	Pituussuuntaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
$\sigma_{z,Ed}$	Poikittaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
τ_{Ed}	Paikallisen leikkausjännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
N_{Rd}	Normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo
$M_{y,Ed}$	Taivutusmomentin mitoitusarvo $y-y$ -akselin suhteen
$M_{y,Rd}$	Taivutusmomenttikestävyyden mitoitusarvo $y-y$ -akselin suhteen
$M_{z,Ed}$	Taivutusmomentin mitoitusarvo $z-z$ -akselin suhteen
$M_{z,Rd}$	Taivutusmomenttikestävyyden mitoitusarvo $y-y$ - akselin suhteen
M_{Ed}	Taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
$M_{N,Rd}$	Pienennetty taivutusmomenttikestävyyden mitoitusarvo, jossa otettu huomioon normaalivoiman vaikutus
b	Poikkileikkauksen kokonaisleveys
t	Seinämän paksuus

h	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
$N_{pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo
$M_{y,N,Rd}$	Aksiaalivoiman vaikutuksesta pienentynyt poikkileikkauksen taivutuskestävyys y-y-akselin suhteen
$M_{y,pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys y-y-akselin suunnassa
$M_{z,N,Rd}$	Aksiaalivoiman vaikutuksesta pienentynyt poikkileikkauksen taivutuskestävyys z-z-akselin suhteen
$M_{z,pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys z-z-akselin suunnassa
n	Normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyyden mitoitusarvon suhde
a_f	$M_{z,N,Rd}$ määrittämiseen tarvittava muuttuja
a_w	$M_{y,N,Rd}$ määrittämiseen tarvittava muuttuja
$\Delta M_{z,Ed}$	painopisteen siirtymisestä z-z- akselin suhteen aiheutuva momentti
$\Delta M_{y,Ed}$	Painopisteen siirtymisestä y-y- akselin suhteen aiheutuva momentti
k_{yy}	Yhteisvaikutustekijä
k_{yz}	Yhteisvaikutustekijä
k_{zy}	Yhteisvaikutustekijä

k_{zz}	Yhteisvaikutustekijä
χ_y	Taivutusnurjahduksen pienennystekijä y-y- akselin suhteen
χ_z	Taivutusnurjahduksen pienennystekijä z-z- akselin suhteen
χ_{LT}	Kiepahduskestävyyden pienennystekijä
N_{Rk}	Puristuskestävyyden ominaisarvo
$M_{y,Rk}$	Taivutuskestävyyden ominaisarvo y-y- akselin suhteen
$M_{z,Rk}$	Taivutuskestävyyden ominaisarvo z-z- akselin suhteen
A_{eff}	Tehollinen pinta-ala
$e_{N,y}$	Tehollisen pinta-alan A_{eff} painopisteen siirtymä suhteessa brutto-poikkileikkauksen painopisteeseen y-y-akselin suhteen
$e_{N,z}$	Tehollisen pinta-alan A_{eff} painopisteen siirtymä suhteessa brutto-poikkileikkauksen painopisteeseen x-x-akselin suhteen
$W_{eff,z}$	Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus z-z-akselin suhteen
$W_{eff,y}$	Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus y-y-akselin suhteen
A_i	Plastisuusteorian mukainen poikkileikkauksala
W_y	Taivutusvastus y-y-akselin suhteen
W_z	Taivutusvastus z-z-akselin suhteen
$W_{pl,y}$	Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus y-y-akselin suhteen

$W_{pl,z}$	Plastisuusteorian mukainen taivutusvastus z-z-akselin suhteen
V_{Ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo
V_{Rd}	Poikkileikkauksen leikkauskestävyys
$V_{pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys
A_v	Leikkauspinta-ala
t_f	Laipan paksuus
b_f	Laipan leveys
h_w	Uuman korkeus
t_w	Uuman paksuus
α	Kaksiakselisen taivutuksen vaikutuksen huomioonottava parametri
β	Kaksiakselisen taivutuksen vaikutuksen huomioonottava parametri
a	Poikkileikkauksen uuman pinta-alan ja bruttopinta-alan suhde
$M_{b,Rd}$	Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo
χ_{LT}	Kiepahduskestävyyden pienennystekijä
$\bar{\lambda}_{LT}$	Muunnettu hoikkuus kiepahdukselle
M_{cr}	Kimnoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa
ϕ_{LT}	Muuttuja, jota tarvitaan pienennystekijän χ_{LT} määrittämisessä

α_{LT}	Epätarkkuustekijä
ε	materiaalin niemellisestä myötölujuudesta f_y :stä riippuva tekijä
k_τ	Leikkauslommahduskerroin
η_3	Leikkauslommahduskestävyyden mitoitusehto
$V_{b,Rd}$	Poikkileikkauksen leikkauslommahduskestävyys
$V_{bw,Rd}$	Uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä
$V_{bf,Rd}$	Laippojen osuus leikkauslommahduskestävyydestä
η	Muokauslujittumisen huomioon ottava tekijä
f_{yw}	Uuman nimellinen myötölujuus
χ_w	Uuman osuuden pienennystekijä
f_{yf}	Laipan nimellinen myötölujuus
c	Laippojen osuuden leikkauslommahduskestävyyden tarvittava muuttuja
$M_{f,Rd}$	Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon

1 JOHDANTO

Teollisuuskohteissa teräksen uudelleenkäyttö on keskeinen osa kestäväää ja tehokasta toimintaa. Esimerkkinä tästä toimii Helen Oy:n Salmisaaren A-voimalaitos, jossa toteutetaan polttoainekonversio. Tämän hankkeen myötä nykyinen kivihiilipolttoinen K7-kattila muokataan puupellettipolttoiseksi. Vaikka voimalaitosta päivitetään vastaamaan nykyaikaista teknologiaa, pyritään silti hyödyntämään mahdollisimman paljon vanhoja rakenteita. Tällainen lähestymistapa korostaa ympäristöystävällisyyttä ja resurssitehokkuutta teollisuuden toiminnassa.

Projektin etenemisen myötä on herännyt huoli K7-kattilan kannatinrakenteen kestävydestä. Opinnäytetyön tavoitteena on varmistaa, että mainittu kattilan kannatinrakenne on riittävän kestävä myös polttoainekonversion jälkeen. Tässä prosessissa arvioidaan, täyttääkö teräsrunko nykyajan vaatimukset ja standardit.

On tärkeää huomioon, että tarkkaa tietoa kattilan rungon iästä tai siihen liittyvistä dokumenteista ei ole saatavilla. Vaikka Salmisaaren A-voimalaitos otettiin käyttöön vuonna 1953, tutkittavan K7-kattilan käyttöönotto tapahtui vasta vuonna 1986. Paikan päällä tehtyjen tutkimusten perusteella on tehty oletus, että kattilan teräsrakenteet olisivat yhtä vanhoja kuin itse K7-kattila. Tämä puutteellinen tieto luo omat haasteensa vanhan kohteen suunnittelussa. Projektissa pääasiallisina lähtöteinä hyödynnetään laserkeilattua 3D-mallia sekä Valmet Technologies Oy:n toimittamia dokumentteja.

Voimalaitoksen rakenteet muodostavat suuren kokonaisuuden, joten tässä työssä keskitytään erityisesti kannatinrakenteiden primäärisiin osiin, kuten kattilapilareiden ja -palkkien mitoitukseen. Kaikki rakenteet tullaan mitoittamaan laajempaa verifointia varten, mutta työssä käsitellään vain osa niistä, jotta kokonaisuus pysyy mahdollisimman selkeänä.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli johtava kestävien kaupunkien ja yhteiskuntien suunnittelu- ja konsultointiyritys Ramboll Finland Oy. Rambollilla on globaalisti yli 18 000 asiantuntijaa, joista yli 2 500 toimii eri puolilla Suomea. Ramboll tarjoaa innovatiivisia ja kestäviä ratkaisuja kaupunkien, liikenteen, infrastruktuurin, ympäristön ja rakennusten suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon.

2 SALMISAAREN VOIMALAITOS

Helsingin Salmisaarella sijaitsee Helen Oy:n Salmisaaren A-voimalaitos, joka aloitti toimintansa vuonna 1953. Vuonna 1984 valmistui B-voimalaitos, jonka käyttöönoton myötä A-voimalaitoksen alkuperäinen toiminta päättyi. Kuitenkin vuonna 1986 A-voimalaitosta päätettiin uudistaa, ja sinne asennettiin kivihiilipolttoinen pölypolttokattila, K7-kattila, jonka tehtävänä oli tuottaa lämpöä talvikausille. (1, s. 18; 2.)



KUVA 1. Salmisaaren A-voimalaitos (5)

Nyt Helen Oy on jälleen päättänyt uudistaa A-voimalaitosta tekemällä polttoainekonversion kyseiselle kattilalle muuttaen sen puuperäisen pelletin poltton perustuvaksi kuplapetikattilaksi. Valmiit muutokset on tarkoitus saada toteutettua vuosien 2024–2025 lämmityskaudelle, ja niiden odotetaan tuottavan kaukolämpöä 150 MW:n teholla. Taulukossa 1 esitetään K7-kattilan teknisiä tietoja ennen ja jälkeen polttoainekonversion. (3.)

TAULUKKO 1. K7 -kattilan tekniset tiedot ennen ja jälkeen polttoainekonversion (4, s. 4)

	Ennen polttoainekonversiota	Jälkeen polttoainekonversion
Kattila	K7	K7
Käyttötarkoitus	Huippu- ja varakattila	Huippu- ja varakattila
Pääpolttoaine (apu-/varapolttoaine)	Kivihiili (Raskas polttoöljy)	Puuperäinen pelletti
Kattilatyyppi	Suorakytkentäinen kuumavesikattila nurkkapoltolla	Kuplapetikattila, BFB
Polttimet	Hiilipölypolttimet 8 kpl Öljypolttimet 8 kpl	n/a
Polttoaineteho	185 MW	150 MW
Nimellisteho - Kaukolämpö	180 MW	n/a
Keskimääräinen käynti- aika	1000–3000 h/a	n/a
Käyttöönottovuosi	1986	(alkuvuosi 2025)
Hyötysuhde	92–94 %	n/a
Polttoainekulutus - Kivihiili - Pelletti	13 632 t	n/a

Salmisaaren A-voimalaitoksen rakennuslupa myönnettiin vuonna 1946, ja sen suunniteltiin tuottavan sähköä 120 megawatin teholla. Rakennustyöt käynnistettiin seuraavana vuonna diplomi-insinööri Veijo Immosen suunnitelmien pohjalta. Höyrykattila tilattiin Englannista, ja siihen tarvittava kivihiili varastoitiin aluksi Salmisaaren tontin pohjoispuolelle, jotka vuonna 2000 siirrettiin maan alle. Kesällä 1948 Teknillisten laitosten hallitus päätti ottaa huomioon myös kaukolämmitysmahdollisuuden Salmisaaren voimalaitoksessa. Helmikuussa 1953 ensimmäinen koneisto käynnistettiin ja alkoi tuottaa sähköä helsinkiläisille. Kaukolämmön tuotanto yhteistuotannolla alkoi vuonna 1957. Salmisaarelle on myös annettu oma motto:

"Pian on Salmisaarikin valmis."

(1, s. 12–15; 22.)

Salmisaaren voimalaitoksia ja alueen muita historiallisia rakenteita yhdistää punatiiliverhoilu. A-voimalaitoksen arkkitehtuurisesta suunnittelusta vastasi arkkitehti Vera Rosendahl yhdessä kaupunginarkkitehdin Hilding Ekelundin kanssa. Lisäksi se kuuluu Helsingin kaupungin suojelemiin kulttuurihistoriallisiin kohteisiin. Kuvassa 1 komeilee A-voimalaitos. (1, s. 18.)

2.1 Pölypoltto

Ennen polttoainekonversion aloitusta K7-kattila toimi pölypolttotekniikalla. Suomessa tätä tekniikkaa pääasiassa käytetään kivihiilen ja jysinturpeen polttoon. K7-kattilassa polttoaineena toimi kivihiili. Kuvassa 2 näkyy K7-kattila purkutöiden aikana tammikuussa 2024. (6, s. 141.)



KUVA 2. K7-kattila purkutöiden aikana 10.1.2024 (5)

Pölypolttotekniikka vaatii kivihiilen jauhamisen tarpeeksi hienoksi, jotta se ehtii palaa kattilassa ollessaan. Kivihiilen jauhatusta tapahtuu kivihiilimyllyjen avulla. Jauhettu kivihiili kulkee nurkkapolttimien kautta tulipesään, jossa se palaa hetkessä. Pölypolttotekniikan todella nopea palaminen mahdollistaa suuret lämpötilatehot tulipesässä. Jotta nopea palaminen onnistuu, on palamisilma esilämmitettävä, sillä kivihiilen syttymislämpötila on 300 astetta. (6, s. 141.)

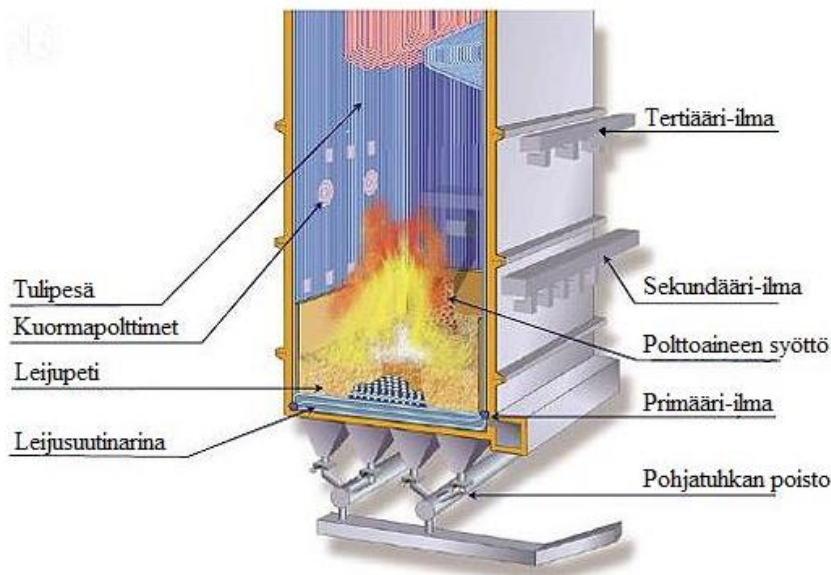
Nurkkapolttimet ovat tärkeä osa kivihiilen palamista ja nimensä mukaankin sijaitsevat kattilan nurkissa. Jauhettuun kivihiileen sekoitetaan kantokaasu, joka tuodaan polttimesta 20–30 m/s tulipesään. Palamisilma tuodaan omia reittejä vielä kaksinkertaisella nopeudella. Nämä yhdessä aiheuttavat pitkälle tulipesään työntyvän virtauksen. Polttimien asentoa muuttaessa ylöspäin tulistimia kohti voidaan vaikuttaa tulistumislämpötilaan. (6, s. 142.)

K7-kattilassa on niin sanottu kuivapesä, joka tarkoittaa, että prosessista tuleva tuhka poistetaan kuivana. 80–90 % tuhkasta on lentotuhkaa, joka kulkeutuu savukaasujen mukana. Loput ovat pohjatuhkaa, jotka poistuvat tulipesän alasuppilon kautta sammutusaltaaseen ja siitä eteenpäin. (6, s. 144–145.)

2.2 Kuplapetikattila, BFB

Helen Oy:n tavoitteena on hiilineutraali energiatuotanto vuoteen 2030 mennessä. Tämä polttoainekonversioprojekti on yksi askel eteenpäin tätä tavoitetta kohti. Pölypolttoinen kattila muutetaan puuperäisen pelletin polttoon perustuvaksi kuplapetikattilaksi, joka paremmin tunnetaan kerrosleijukattilana (Bubbling Fluidized Bed, BFB). (3; 7.)

Kuplapetikattila toimii leijukerrostekniikalla, jossa polttoaine poltetaan leijutettavassa hiekassa. Kuplapetikattilan pohjalle muodostuu tästä hiekasta 0,4–0,8 metriä paksu kerros eli leijukerrospeti. Polttoaine tulee leijukerrospeidin päälle tasaisesti polttoaineen syötön kautta, joka yleensä muodostuu useammasta pudotusputkesta. Pienimmät hiukkaset palavat jo leijukerrospeidin yläpuolella, kun taas isommat partikkelit kuivuvat ja lopulta syttyvät palamaan leijukerrospeidissä. (8, s.36.)



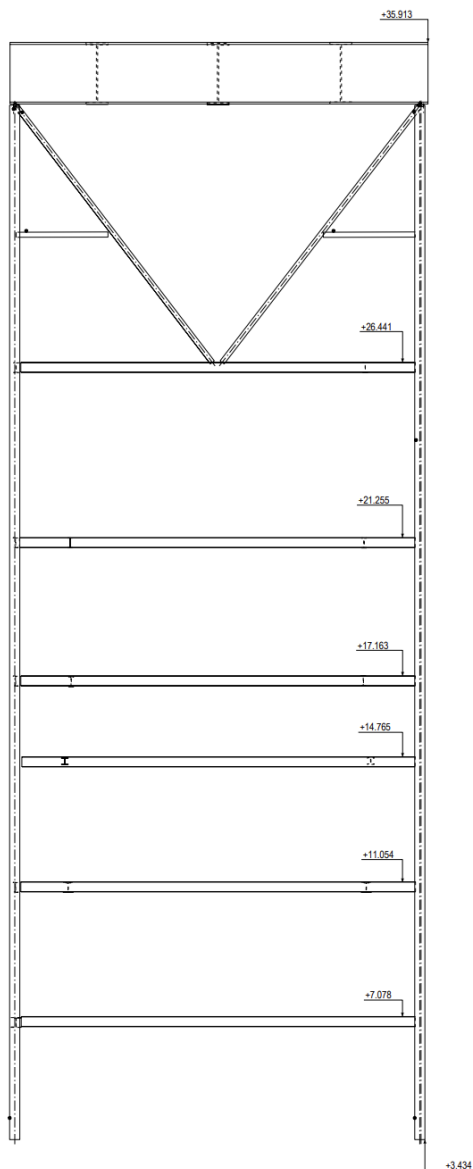
KUVA 3. Kuplapetikattilan rakenne (8, s. 37)

Kerrosleijukattilan rakennetta on kuvailtu kuvassa 3. Tulipesän alaosa on muurattu, millä pyritään välttämään eroosiota ja edesauttamaan polttoaineen palamista korkeassa lämpötilavyöhykkeessä. Poltosta muodostuva karkea materiaali poistetaan tulipesän pohjalla olevien pohjatuhkasuppiloiden kautta. Poltosta tuleva tuhka pääsee poistumaan savukaasujen mukana, joten savukaasukanavat puhdistetaan sähkösuodattimilla. (8, s.36–37.)

Onnistuneeseen leijupolttoon tarvitaan sopiva lämpötila, joka on 700–900 astetta polttoaineen mukaan. Polttoaineen syötön ja laadun täytyy olla tasaista, sekä polttoaineen palamisnopeuden pitää olla suuri. Jotta kattilan teho pysyy riittävänä, sitä ovat avustamassa kattilan kuormapolttimet. (8, s. 37.)

3 KATTILAN KAANNATINRAKENTEET

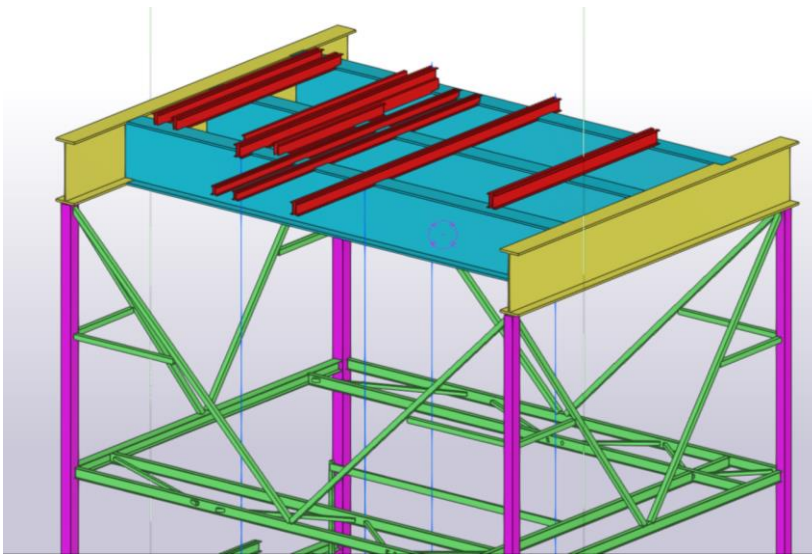
Kattilan kannatinrakenteet ovat olennainen osa kattilan rakennetta ja niiden tarkoituksena on varmistaa kattilan turvallinen, tehokas ja luotettava toiminta sen koko käyttöiän ajan. Kannatinrakenteisiin kuuluvat kattilapilari, kattilaprimääripalkit, kattilasekundääripalkit ja tertiäärikannattajat. Kuvassa 4 on esitetty kannatinrakenteen linjakuva. Kuvassa ei näy uusia rakenteita eikä kannatinrakenteen ulkopuolisia rakenteita, jotta kuva olisi mahdollisimman selkeä.



KUVA 4. Kannatinrakenteen linjakuva (5)

3.1 Kattilapalkit, tertiäärikannattajat ja kattilapilarit

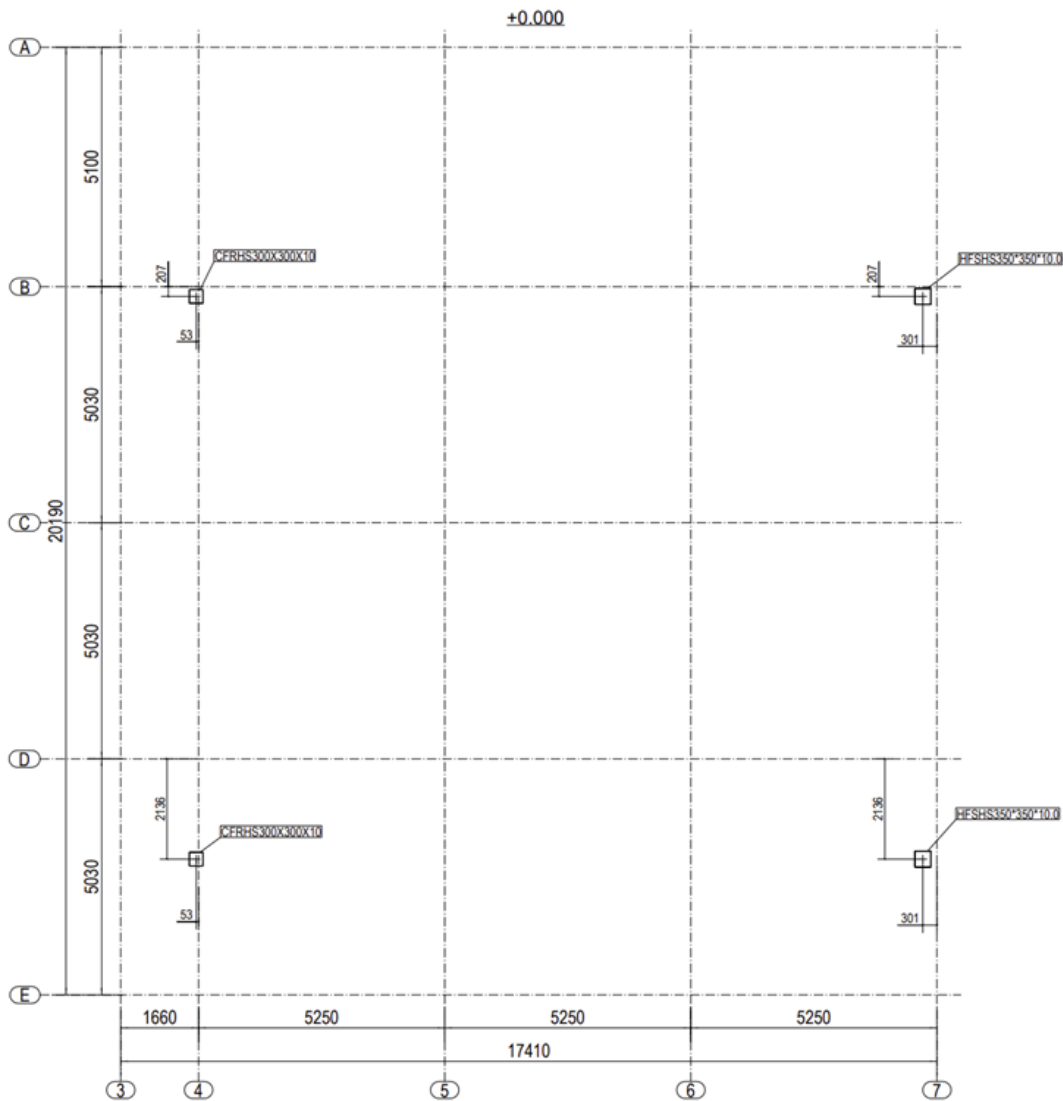
Kattilapalkit jaetaan kahteen ryhmään: primääripalkkeihin ja sekundääripalkkeihin. Primääripalkkien tehtävä on ensisijaisesti kannatella kuormia ja viedä ne kattilapilareille. Sekundääripalkkien tehtävä on toissijaisena kannatella ripustustangoista tulevia kattilasta aiheutuvia kuormia ja viedä ne primääripalkeille. Palkit ovat hitsattua profiilia, ja niiden korkeus on 1800 mm, laipan paksuus 30 mm ja leveys 650 mm, uuman paksuus 15 mm. Kuvassa 5 näkyy keltaisella värillä primääripalkit ja vaaleansinisellä värillä sekundääripalkit.



KUVA 5. Kannatinrakenteet 3D-mallissa (5)

Tertiäärikannattajat sijaitsevat kattilasekundääripalkkien päällä. Ne kannattelevat ripustustankoja, jotka puolestaan kannattelevat tasorakenteita tai kattilaa. Tertiäärikannattajien tarkkoja dimensioita ei ole vahvistettu, mutta ne mahdollisesti vastaavat kuumavalssattuja U-profiileja, kuten UNP240, UNP350 ja UNP400. Tertiäärikannatin muodostuu, kun U-palkit asetetaan selät vastakkain ja osaan jätetään pieni välys, johon mahdollisesti kiinnitetään ripustustankoja. Kuvassa 5 tertiäärikannattajat on esitetty punaisella värillä.

Kattilain kannatinrakenteessa on neljä kattilapilaria, jotka vievät rakenteen päälle tulevat kuormat perustuksille. Kattilapilareiden profiilit vastaavat kylmämuovattuja neliörakenneputkia, joiden mitat ovat CFRHS300x300x10 ja CFRHS350x350x10. Kuvassa 5 kattilapilarit on esitetty violetilla värillä. Rakennuksen linjoja ja kattilapilareiden sijainnit on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Kattilapilareiden sijainnit (5)

3.2 Kattilan kannatus

Yleisesti isot prosessi- ja voimakattilat ovat ripustettuja kattiloita. Kuvassa 7 näkyy, kuinka K7-kattilan kannatus tapahtuu roikottamalla kattilan sekundääri- ja tertiääripalkeista. Kattilan ripustustangot menevät koko sekundääripalkin poikkileikkauksen läpi ja kiinnittyvät palkin ylälaippaan. Tertiääripalkeissa ripustustangot menevät kahden U-palkkien väliin tai kiinnittyvät U-palkkien alalaippaan (kuva 8). (6, s. 187.)

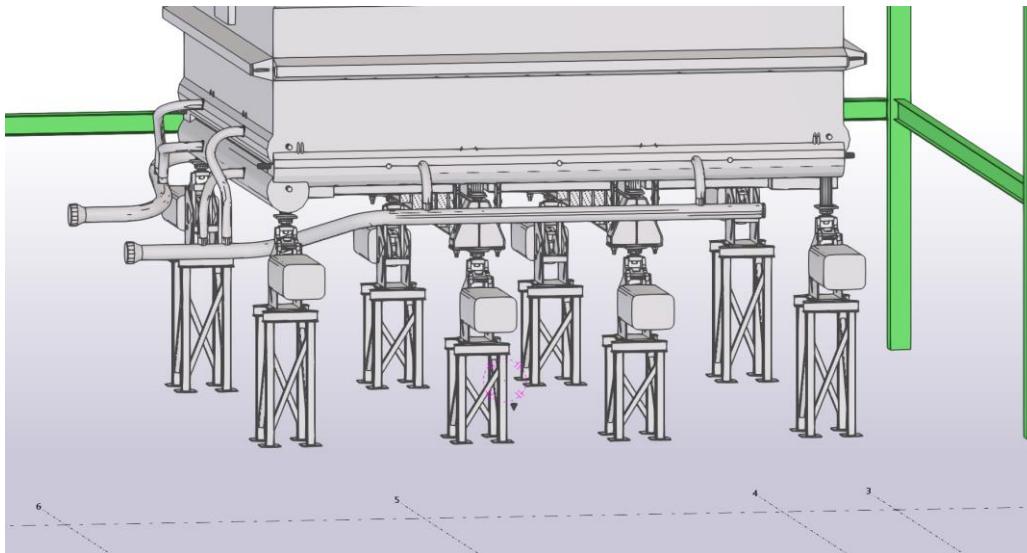


KUVA 7. K7-kattilan ripustustangot (5)



KUVA 8. Ripustintankojen kiinnittyminen tertiäripalkkeihin (5)

Polttoainekonversion seurauksena K7-kattilan alaosa katkaistaan ja puretaan korkeudelta +15.300 metriä. Puretun tilalle on suunniteltu asennettavaksi uusia kuormia, kuten uusi arina, leijukerrospeti ja palkit arinan alla. Koska K7-kattilan kannatinrakenteen verifiointia ei ole tehty ennen projektin aloittamista, uudet kuormat on suunniteltu menevän vakiovoimakannakkeille. Yhteensä kahdeksan vakiovoimakannaketta on suunniteltu, ja jokaiselle niistä on tarkoitus kohdistaa noin 152 kN eli noin 15,2 tonnin kuormitus. Nämä vakiovoimakannakkeet sijaitsevat kuvassa 9 kattilan alapuolella.



KUVA 9. Vakiovoimakannakkeet (5)

3.3 Kannatinrakenteen jäykistys

Teräsrungon on säilytettävä stabiiliutensa ja kestäväytensä kuormitettuna koko ikänsä. Jotta tämä onnistuisi, erilliset rakenteenosat eivät saa lommahtaa, nurjahtaa tai kiepahtaa. Onnistuneessa jäykistyksessä tulisi huomioida jäykistys kussakin tasossa sekä eri suunnissa. Teräsrungon jäykistämistapoja on useita, esimerkiksi kehäjäykistys, ristikkojäykistys ja levyjäykistys. (9, s. 212.)

K7-kattilan kannatinrakenteiden jäykistämisessä ei käytetä yhtä jäykistämistapaa vaan enemmänkin useamman yhdistelmää. K7-kattilan runko on 42 metriä korkea ja siinä on kuusi taseorakennetta, joista kaksi on jäykistäviä. Kattilapilarit ja primääriset kattilapalkit muodostavat jäykistävän kehän.



KUVA 10. Kattilapilarin kiinnityminen perustuksiin (5)

Tämä kehä on sivuttaistuettu jokaisen kattilan tason kohdalta betonipilareihin. Kuvassa 10 on esitetty kattilapilareiden kiinnittyminen perustuksiin. Minkäänlaista verifiointia perustusliitoksen jäykkyydestä ei tehty, joten nurjahduspituuden kerrointa käytettiin arvolla 1,0, kuten tarkemmin käsitellään kohdassa 7.2.1.

4 TERÄKSEN UDELLEENKÄYTTÖ

Rakennusmateriaalien valmistus kuluttaa huomattavia määriä maapallon luonnonvaroja, arviolta noin puolet kaikista luonnonvaroista. Päästöjen vähentämistä voidaan edesauttaa materiaalikierrolla, eli hyödynnetään vanhoja materiaaleja uudestaan tehokkaasti. Teräksen kierrätysaste hipoo melkein 100 %. Terästä voidaan sulattaa ja luoda jotain uutta tai purkaa ja asentaa uuteen kohteeseen. Lisäksi terästä käytetään uudelleen täysin samaan tarkoitukseen niin kuin Salmisaaren voimalaitoksen tapauksessa. Suomessa teräksen uudelleenkäyttöön ei ole virallisia ohjeistuksia, joten tässä on hyödynnetty teräsrakenneyhdistyksen teknistä julkaisua terästen uudelleenkäytöstä, jossa on kootusti Euroopassa julkaistuja protokollia ja kansallisia ohjeita. (10, s. 3.)

4.1 Kelpoisuuden osoittaminen

Jotta terästä voitaisiin käyttää uudelleen, on hyvä tehdä teräkselle luotettavuuden arvio. Luotettavuus arviolla päästään käsitykseen, onko terästä edes mahdollista uudelleenkäyttää. Lähtökohtaisesti on hyvä kerätä mahdollisimman paljon tietoa teräksestä ja sen historiasta. Esimerkkejä tiedoista, joita voidaan tarvita luotettavuus arvion tekemiseen:

- Rakennesuunnitelmat, huolto- ja tarkastusasiakirjat
- Havainnot plastisoitumisesta
- Rakenteen ikä
- Tämänhetkinen käyttötarkoitus ja sijainti sekä rakenteen jäykistämistapa
- Silmämääräinen havainnointi teräksen kunnosta, jos se on altistunut mm. lämmölle, korroosiolle tai sitä on korjattu
- Rakenteen suunnittelija ja toteuttaja

(10, s. 5.)

Kannatinrakenteen silmämääräiset havainnot tehtiin henkilökohtaisesti Salmisaarella sijaitsevassa A-voimalaitoksessa Helsingissä 27.3.2024. Teräsrungon rakenteet olivat erinomaisessa kunnossa, eikä niissä havaittu merkkejä lämmölle altistumisesta, korroosioista tai näkyvästä vahvuuden alentumisesta. Kuvassa 11 näkyy kattilapilarin ja kattilapalkin välinen liitos, josta ilmenee,

että pintakäsittely on säilynyt hyvänä, eikä rakenteissa ole mainittuja muodonmuutoksia. Koska runkorakenteet olivat hyvässä kunnossa, niiden arvioitu ikä vastaa K7-kattilan ikää, vaikka virallista dokumentaatiota ei ole. Työmaakäynnillä varmistettiin myös kattilapilareiden ja -palkkien dimensiot. ryhtyvällä. (10, s. 14–15.)



KUVA 11. Kattilapilarin ja Kattilapalkin välinen liitos (5)

Koska tässä tapauksella rakenneosia käytetään täysin samaan käyttötarkoitukseen, mihin ne on alun perin suunniteltu ja valmistettu, voidaan rakenteet uudelleenkäyttää alkuperäisillä paikoillaan. Käytössä on siis rakennuspaikkakohtainen varmentaminen. Rakennusosien kelpoisuuden vastuu kuitenkin on hankkeeseen

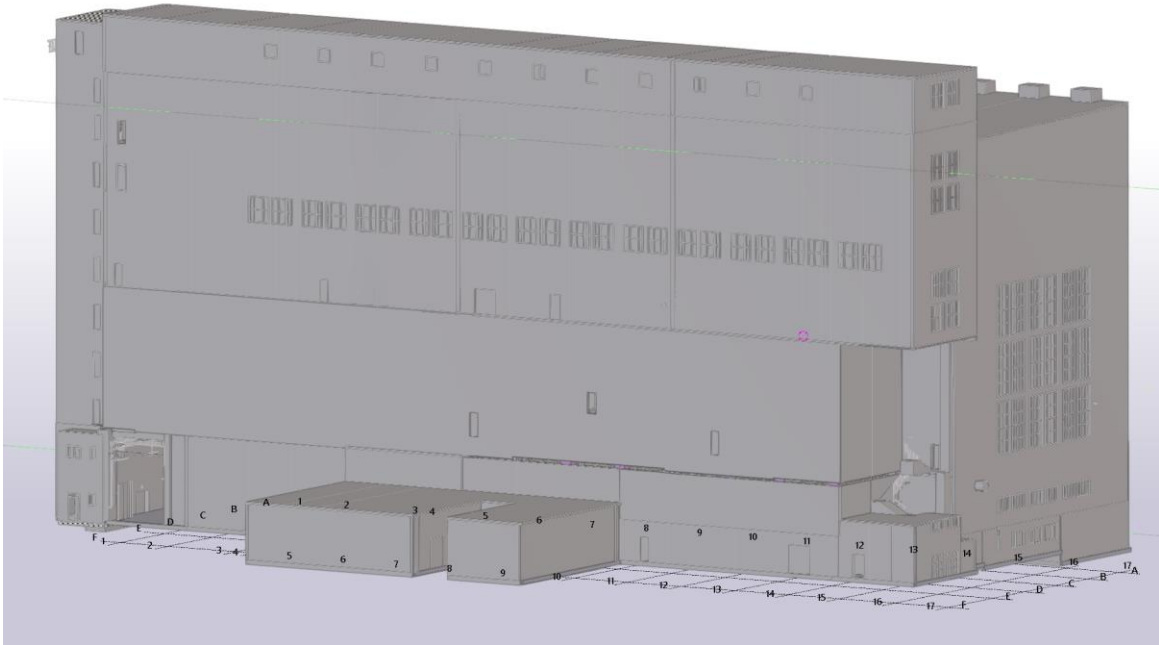
4.2 Käytettävä materiaali

Yleisesti uudelleen käytetyt teräkset ovat vanhimmillaan vuonna 1970 valmistettuja, koska niiden voidaan olettaa vastaavan nykyisten standardien materiaaliominaisuuksia. Lisäksi 1970-luvulla teräsnormien ja ohjeiden kehitys kiihtyi merkittävästi. Teräsrakenteiden ensimmäiset normimääräykset julkaistiin vuonna 1939, perustuen saksalaisiin ohjeisiin. Suomen rakentamismääräyskokoelma laadittiin vuonna 1976, sisältäen kattavasti rakentamista koskevia määräyksiä ja ohjeita. Asiakkaan toimittamien sähkösuotimen jalustan rakennepiirustuksista ilmenee, että vuosina 1983–1985 rakennusmääräyskokoelmissa käytettiin saksalaisiin ohjeisiin pohjautuvat materiaaleja Fe37 ja Fe44. (5; 10, s. 6; 11, s. 19.)

K7-kattilan kannatinrakenteen arvioidaan olevan samaa ikää kuin kattila eli vuodelta 1986. Todennäköisesti suunnittelu toteutettiin samanaikaisesti sähkösuotimen jalan kanssa. Sähkösuotimen jalan rakennepiirustuksista ilmenee, että teräspilareiden materiaalina on käytetty Fe44 D -materiaalia ja teräspalkkien Fe37B. Koska kattilan kannatinrakenteesta ei ole saatavilla erillisiä rakennepiirustuksia, oletetaan kattilapilareiden materiaaliksi myös Fe44 D sekä kattilapalkkien materiaaliksi Fe37. Standardin SFS 200 (1986) mukaan Fe44 vastaa nykyisen standardin S275 teräslajia ja Fe37 vastaa S235 teräslajia, joita käytettiin laskennassa. (5; 12, s.17.)

4.3 Lähtötietona laserkeilaus

Lähtötiedot kattilan kannatinrakenteen verifointiin olivat erittäin niukat. Pääasiallinen lähtötieto oli laserkeilaamalla tehty 3D-malli. Laserkeilaus on optinen menetelmä, joka pohjautuu laserimpulsien lähettämiseen ja pinnoilta takaisin heijastuneiden pulssien mittaamiseen. Näiden mittausten avulla luodaan etäisyystietojen sarja, josta syntyy kolmiulotteinen pistepilvi. Pistepilvi koostuu kolmiulotteisista koordinaateista ja näitä mittapisteitä voi olla jopa satoja miljoonia tai miljardeja. Tämä pistepilvi jalostetaan IFC-tiedostoksi, joka tuodaan referenssiksi Tekla-mallinnusohjelmaan. (13, s. 1–6.)



KUVA 12. A-voimalaitoksen referenssimalli (5)

Referenssi-mallista on voitu mitata eri rakenteiden mittoja, joiden perusteella kannatinrakenteiden profiilit on päätelty. On tärkeää ottaa huomioon, että laserkeilauksen mittatarkkuus on usein ± 5 mm, ja tähän voivat vaikuttaa muun muassa olosuhteet, käytetyt mittalaitteet ja mittausmenetelmä. Lisäksi on suositeltavaa tehdä tarvittaessa tarkempia mittauksia paikan päällä. Kuvassa 12 on esitetty Salmisaaren A-voimalaitoksen referenssi Tekla-mallinnusohjelmassa. (13, s. 1–6.)

5 SUUNNITTELUPERUSTEET

5.1 Käytettävät ohjelmat

Kannatinrakenteiden kolmiulotteiseen mallintamiseen on käytetty Tekla Structures 2020 -ohjelmistoa, joka on tehokas rakennesuunnittelun BIM-ohjelmisto. BIM-teknologialla on luotu Salmisaari A-voimalaitoksesta todellisuutta vastaava virtuaalimalli. Virtuaalimalli on avuksi suunnittelun ja rakentamisen eri vaiheissa. (14.)

Rakenteiden mitoitus on tehty STAAD.pro-rakenneanalyysisovelluksella. STAAD.pro perustuu elementtimenetelmään (Finite Element Method, FEM), jossa monimutkaiset rakenteet jaetaan elementeiksi. Näiden elementtien käyttäytymistä ratkaistaan numeraalisesti. Ratkaisujen avulla voidaan selvittää koko rakenteen käyttäytyminen ja reaktiot eri kuormitustilanteissa. (15.)

5.2 Seuraamusluokka

Rakennukset ja rakenteet luokitellaan seuraamusluokkiin CC1, CC2 ja CC3 niiden mahdollisista vaurioista tai viasta aiheutuvien seurausten perusteella. Seuraamusluokkaan CC3 kuuluvat rakennukset ja rakenteet, joilla voi olla vakavia seuraamuksia. Seuraamusluokka CC2 sisältää rakennukset ja rakenteet, joilla voi olla keskisuuria seuraamuksia. CC1-seuraamusluokkaan kuuluvat ne, joilla on vähäisiä seuraamuksia. Seuraamuksia voivat olla ihmishenkien menetykset, taloudelliset ja sosiaaliset vahingot sekä ympäristövahingot.

Kattilan kannatinrakenteet kuuluvat seuraamusluokkaan CC2. Seuraamusluokan perusteella saadaan kerroin K_{FI} ominaisarvo: (9, s. 57–58; 16, s. 22.)

- CC1 $K_{FI} = 0,9$
- CC2 $K_{FI} = 1,0$
- CC3 $K_{FI} = 1,1$

5.3 Sallitut siirtymät ja taipumat

Jokaisessa projektissa sovitaan ja määritetään pystysuuntaiset taipumarajat asiakkaan kanssa ottaen huomioon standardin EN 1990 -liitteen A kohdan A.1.4. kuvan A.1.1. mukaiset suositukset. Samaa menettelyä käytetään myös vaakasuuntaisissa taipumissa, mutta kuvan A.1.1. sijaan tulki-taan kuvaa A.1.2. Tässä projektissa sovitut taipumarajat kattilaa kannattaville palkeille ovat: (5.)

- Kattilaa kannattava palkki, muuttuva kuorma $L \leq 800$ tai 10 mm
- Kattilaa kannattava palkki, pysyvä kuorma $L \leq 1000$

Taipuman tarkastelu suoritetaan STAAD.pro-analyysiohjelmassa, mutta eurokoodin sijaan käytössä on Chinese Steel Design -käyttöliittymä. Chinese Steel Design -käyttöliittymän avulla taipuman aiheuttamaan käyttöasteeseen pääsee käsiksi nopeasti ja helposti, ja se tarjoaa riittävän lähelle eurokoodin mitoitusta, vaikka se käyttääkin Kiinan standardeja. Laskennassa käytetään eurokoodin mukaisesti tehtyjä kuormitusyhdistelmiä 216 (SLS Q = BOILER BEAMS DEAD LOAD) ja 217 (SLS Q = BOILER BEAMS LIVE LOAD), ja materiaaleina käytetään Q235:sta, joka vastaa teräslajia S235.

5.4 Kuormitusyhdistelmät

Kun tiedetään muuttuvat ja pysyvät kuormat, voidaan niitä yhdistellä soveltaen standardia SFS-EN 1990 kohdan 6.4.3.2 mukaisesti. Jotta muuttuvia kuormia voidaan yhdistellä, tarvitaan yhdistelykertoimet. Yhdistelykerroin riippuu rakennuksen kuormaluokasta, ja tässä tapauksessa Salmisaa-ren voimalaitos kuuluu kuormaluokkaan E eli varastotiloihin. Kuvassa 13 näkyvät kaikki kuormaluokat sekä niiden yhdistelykertoimet.

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{*)}
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3 ^{*)}
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoinilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**)} Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ ^{***)} Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

KUVA 13. Kertoimen ψ arvot rakennuksille (16, s. 18)

Laskennassa käytettiin yli 200 erilaista kuormitusyhdistelmää. Kaikki niistä eivät olleet välttämättä tarpeellisia juuri tässä projektissa, sillä siinä ei otettu huomioon yleisiä muuttuvia kuormia, kuten tuuli- ja lumikuormia.

5.4.1 Murtorajatila

Murtorajatila, tunnetaan myös nimellä ultimate limit state (ULS), liittyy rakenteen sortumiseen tai vastaavaan vakavaan vioittumiseen, ja se kuvaa tyypillisesti rakenteen tai sen osan kestävyyttä. Kaavoissa 1 ja 2 on esitetty murtorajatilan mitoituskaavat, joilla saadaan kuormien mitoitusarvot murtorajatilassa. (9, s. 52.)

KAAVA 1. Kuormien mitoituskaava murtorajatilassa, vain pysyviä kuormia (9, s. 57)

$$1,35K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf}$$

K_{FI} = seuraamusluokasta johtuva ominaisarvo

$G_{kj,sup}$ = epäedullinen pysyvän kuorman ominaisarvo

$G_{kj,inf}$ = edullinen pysyvän kuorman ominaisarvo

j = pysyvän kuorman indeksi

KAAVA 2. Kuormien mitoituskaava murtorajatilassa (9, s. 57)

$$1,15K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

K_{FI} = seuraamusluokasta johtuva ominaisarvo

$G_{kj,sup}$ = epäedullinen pysyvä kuorma

$G_{kj,inf}$ = edullinen pysyvä kuorma

$Q_{k,1}$ = määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ = muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

j = pysyvän kuorman indeksi

$\psi_{0,i}$ = määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (kuva 13)

5.4.2 Käyttörajatila

Käyttörajatila, tunnettu myös nimellä serviceability limit state (SLS), on toinen keskeinen käsite rakennesuunnittelussa. Tämä tila viittaa tilanteeseen, jossa rakenne ei enää täytä sille määrättyjä käyttökelpoisuusvaatimuksia. Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmien tekemiseen on käytetty tavallisen yhdistelmän kaavaa (kaava 3). (9, s. 52.)

KAAVA 3. Tavallinen yhdistelmä (9, s. 58)

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

j = pysyvän kuorman indeksi

i = muuttuvan kuorman indeksi

G_{kj} = pysyvän kuorman ominaisarvo

$Q_{k,1}$ = määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$Q_{k,i}$ = muun muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{1,1}$ = määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (kuva 13)

$\psi_{2,i}$ = muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (kuva 13)

6 KUORMITUKSET

6.1 Pysyvät kuormat

Pysyvät kuormat ovat kuormia, jotka vaikuttavat todennäköisesti koko annetun tarkastusajanjakson ajan. Kuorman suuruus ei vaihtele ajan myötä, mutta muutosta voi tapahtua saman suuntaisesti, kunnes raja-arvo on saavuttanut määrätyn pisteen. Projektissa kuormat on pääasiassa määrätty Valmet Technologies Oy:n toimeasta. Tasolla vaikuttavat pysyvät kuormat valittiin seuraavasti:

TAULUKKO 2 Pysyvät kuormat (5)

Ritilä	0.35	kN/m ²
Kyynellevy 3 mm	0.30	kN/m ²
Kyynellevy 6 mm	0.60	kN/m ²
Katto	0.15	kN/m ²
Kaide	0.15	kN/m

(17, s.32; 5.)

Pysyviä kiinteitä kuormia on rakenneosien omapaino. Oma paino pystytään laskemaan rakenneosan keskimääräisen tiheyden ja nimellismittojen perusteella. Mitoituksessa STAAD.pro-analyysohjelman huomioi oman painon valitun profiilin perusteella. (17, s. 60; 18, s. 18.)

Kattilapalkkien suurin pysyväkuorma johtuu K7-kattilasta. K7-kattilan painoa ei ole alkuperäisesti tiedossa, joten Valmet Technologies Oy on arvioinut sen ripustintankojen voiman perusteella. K7-kattilan painoksi on arvioitu 1977 kN eli noin 197,7 tonnia. Tämän tiedon perusteella STAAD.pro-analyysohjelman on syötetty kuormat tertiäreille ja kattilapalkeille viivakuormana ottaen huomioon ripustintankojen voimat ja sijainnit.

6.2 Muuttuvat kuormat

Muuttuvat kuormat ovat sellaisia, joissa voi tapahtua muutosta ajan kuluessa sekä joka suuntaan. Projektissa kuormat on pääasiassa määrätty Valmet Technologies Oy:n puolelta, joten tasoilla vaikuttavat muuttuvat kuormat ovat taulukossa 3. (17, s. 32.)

TAULUKKO 3. Muuttuvat kuormat (5)

Terästasot yleisesti	Tasainen kuorma	3.0	kN/m ²
	tai pistekuorma	1.5	kN (200x200 mm)
Hoitotiet ja alueet lähellä nostokuilua	Tasainen kuorma	5.0	kN/m ²
	tai pistekuorma	1.5	kN (200x200 mm)
Portaat ja tasanteet	Tasainen kuorma	3.0	kN/m ²
Katon muuttuvakuorma	Tasainen kuorma	1.0	kN/m ²

Yleisesti merkittäviä muuttuvia kuormia ovat lumi- ja tuulikuormat. Kuitenkin kattilan kannatinrakenne sijaitsee betonirunkoisen voimalaitosrakennuksen sisällä, mikä estää tuuli- ja lumikuorman vaikutuksen teräsruntoon. Jos kannatinrakenne olisi ulkona, tuulikuorma laskettaisiin standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaisesti ja lumikuorma standardin SFS-EN 1911-1-3 mukaisesti.

6.3 Laite- ja putkistokuormat

Polttoainekonversiossa vaihdetaan vanha teknologia uuteen. Uudet laite- ja putkistokuormat pääasiassa tulevat kattilarakennuksen eri tasorakenteille, jotka taas vievät kuormat kattilapilareille. Laite- ja putkistokuormien lähtötiedot on toimittanut Valmet Technologies Oy:n rakennesuunnittelua varten. Kuormat voivat olla pysyviä sekä muuttuvia kuormia. (5.)

6.4 Lisävaakavoimat

Rakenteen kokonaisanalyysissä otetaan huomioon kehien epätarkkuudet ja tähän tarkoitukseen noudatetaan standardin SFS-EN1993-1-1 kohdan 5.3 vaatimuksia. Ekvivalenttina vaakavoimana

jokaisen pilarin jokaisella tasolla käytetty arvoa $H=F/150$, missä F on kyseisen pilarin aksiaalinen kuorma kyseisellä tasovälillä sisältäen pysyvät ja muuttuvat tasokuormat. (5.)

7 KATTILAN KANNATUSRAKENTEEN VERIFIOINTI

Kattilapalkit ja -pilarit on mitoitettu STAAD.Pro-analyysiohjelmalla. Tuloksissa ei esitetä varsinaisia kaavoja, vaan niissä on viitattu standardiin. Tuloksissa käsitellään seuraavia SFS-EN 1993-1-1 -standardin kohtia:

- 6.3.1.1 nurjahduskestävyys
- 6.2.9.1 taivutus ja aksiaalinen voima poikkileikkausluokissa 1 ja 2
- 6.3.3 vakio poikkileikkauksisten sauvojen taivutus ja aksiaalisen puristuksen
- Yhteisvaikutusyhtälöt 6.61 ja 6.62
- 6.2.6 leikkaus
- 6.3.2 kiepahduskestävyys
- 6.2.7 (5) vääntö.

Opinnäytetyössä kohdissa 7.2.1–7.3.5 on avattu tuloksissa esiintyvien standardin kohtien laskukaavoja niin, että ne sopivat kattilapalkkien ja -pilareiden mitoittamiseen. Laskukaavoissa esiintyy kestävyys osavarmuuslukuja, joiden arvot on määritetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Osavarmuusluvut (12, s. 76)

Osavarmuusluku	Osavarmuusluvun arvo
γ_{M0}	1,0
γ_{M1}	1,0
γ_{M2}	1,25

7.1 Poikkileikkausluokka

Lähes jokainen teräsrakenteiden mitoitus lähtee poikkileikkausluokan määrittämisellä, kuitenkin poikkileikkauksen osan pitää olla täysin tai osittain puristettu. Poikkileikkausluokituksen tavoitteena

on selvittää, missä määrin poikkileikkausten paikallinen lommahdus vaikuttaa niiden kiertymiskykyyn ja kestävyteen. Poikkileikkaukset voidaan jakaa neljään luokkaan. (9, s. 67.)

Ensimmäiseen poikkileikkausluokkaan kuuluvat plastiset poikkileikkaukset eli ne poikkileikkaukset, joihin voi muodostua kelvollisen kiertymiskyvyn omaava plastinen nivel. Toiseen poikkileikkaukseen kuuluvat ne poikkileikkaukset, jotka saavat plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden, mutta niiden kiertymiskykyä rajoittaa paikallinen lommahdus eli kompaktit poikkileikkaukset. Poikkileikkausluokka 3:een kuuluvat puolikompaaktit poikkileikkaukset, joiden äärimmäisen puristettu reuna voi saavuttaa myötörajan, mutta ei voi saada plastisuusteorian mukaista momenttikestävyyttä paikallisen lommahduksen rajoittaessa. Neljännessä poikkileikkausluokassa ovat hoidat poikkileikkaukset, jotka eivät saavuta myötörajaa ennen kuin niissä tapahtuu ensin paikallinen lommahdus. (9, s. 67.)

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat

Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$\text{kun } \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $\text{kun } \psi \leq -1^{3)}: c/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) Arvoa $\psi \leq -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\epsilon_y > f_y/E$

KUVA 14. Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (17, s. 83)

Luokittelu tapahtuu poikkileikkauksessa vallitsevan jännitysjakauman mukaan. Riippuen puristesta taso-osasta, määritetään poikkileikkausluokka kuvien 14 ja 15 mukaisesti. Laipan ja uuman poikkileikkaus määritetään erikseen, joten on mahdollista, että ne kuuluvat eri poikkileikkausluokkiin. Poikkileikkausluokka kuitenkin valitaan suuremman luokan mukaan. (9, s. 68.)

Ulokkeelliset laipat						
		Valssatut profiilit		Hitsatut profiilit		
Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ ⁵⁾ k_σ ks. EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

KUVA 15. Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (17, s. 84)

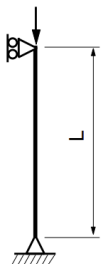

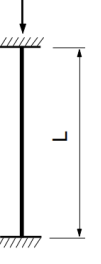

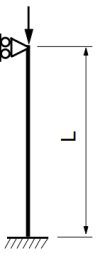
Kattilapilarin poikkileikkaus 350x10 on laskettu poikkileikkausluokkaan 2 (CLASS 2), kun taas 300x10 poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1 (CLASS 1). Sen sijaan kattilapalkit kuuluvat poikkileikkausluokkaan 3 (CLASS 3)

7.2 Kattilapilarien mitoitus

7.2.1 Nurjahduskestävyys

Kattilapilareiden stabiilisuuden tarkasteluun kuuluu muun muassa nurjahduskestävyyden tarkastelu. Nurjahduskestävyyden tarkastus lähtee liikkeelle nurjahduspituuden L_{cr} määrittämisellä. Nurjahduspituuden määrittämiseen vaikuttaa pilarin tuentatapa. Pilareiden teoreettiset tuentatavat ja nurjahduspituudet perustapauksille on esitetty kuvassa 16. Tuentatavan valinnalla on vaikutus sauvan kimmoteorian mukaiseen kriittiseen voimaan, mikä taas vaikuttaa pilarin mitoitukseen. (9, s. 93–94.)

Kattilapilarit jaetaan rakennemallissa tasojen korkuisiksi sauvoiksi, joita tarkastellaan niiden tuennan suhteen. Jokaiselle kattilapilareiden sauvalle on oletuksena käytetty kerrointa 1,0, mikä tarkoittaa, että ne ovat vapaasti tuettuja, eli niiden molemmissa päissä on niveltuki. (9, s. 94; 5.)

Molemmista päistä niveloity pilari	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari, toinen kiinnityskohta sivusiirtävä	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty ja toisesta päästä niveloity pilari
				
$L_{cr} = 1,0 L$	$L_{cr} = 2,0 L$	$L_{cr} = 0,5 L$	$L_{cr} = 1,0 L$	$L_{cr} = 0,7 L$

KUVA 16. Pilareiden teoreettisia nurjahduspituuksia perustapauksille (19, s. 396)

Nurjahduskestävyys tulisi aina tarkastaa, mutta muunnetun hoikkuuden ollessa $\bar{\lambda} \leq 0,2$ tai $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$ nurjahduskestävyyttä ei tarvitse tarkastella. Alla on esitetty nurjahduskuorman laskukaava sekä kaavat 5–10, joiden avulla nurjahduskestävyys voidaan laskea. Puristettua sauvaa mitoitettaessa kaavan 5 mitoitusehto täytyy olla voimassa. Pilarit mitoitetaan vahvemmassa jäykkyyden suunnassa, y-y akselilla, sekä heikommassa jäykkyyden suunnassa, z-z akselilla. (20, s. 62; 9, s. 94.)

KAAVA 5. Puristetun sauvan nurjahdusehto (20, s. 61)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,RD}} \leq 1,0$$

N_{Ed} = puristusvoiman mitoitusarvo

$N_{b,Rd}$ = puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

KAAVA 6. Nurjahdusmuodon kriittinen kuorma eli nurjahduskuorma (20, s. 94)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(EI)}{L_{cr}^2}$$

E = kimmokerroin

I = neliömomentti

L_{cr} = Nurjahduspituus

KAAVA 7. Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3 (20, s. 61)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

χ = nurjahduskestävyyden pienennystekijä kaavasta 8

A = poikkileikkauksen pinta-ala

f_y = myötöraja

γ_{M1} = Sauvojen kestävyyden osavarmuusluku

KAAVA 8. Pienennystekijä χ laskukaava. (20, s. 61)

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ mutta } \chi \leq 1,0$$

Φ = muuttuja, jota tarvitaan pienennystekijän χ määrittämisessä

$\bar{\lambda}$ = muunnettu hoikkuus kaavasta 9

KAAVA 9. Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ aksiaalisesti puristetuille sauvoille poikkileikkausluokassa 1, 2 ja 3 (20, s. 61)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$$

N_{cr} = Kyseessä olevan nurjahdusmuodon kriittinen kuorma määritellään bruttopoikkileikkauksen ominaisuuksien perusteella kimmoteorian mukaan

A = poikkileikkauksen pinta-ala

f_y = myötöraja

KAAVA 10. Muuttujan Φ laskentakaava (20, s. 61)

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

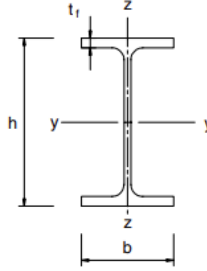
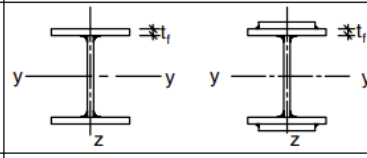

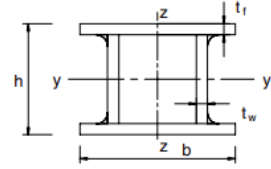
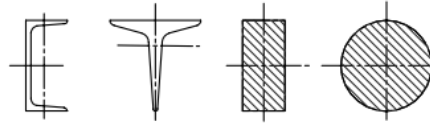
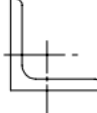
$\bar{\lambda}$ = muunnettu hoikkuus kaavasta 9

α = epätarkkuustekijä taulukosta 4

Kattilapilarit ovat kylmämuovattuja neliön muotoisia rakenneputkia, joiden materiaalilajina käytetään teräslajia S275. Kuvasta 17 katsotaan rakenneputkien kohdalta tämä materiaali, jossa myös näkyy, että sama nurjaahduskäyrä c käy molemmissa akselin suunnissa. Taulukossa 5 nurjaahduskäyrä c vastaa epätarkkuustekijän α arvoa 0,49.

TAULUKKO 5. Nurjaahduskäyrien epätarkkuustekijät (20, s. 62)

Nurjaahduskäyrä	a_0	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,79

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Valssatut profiilit 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d c
Hitsatut I-profiilit 	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c	
	$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d	
Rakennepuut 	Kuumamuovattu	Kaikki	a	
	Kylmämuovattu	Kaikki	c	
Hitsatut kotelo- profiilit 	Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	
	Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	
U-, T- ja um- pirofiilit 		Kaikki	c	
L-teräkset 		Kaikki	b	

KUVA 17. Nurjahduskäyrän valintataulukko poikkileikkauksen mukaan (20, s.63)

7.2.2 Väätö

STAAD.pro-analyysiohjelma käyttää SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.2.1 (5) myötöehtoa, joka on esitetty myös kaavassa 11, kun rakenne altistuu yhdistetylle taivutukselle ja väännölle. Tämä on yksinkertaistettu vääntövaikutusten tarkastelun menetelmä, joka on analyysiohjelmassa valittu parametrien määrittelyjen yhteydessä. Myötöehto perustuu von Misesin vertailujännitykseen, jota käytetään kimmoteorian mukaisessa kestävyysmitoituksessa. Kaavaa 11 käytettäessä mitoitus on varmallalla puolella, sillä se ei ota huomioon osittaista plastisoitumista, jonka eurokoodi sallisi. Kattilapilareihin sekä kattilapalkkeihin tehdään tämän mukainen vääntövoimien tarkastelu. (21; 9, s. 80.)

KAAVA 11. Myötöehto (von Mises) (20, s. 50)

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 \leq 1$$

$\sigma_{x,Ed}$ = pituussuuntaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa

$\sigma_{z,Ed}$ = poikkittaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa

τ_{Ed} = paikallisen leikkausjännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa

f_y = poikkileikkauksen nimellinen myötölujuus

γ_{M0} = kestävyden osavarmuusluku

7.2.3 Taivutus ja aksiaalinen voima

Kun poikkileikkaukseen kohdistuu sekä normaalivoima (puristusta tai vetoa) että taivutusmomentti (yhden tai kahden pääakselin suhteen), tarkastellaan kestävyyttä sen poikkileikkausluokan perusteella. Poikkileikkausluokissa 1 ja 2 mitoitus tehdään plastisuusteorian mukaisesti ja luokassa 3 kimmoteorian mukaisesti. Poikkileikkausluokassa 4 sovelletaan kimmoteorian ehtoja. Kaavassa 12 on esitetty lineaarinen yhteisvaikutusyhtälö, johon ei vaikuta poikkileikkausluokka, jonka avulla tarkastelu on varmalla puolella. Koska kattilapilarit ovat neliön muotoisia rakenneputkia ja kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1 ja 2, ovat alla esitetyt laskukaavat niiden mitoitukseen sopivat. (9, s. 89–90.)

KAAVA 12. Lineaarinen yhteisvaikutusyhtälö (9, s. 90)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

N_{Ed} = normaalivoiman mitoitusarvo

N_{Rd} = normaalivoimakestävyden mitoitusarvo

$M_{y,Ed}$ = taivutusmomentin mitoitusarvo y-y- akselin suhteen

$M_{y,Rd}$ = taivutusmomenttikestävyden mitoitusarvo y-y- akselin suhteen

$M_{z,Ed}$ = taivutusmomentin mitoitusarvo z-z- akselin suhteen

$M_{z,Rd}$ = taivutusmomenttikestävyden mitoitusarvo y-y- akselin suhteen

Normaalivoima aiheuttaa poikkileikkauksen taivutuskestävyyden pienenemisen, jota merkataan termillä $M_{N, Rd}$. Tästä johtuva mitoitusehto on $M_{Ed} \leq M_{N, Rd}$, jossa M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa. Taivutuksessa y-akselin suhteen käytetään kaavaa 13, jos ehdot toteutuvat, muulloin kaavaa 15. Taivutuksessa z-akselin suhteen käytetään kaavaa 14, jos ehdot toteutuvat, muulloin kaavaa 15.

KAAVA 13. Taivutus y-akselin suhteen (19, s. 120)

$$M_{y,N,Rd} = M_{y,pl,Rd}$$

kun

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5(A - 2bt)f_y}{\gamma_{M0}} \text{ ja } N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

b = poikkileikkauksen kokonaisleveys

t = seinämän paksuus

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} = kestävyiden osavarmuusluku

$N_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyden mitoitusarvo

KAAVA 14. Taivutus z-akselin suhteen (19, s. 121)

$$M_{z,N,Rd} = M_{z,pl,Rd}$$

kun

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5(A - 2ht)f_y}{\gamma_{M0}} \text{ ja } N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

h = poikkileikkauksen kokonaiskorkeus

t = seinämän paksuus

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} = kestävyuden osavarmuusluku

$N_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyden mitoitusarvo

KAAVA 15. Taivutus z- ja y-akselin suhteen, jos kaavojen 13 ja 14 ehdot eivät toteudu (19, s. 121)

$$M_{z,N,Rd} = \min \left\{ \frac{1-n}{1-0,5a_f}, 1,0 \right\} M_{z,pl,Rd}$$

$$M_{y,N,Rd} = \min \left\{ \frac{1-n}{1-0,5a_w}, 1,0 \right\} M_{y,pl,Rd}$$

n = normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyden mitoitusarvon suhde (kaava 16).

a_w = termi kaavasta 17

$M_{y,pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys y-y akselin suunnassa

a_f = termi kaavasta 17

$M_{z,pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys z-z akselin suunnassa

KAAVA 16. Normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyden mitoitusarvon suhde (19, s. 121)

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

N_{Ed} = normaalivoiman mitoitusarvo

$N_{pl,Rd}$ = poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyden mitoitusarvo

KAAVA 17. Termien a_f ja a_w laskukaava valssatuille putkille (19, s. 121)

$$a_w = \min \left\{ \frac{A-2bt}{A}, 0,5 \right\}$$

$$a_f = \min \left\{ \frac{A-2bt}{A}, 0,5 \right\}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

b = poikkileikkauksen kokonaisleveys

t = seinämän paksuus

7.2.4 Aksiaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus puristetussa poikkileikkauksessa

Aksiaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta tarkastellaan yhteisvaikutuskaavoilla, jotka on esitetty kaavassa 18. Yhteisvaikutuskaavoja käytetään, kun toisen kertaluvun mukaista tarkastelua ei tehdä ja rakenne voi kiepahtaa tai nurjahtaa. Sauvan kestävyuden laskennassa otetaan huomioon aksiaalivoiman ja taivutusmomentin vaikutukset, jotka lasketaan yhteen yhteisvaikutuskaavassa, ja niiden yhteisvaikutus huomioidaan erillisillä kertoimilla. Mitoitus tehdään sekä y-akselin että z-akselin suhteen. (9, s. 106–107.)

KAAVA 18. Yhteisvaikutuskaava aksiaalivoimalle ja taivutusmomentille. (19, s. 135)

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ ja $M_{z,Ed}$ = maksimimomenttien ja puristusvoiman mitoitusarvoja akselin y-y ja z-z suhteen (kaava 19)

ΔM_y , ΔM_z = painopisteakselin siirtymisestä aiheutuvia momenteja (taulukko 6)

χ_y ja χ_z = taivutusnurjahduksen pienennystekijä kaavan 8 mukaan

χ_{LT} = kiepahduksen pienennystekijä SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.2.3 mukaan tai kaavasta 34

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} ja k_{zz} = yhteisvaikutustekijöitä SFS-EN 1993-1-1 taulukko B.1 tai B.2

N_{Rk} = puristuskestävyyden ominaisarvo (taulukko 6)

$M_{y,Rk}$ = taivutuskestävyyden ominaisarvo y-y-akselin suhteen (taulukko 6)

$M_{z,Rk}$ = taivutuskestävyyden ominaisarvo z-z-akselin suhteen (taulukko 6)

Yhteisvaikutustekijät voidaan laskea kahdella eri menetelmällä. Tarkempi menetelmä on menetelmä 1, mutta sen laskeminen on työläämpi. Yksinkertaisempi ja varmalli puolella on menetelmä 2. Kansallisen liitteen mukaan valitaan menetelmä, jossa sanotaan näin: menetelmää 2 käytetään.

tään, jos se soveltuu mitoitukseen, mutta menetelmää 1 voidaan myös käyttää. STAAD.pro käyttää standardin SFS-EN 1993-1-1 menetelmä 2:n taulukkoja (B.1 ja B.2), jotka ovat liitteessä B. Taulukon arvoja valitaan sen mukaan, ovatko sauvat alttiita vääntömuodonmuutokselle vai ei. (12, s. 195.)

Taulukossa 6 esitetyt termit e_{Ny} ja e_{Nz} ovat nolla, koska kattilapilareiden rakenneputket ovat symmetriset. Rakenneputkilla χ_{LT} on 1,0, jos kiepahdus ei ole kriittisesti mitoittava tekijä, mutta muuten lasketaan kaavan 34 mukaan. Myös hitsatuissa kattilapalkeissa, mikäli ne eivät altistu vääntömuodonmuutokselle, χ_{LT} saa arvon 1,0; muulloin sen arvo määräytyy kaavan 34 mukaan. (12, s. 195; 19, s. 136.)

TAULUKKO 6. Arvot termeille N_{Rk} , $M_{y,Rk}$, $M_{z,Rk}$, ΔM_y ja ΔM_z eri poikkileikkausluokissa (19, s. 136)

Suure	PL1	PL2	PL3	PL4
N_{Rk}	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A_{eff}$
$M_{y,Rk}$	$f_y W_{pl,y}$	$f_y W_{pl,y}$	$f_y W_{el,y}$	$f_y W_{eff,y}$
$M_{z,Rk}$	$f_y W_{pl,z}$	$f_y W_{pl,z}$	$f_y W_{el,z}$	$f_y W_{eff,z}$
ΔM_y	0	0	0	$e_{Ny} N_{Ed}$
ΔM_z	0	0	0	$e_{Nz} N_{Ed}$

KAAVA 19. Poikkileikkauksen kestävyden ominaisarvot (9, s. 107)

$$N_{Ed} = f_y A_i$$

$$M_{y,Ed} = f_y W_y$$

$$M_{z,Ed} = f_y W_z$$

f_y = myötölujuus

A_i = plastisuusteorian mukainen poikkileikkausala

W_y = plastisuusteorian mukainen taivutusvastus y-y-akselin suhteen

W_z = plastisuusteorian mukainen taivutusvastus z-z-akselin suhteen

7.2.5 Leikkaus

Kattilapilareiden leikkauskestävyys mitoitetaan standardin SFS-EN 1993-1-1 kohdan 6.2.6 mukaisesti, ja mitoitus tehdään y-akselin ja z-akselin suhteen. Kaavassa 20 on esitetty leikkauskestävyyden mitoitusehto, jossa leikkausvoiman mitoitusarvon V_{Ed} tulee olla pienempi kuin poikkileikkauksen leikkauskestävyyden V_{Rd} . Kaavassa 21 on plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ laskentakaava ja kaavassa 22 siihen tarvittava rakenneputken leikkauspinta-ala A_v .

KAAVA 20. Leikkauskestävyyden mitoitusehto (19, s. 98)

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

V_{Ed} = murtorajatilan leikkausvoiman mitoitusarvo

V_{Rd} = plastinen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$

KAAVA 21. Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ laskentakaava (19, s. 99)

$$V_{pl.Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

A_v = leikkauspinta-ala

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{m0} = kestävyiden osavarmuusluku

KAAVA 22. Suorakaiteen tai neliön muotoisen leikkauspinta-ala A_v (19, s. 99–100)

$$A_v = A \frac{h}{b + h}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

h = poikkileikkauksen korkeus leikkausvoiman suunnassa

b = poikkileikkauksen leveys

7.3 Kattilapalkkien mitoitus

7.3.1 Nurjahduskestävyys

Kattilapalkkien nurjahduskestävyys mitoitetaan samalla kaavalla kuin kattilapilarit kohdassa 7.2.1. Nurjahduskäyrä valitaan kuvasta 17 hitsatut I-profiilit kohdasta. Nurjahduskäyrään vaikuttaa materiaali ja laipan paksuus t_f , jotka ovat tässä tapauksessa S235 ja 30 mm. Z-z-akselin suunnassa nurjahduskäyrä on c ja y-y-akselin suunnassa b. Näistä saadaan epätarkkuustekijäksi α 0,49 z-z-akselin suunnassa ja 0,34 y-y-akselin suunnassa. Näiden määritysten jälkeen nurjahduskestävyyden mitoitus jatketaan normaalisti.

7.3.2 Taivutus ja aksiaalinen voima

Kattilapalkkeihin sovelletaan samaa lineaarista yhteisvaikutusyhtälöä ja mitoitusehto kuin kattilapilareissa kohdassa 7.2.4, mutta käytetään kimmoteorian mukaisia arvoja. Poikkileikkauksen kestävyyskaavat eroavat hieman onko kyseessä rakenneputki vai I-profiili. Alla on esitetty kattilapalkkien mitoitukseen sopivat kaavat. Kaavoissa 23 ja 24 on esitetty mitoitusehdot siitä, tarvitseeko ottaa huomioon aksiaalisen voiman vaikutus plastisuusteorian mukaiseen taivutusmomenttikestävyyteen y- tai z-akselin suhteen. Pienentynyt taivutuskestävyys voidaan laskea likimäärin kaavoista 25–26. Kahden akselin suunnassa tapahtuvassa taivutuksessa käytetään kaavan 29 ehtoa. α - ja β -arvona voidaan käyttää myös varman puolella olevaa arvoa 1,0. (20, s. 58.)

KAAVA 23. Mitoitusehto, jolloin ei tarvitse ottaa huomioon kestävyttä y-y-akselin suhteen (20, s. 58)

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_f f_y}{\gamma_{M0}} \text{ ja } N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd}$$

h_w = uuman korkeus

t_f = laipan paksuus

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} = kestävyysosavarmuusluku

$N_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo

KAAVA 24. Mitoitusehto, jolloin ei tarvitse ottaa huomioon kestävyttä z-z-akselin suhteen (20, s. 58)

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

h_w = uuman korkeus

t_w = uuman paksuus

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} = kestävyden osavarmuusluku

$N_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo

KAAVA 25. Taivutus y-akselin suhteen (9, s. 91)

$$M_{y,N,Rd} = \min \left\{ \frac{1-n}{1-0,5a}, 1,0 \right\} M_{y,pl,Rd}$$

n = normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyyden mitoitusarvon suhde (kaava 28)

a = termi kaavasta 27

$M_{y,pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys y-y akselin suunnassa

$M_{z,pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys z-z akselin suunnassa

KAAVA 26. Taivutus z-akselin suhteen (9, s. 91)

$$M_{z,N,Rd} = \begin{cases} M_{z,pl,Rd} & , \text{kun } n \leq a \\ \min \left\{ 1 - \left(\frac{1-n}{1-a} \right)^2, 1,0 \right\} M_{z,pl,Rd} & \end{cases}$$

$M_{z,pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen taivutusmomenttikestävyys z-z akselin suunnassa

n = normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyyden mitoitusarvon suhde (kaava 28)

a = termi kaavasta 27

KAAVA 27. Poikkileikkauksen uuman pinta-alan ja bruttopinta-alan suhde (9, s. 91)

$$a = \min \left\{ \frac{A - 2b_f t_f}{A}, 0,5 \right\}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

b_f = laipan leveys

t_f = laipan paksuus

KAAVA 28. Normaalivoiman mitoitusarvon ja normaalivoimakestävyyden mitoitusarvon suhde (9, s. 91)

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

N_{Ed} = normaalivoiman mitoitusarvo

$N_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo

KAAVA 29. Kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa yhteisvaikutusehto (20, s. 59)

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1$$

α = potenssin arvo on 2

β = potenssin arvo on $5n$, mutta suurempi kuin 1

7.3.3 Leikkaus

Kattilapalkkien leikkauskestävyydestarkastelu tehdään saman standardin mukaisesti kuin kattilapila-reissa. Leikkauskestävyyden mitoitusehto perustuu samaan kaavaan kuin kaava 20, ja leikkauskestävyyden laskemiseen sovelletaan plastisuusteoriaa kaavan 21 mukaisesti. Kattilapalkit ovat hitsattuja I-profiileja, joten niiden leikkauspinta-ala A_V lasketaan kaavalla 30. Tekijä η arvo valitaan materiaalin perusteella taulukosta 7, mutta varman puolen arvona voidaan käyttää $\eta = 1,0$. (12, s. 153.)

KAAVA 30. Leikkauspinta-ala A_V hitsaamalla valmistetuille I-poikkileikkauksille (12, s. 152)

$$A_V = \eta \sum (h_w t_w), \text{ kun kuormitus on uuman suuntainen}$$

$$A_V = A - \sum (h_w t_w), \text{ kun kuormitus on laippojen suuntainen}$$

η = tekijä, joka ottaa huomioon muokkauslujittumisen (taulukko 7).

h_w = uuman korkeus

t_w = uuman paksuus

A = poikkileikkauksen pinta-ala

TAULUKKO 7. Tekijän η arvot leikkauskestävyydelle (12, s. 153)

S235-S460	S500-S700
$\eta = 1,20$	$\eta = 1,0$

7.3.4 Kiepahdus

Kun sauvaa taivutetaan vahvemman akselin ympäri, sen puristettu laippa saattaa menettää stabiilisuutensa ja nurjahtaa sivusuuntaan. Tämä saa aikaan kiertymisen pituusakselinsa ympäri, mikä tunnetaan nimellä kiepahdus (lateral torsional buckling, LBT). Erityisesti hoikat ja korkeat I-profiilit ovat alttiita tälle ilmiölle. (12, s. 140.)

Kaavassa 31 on esitetty kiepahduskestävyyden mitoitusehto. Kiepahduskestävyyden mitoitusarvon laskukaava on esitetty kaavassa 32 ja siihen tarvittavia muuttujia kaavoissa 33–35 ja taulukoissa 8 ja 9. Taulukosta 8 saadaan kattilapalkkien kiepahduskäyräksi d, kun poikkileikkauksen korkeuden ja leveyden suhde on suurempi kuin 2 (taulukko 8). Kiepahduskäyrä d vastaa epätarkkuustekijän α_{LT} arvoa 0,79 (taulukko 9).

KAAVA 31. Taivutetun sauvan mitoitusehto kiepahdukselle (12, s. 141)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

M_{Ed} = taivutusmomentin mitoitusarvo

$M_{b,Rd}$ = kiepahduskestävyyden mitoitusarvo

KAAVA 32. Kiepahduskestävyyden mitoitusarvon laskukaava (12, s. 141)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

χ_{LT} = kiepahduskestävyyden pienennystekijä

W_y = taivutusvastus poikkileikkausluokassa 3 $W_{el,y}$

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M1} = kestävyysosavarmuusluku

KAAVA 33. Muunnettu hoikkuus kiepahdukselle (12, s. 142)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{f_y W_y}{M_{cr}}}$$

f_y = materiaalin nimellinen myötölujuus

W_y = taivutusvastus poikkileikkausluokassa 3 $W_{el,y}$

M_{cr} = kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa

KAAVA 34. Kiepahduskestävyyden pienennystekijä (9, s. 101)

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, 1, 0 \right\}$$

$\bar{\lambda}_{LT}$ = muunnettu hoikkuus

ϕ_{LT} = muuttuja kaavasta 35

KAAVA 35. Pienennystekijän χ_{LT} määrittämisessä tarvittava muuttuja (12, s. 142)

$$\phi_{LT} = 0,5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2)) + \bar{\lambda}_{LT}^2$$

$\bar{\lambda}_{LT}$ = muunnettu hoikkuus

α_{LT} = epätarkkuustekijä taulukosta 8

TAULUKKO 8. Kiepahduskäyrän valinta (9, s. 103)

Poikkileikkaus	Rajaehdot	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Muut (U- ja C-profiilit)	ei ehtoja	d

TAULUKKO 9. Epätarkkuustekijän α_{LT} arvot (9, s. 103)

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,79

8 TULOKSET

Kattilan kannatinrakenteen stabiilisuus- ja mitoitustarkastelussa selvitettiin rakenteen kestävyyttä nykyaikaisilla standardeilla, kun rakenteita osittain puretaan ja lisätään uutta teknologiaa. STAAD.pro-analyysiohjelma tarjoaa mahdollisuuden tulosten tulostamiseen haluttuun muotoon. Kuvissa 18–22 on esitetty STAAD:sta saatuja tuloksia. Merkittävä kuormitustapaus kannatinrakenteille on tapaus LC10, joka sisältää kattilasta aiheutuvat kuormat. Kun oikeat parametrit, olettamukset ja kuormat otettiin huomioon, päädyttiin tulokseen, että kattilan kannatinrakenne kestää vaaditut kuormat.

Kattilapilareiden sauva numero 1427 saavutti korkeimman käyttöasteen, 81,4 %. Jokaiselle mitoitetulle sauvalle on annettu parametri TRACK 2, joka tarjoaa yksityiskohtaiset tulokset kyseiselle sauvatyypille. Kuvassa 18 esitetään tarkemmat tulokset sauvasta numerosta 1427. Sauvan mitoitavana tekijänä oli EC-6.3.3–662, joka on yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen rasittamille sauvoille asetetut ehto, ja tämä ehto on esitetty myös kappaleessa 7.2.4 ja kaavassa 18. Sauvassa kohdistuu x-suuntaista rasiitusta 2231,78 kN sekä momenteja ainoastaan y-suunnassa -72 kN-m ja z-suunnassa 1 kN-m. Tästä voidaan päätellä, että kattilapilarit ovat puristettuja ja hyvin sivuttaistuettuja, sillä momenttien suuruus suhteessa puristukseen on vähäinen. Kriittisin kuormitusyhdistelmä on numero 19, jossa otetaan huomioon 1,35-kertainen kerroin pysyvälle kuormalle (LC1) ja pysyvälle ripustuskuormalle (LC10).

ALL UNITS ARE - KN METE (UNLESS OTHERWISE NOTED)

MEMBER	TABLE	RESULT/ FX	CRITICAL COND/ MY	RATIO/ MZ	LOADING/ LOCATION
1427 ST	CFSHS_350X10(UPT)	PASS	EC-6.3.3-662	0.814	19
		2231.78 C	-72.01	1.09	3.95

MATERIAL DATA

Grade of steel = S 275
Modulus of elasticity = 205 kN/mm²
Design Strength (py) = 275 N/mm²

SECTION PROPERTIES (units - cm)

Member Length = 395.50
Gross Area = 132.57 Net Area = 132.57

	z-axis	y-axis
Moment of inertia	25189.133	25189.133
Plastic modulus	1734.500	1734.500
Elastic modulus	1439.379	1439.379
Shear Area	66.283	66.283
Radius of gyration	13.784	13.784
Effective Length	520.000	520.000

DESIGN DATA (units - kN,m) EUROCODE NO.3 /2005

Section Class : CLASS 2
Squash Load : 3645.58
Axial force/Squash load : 0.612
GM0 : 1.00 GM1 : 1.00 GM2 : 1.25

	z-axis	y-axis
Slenderness ratio (KL/r)	37.7	37.7
Compression Capacity	3204.0	3204.0
Tension Capacity	3645.6	3645.6
Moment Capacity	477.0	477.0
Reduced Moment Capacity	242.1	242.1
Shear Capacity	1052.4	1052.4

BUCKLING CALCULATIONS (units - kN,m)

Lateral Torsional Buckling Moment MB = 477.0
co-efficients C1 & K : C1 =1.127 K =1.0, Effective Length= 5.200
Lateral Torsional Buckling Curve : Curve b
Elastic Critical Moment for LTB, Mcr = 26120.4
Compression buckling curves: z-z: Curve c y-y: Curve c
Critical Load For Torsional Buckling, NcrT = *****
Critical Load For Torsional-Flexural Buckling, NcrTF = *****

KATTILAN KANNATUSRAKENTEEN VERIFIIOINTI -- PAGE NO. 1354

CRITICAL LOADS FOR EACH CLAUSE CHECK (units- kN,m):

CLAUSE	RATIO	LOAD	FX	VY	VZ	MZ	MY
EC-6.3.1.1	0.698	19	2237.2	1.4	20.9	4.6	-10.5
EC-6.2.9.1	0.297	19	2231.8	-1.4	-20.9	1.1	-72.0
EC-6.3.3-661	0.813	19	2231.8	-1.4	-20.9	1.1	-72.0
EC-6.3.3-662	0.814	19	2231.8	-1.4	-20.9	1.1	-72.0
EC-6.2.6-(Z)	0.020	19	2237.2	1.4	20.9	4.6	-10.5
EC-6.2.6-(Y)	0.001	19	2237.2	1.4	20.9	4.6	-10.5

ADDITIONAL CLAUSE CHECKS FOR TORSION (units- kN,m):

CLAUSE	RATIO	LOAD	DIST	FX	VY	VZ	MZ	MY	MX
EC-6.2.7(5)	0.635	19	4.0	2231.8	-1.4	-20.9	1.1	-72.0	0.2

KUVA 18. Kattilapilarin sauva nro. 1427 laskentatulokset (5)

Kattilapalkkien sauvanumerot 2950 ja 2947 saavuttivat korkeimman käyttöasteen, 83,7 %. Kuvassa 19 on esitetty tarkemmat laskentatulokset sauvanumerolle 1950. Kriittisin kuormitusyhdistelmä on sama kuin kattilapilareilla eli numero 19 ja mitoittava tekijä EC-6.3.3-662. Kuvasta 19 huomataan myös, että yhteisvaikutustekijän kaavat eivät ole ainoita mahdollisia mitoittavia tekijöitä. Kiepahduksen eli EC-6.3.2 LTB käyttöaste on 82,7 %, joka on lähes yhtä korkea kuin mitoittava tekijä. Kattilapalkkien kiepahduspituutena on valittu palkkien täyspituus, mutta on silti huomioitava, että ne voivat olla alttiita kiepahdukselle

Kattilapalkin sauvassa numero 1950 on z-suuntaista momenttia -3434 kN-m ja tämä johtunee siitä, että kattilapalkit ovat pääosin taivutettuja. Lisäksi kattilapalkeissa esiintyi kohtuullisen paljon puristusta. Tämä saattaa johtua ilmiöstä, jossa rakenteen pilaripalkkikehät kaartuvat toisiaan kohti alapäin vaikuttavan voiman seurauksena, jolloin sekundääriset kattilapalkit jäävät puristuksen väliin.

ALL UNITS ARE - KN METE (UNLESS OTHERWISE NOTED)

MEMBER	TABLE	RESULT/ FX	CRITICAL COND/ MY	RATIO/ MZ	LOADING/ LOCATION
--------	-------	---------------	----------------------	--------------	----------------------

2950 ST	WI18001530650	(UPT)			
	PASS	EC-6.3.3-662	0.837	19	
	72.74 C	0.06	-3434.16	0.00	

MATERIAL DATA

Grade of steel = S 235
 Modulus of elasticity = 205 kN/mm2
 Design Strength (py) = 235 N/mm2

SECTION PROPERTIES (units - cm)

Member Length = 208.00
 Gross Area = 651.00 Net Area = 651.00

	Z-axis	Y-axis
Moment of inertia	: 3713372.250	137361.406
Plastic modulus	: 45868.496	6435.374
Elastic modulus	: 41259.695	4226.505
Shear Area	: 390.000	261.000
Radius of gyration	: 75.526	14.526
Effective Length	: 1550.000	1550.000

DESIGN DATA (units - kN,m) EUROCODE NO.3 /2005

Section Class : CLASS 3
 Squash Load : 15298.50
 Axial force/Squash load : 0.005

KATTILAN KANNATUSRAKENTEEN VERIFIIOINTI

-- PAGE NO. 2140

*

GM0 : 1.00 GM1 : 1.00 GM2 : 1.25

	Z-axis	Y-axis
Slenderness ratio (KL/r)	: 20.5	106.7
Compression Capacity	: 15197.8	7117.6
Tension Capacity	: 15298.5	15298.5
Moment Capacity	: 9696.0	993.2
Reduced Moment Capacity	: 9696.0	993.2
Shear Capacity	: 5291.4	3541.2

BUCKLING CALCULATIONS (units - kN,m)

Lateral Torsional Buckling Moment MB = 4153.1
 co-efficients C1 & K : C1 =1.127 K =1.0, Effective Length=15.500
 Lateral Torsional Buckling Curve : Curve d
 Elastic Critical Moment for LTB, Mcr = 7989.1
 Compression buckling curves: z-z: Curve b y-y: Curve c
 Critical Load For Torsional Buckling, NcrT = 17137.7
 Critical Load For Torsional-Flexural Buckling, NcrTF = 17137.7

SHEAR BUCKLING CALCULATIONS [EN1993-1-5] (units - kN,m)

Stiffeners not provided.
 Design Resistance for Shear Buckling, VbRd = 2189.2

CRITICAL LOADS FOR EACH CLAUSE CHECK (units- kN,m):

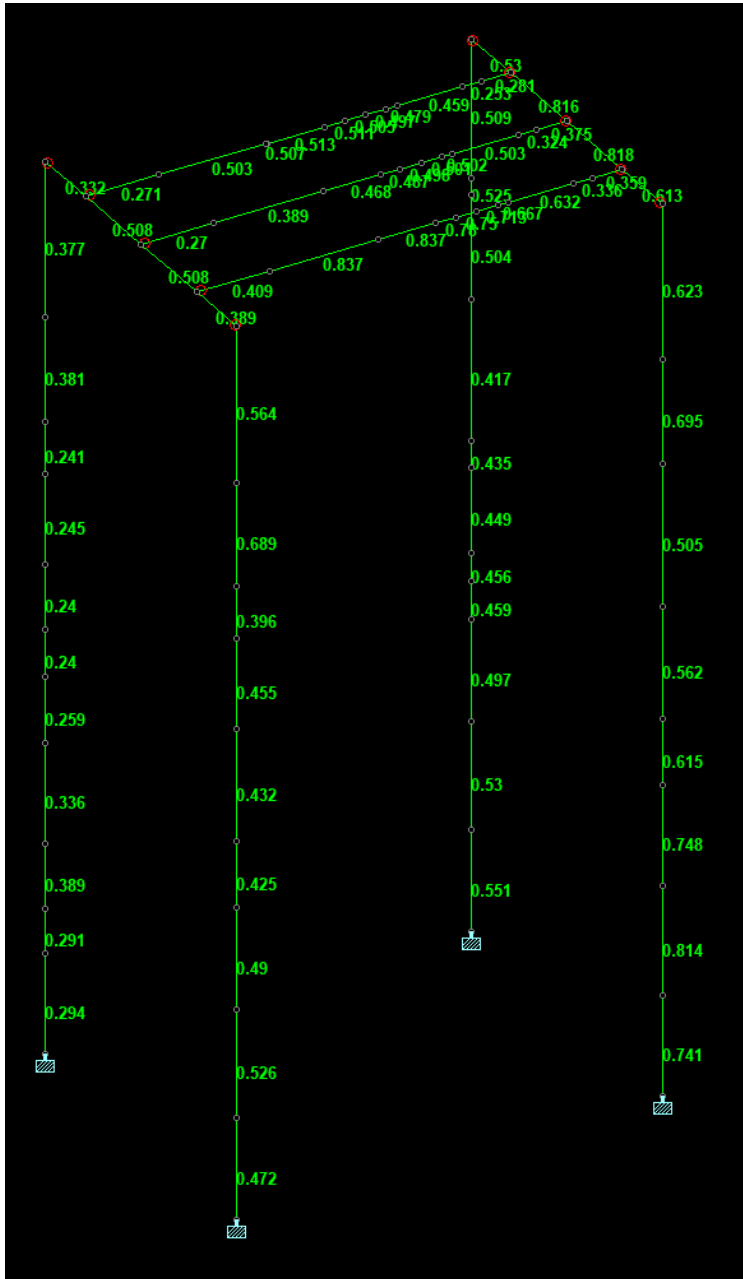
CLAUSE	RATIO	LOAD	FX	VY	VZ	MZ	MY
EC-6.3.1.1	0.010	19	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1
EC-6.3.3-661	0.813	19	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1
EC-6.3.3-662	0.837	19	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1
EC-6.2.6-(Y)	0.043	19	72.7	151.3	-0.3	3198.2	-0.6
EC-6.3.2 LTB	0.827	19	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1
EC-6.2.9.2/3	0.359	19	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1
EC3-5: 5.5	0.069	19	72.7	151.3	-0.3	3198.2	-0.6

ADDITIONAL CLAUSE CHECKS FOR TORSION (units- kN,m):

CLAUSE	RATIO	LOAD	DIST	FX	VY	VZ	MZ	MY	MX
EC-6.2.7(5)	0.130	19	0.0	72.7	-75.6	0.3	-3434.2	0.1	1.2


KUVA 19. Kattilapalkin sauvan nro. 1950 laskentatulokset

Kun tarkastellaan käyttöasteita kokonaisuutena, havaitaan, että käyttöasteet ovat hieman suurempia kannatinrakenteen oikealla puoliskolla (kuva 20). Tämä johtuu osittain siitä, että K7-kattilan sijainti on enemmän oikealla ja siten myös kuormitus painottuu tälle puolelle. Myös kattilapilareiden välillä on havaittavissa huomattavia eroja. Etumaisien kattilapilareiden väliin asennetaan ristikko uuden teknologian vuoksi, mikä aiheuttaa noin 56,2–57,4 kN-m momentin pilareihin.




KUVA 20. Kannatinrakenteen käyttöasteet (5)

Sauvalla 2950 havaitaan myös suurimmat siirtymän käyttöasteet. Kuvassa 22 tarkastellaan muuttuvista kuormista johtuvaa siirtymän käyttöastetta ja kuvassa pysyvistä kuormista johtuvaa siirtymän käyttöastetta. Kattilapalkkitasolla muuttuvat kuormat rajoittuvat pääasiassa tasojen aiheuttamaan käytön aikaiseen kuormaan, joka on erittäin pieni. Tämä selittää kuvassa 22 havaitun erittäin pienen käyttöasteen, kun taas pysyvistä kuormista johtuva ripustuskuorman aiheuttama siirtymän käyttöaste on kohtuullisen suuri (kuva 21). Kuvien "Limit v." -kohta ilmoittaa asetetun siirtymän raja-arvon kohdassa 5.3, kun taas "Actual v." kertoo, mikä voisi olla maksimi raja-arvo, jossa sauva vielä läpäisee siirtymätarkastelun.

Results							
No.	Item	Limit v.	Actual v.	Ratio	R./Failure R.	Results	Lc
1	Beam Deflection	1/1000	1/1701,2	0,59	0,59		216
Max(Ratio/Failure ratio)		0,588					

KUVA 21. Sauvan pysyvän kuorman siirtymän tulokset

Results							
No.	Item	Limit v.	Actual v.	Ratio	R./Failure R.	Results	Lc
1	Beam Deflection	1/800	1/4493,6	0,18	0,18		217
Max(Ratio/Failure ratio)		0,178					

KUVA 22. Sauvan 2950 muuttuvan kuorman siirtymätarkastelutulokset

9 YHTEENVETO

Rakenteiden verifiointi on vaativaa insinööriötä. Se vaati erityistä perehtymistä tutkittavaan aiheeseen ja valtavasti tietotaitoa, jotta osasi tehdä oikeanlaisia oletuksia. Työssä tarvittiin useiden viikkojen perehtymistä SFS:n standardeihin sekä kansallisiin liitteisiin, STAAD.pro-analyysiohjelmaan, teräsrakentamiseen, kattilarakentamiseen ja teräksen uudelleenkäytön dokumentteihin eri kielillä. Lisäksi piti perehtyä projektiin käytännössä paikan päällä työmaalla.

Verifiointin tulokset olivat positiiviset, sillä havaittiin, ettei kannatinrakenteita tarvinnut vahvistaa tai tehdä muita jatkotoimenpiteitä tämän opinnäytetyön suorittamien tutkimusten perusteella. K7-kattilan kannatinrakenteen tiedettiin kestävän sekä nykyiset kuormat että uuden teknologian mukaan tuomat kuormat polttoainekonversion yhteydessä.

Tuloksia on syytä tarkastella kriittisesti, sillä esimerkiksi käytetyn materiaalin valinta ja siitä johtuvat ominaisuudet määriteltiin käytettävissä olevan tiedon perusteella. Oletukset pyrittiin tekemään perustellusti ja varman päälle, jotta laskelmat ovat mahdollisimman luotettavia. Lisäksi on huomioitava, että Suomessa ei vielä ollut virallisia ohjeistuksia teräksen uudelleenkäyttöön rakentamisessa, mikä vaikutti suunnitteluprosessiin.

Rakenteita voidaan tutkia yksityiskohtaisemmin aineen rikkomista vaativilla materiaalikokeilla, jotka tarjoavat tarkempaa tietoa teräksen ominaisuuksista. Kiertotalouden näkökulmasta on mahdollisuus arvioida, kuinka paljon projektissa säästettiin luonnonvaroja verrattuna täysin uuden teräsrakenteen rakentamiseen. Lisäksi kattilapalkkien mitoitusta leikkauslommahduksen suhteen voidaan optimoida entistä tarkemmin.

Salmisaaren A-voimalaitoksen kaltaiset teräsrakenteiden uudelleenkäyttöprojektit varmasti lisääntyvät tulevaisuudessa. Opinnäytetyön avulla saatiin kartoitettua olemassa olevia materiaaleja teräksen uudelleenkäyttöä varten. Lisäksi odotetaan, että tällä opinnäytetyöllä on positiivisia vaikutuksia esimerkiksi suunnitteluperiaatteisiin ja verifiointiperiaatteisiin vanhojen teräsrakenteiden hyödyntämisessä.

LÄHTEET

1. Aalto, Laura & Helsingin Energia 2009. Voimalaitosrakentamista ja näkymiä tulevaisuuteen: 100 vuotta energiarakentamista Helsingissä, osa 4. Helsinki: Helsingin Energia.
2. Arponen, Timo. 2024. LinkedIn-päivitys 25.04.2024. Hakupäivä 26.4.2024. https://www.linkedin.com/posts/timo-arponen-823b356_pian-salmisaarikin-on-valmis-taas-t%C3%A4n%C3%A4%C3%A4n-activity-7189236202145734656-Eny1?utm_source=share&utm_medium=member_desktop.
3. Helen Oy 2023. Pelletti korvaa kivihiilen käyttöä Salmisaarella. Hakupäivä 28.2.2024. <https://www.helen.fi/uutiset/2023/pelletti-korvaa-kivihiilen-kayttoa-salmisaarella>.
4. Helsingin kaupunki 2024. Ympäristöhakemus. Helen Oy, Salmisaaren voimalaitos, ESAVI. 2. Ympäristölupahakemus lupamääräysten tarkistamiseksi suurten BAT-päätelmien julkaisun takia 31.10.20018. Hakupäivä 28.2.2024.
5. Ramboll Oy. Sisäinen lähde.
6. Huhtinen, Markku, Kettunen, Arto, Nurminen, Pasi & Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita.
7. Helen Oy 2023. Ilmastotavoitteet. Hakupäivä 28.2.2024. <https://www.helen.fi/tietoa-meista/vastuullisuus/vastuullisuus-helenissa/ilmastotavoitteet>.
8. Huhtinen, Markku, Korhonen, Risto, Pimiä, Tuomo & Urpilainen, Samu 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
9. Teräsrakenneyhdistys ry 2020. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 -oppikirja 2020. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
10. Teräsrakenneyhdistys ry 2023. Tekninen julkaisu 3–2023: Teräsrakenteiden uudelleenkäyttö. https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1289/467acd9/Terasrakenteiden_uudelleenkaytto_30_06_2023_ISBN_952_9683_49_9.pdf.
11. Huuskonen, Reino 2022. Vanhojen teräspalkkirunkoisten välipohjien kantavuuden ja palonkestojen selvittäminen. Turun ammattikorkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan insinööri. Opinnäytetyö. Hakupäivä 15.4.2024. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/751712/Huuskonen_Reino.pdf;jsessionid=9DA7875F69C045D3B32DC043E976DF23?sequence=2.
12. Rautaruukki 2010. Hitsatut profiilit: EN 1993-käsikirja. Helsinki: Rautaruukki.

13. Rakennustieto 2019. RT 103133, Rakennuksen laserkeilaus. Rakennustieto Oy. Hakupäivä 1.3.2024. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20103133>. Vaatii lisenssin.
14. Trimble 2024. Mitä on BIM? Hakupäivä 15.4.2024. <https://www.tekla.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/mit%C3%A4-on-bim>.
15. Bentley Systems, Incorporated 2024. STAAD. Hakupäivä 15.4.2024. <https://www.bentley.com/software/staad/>.
16. Ympäristöministeriö 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Ympäristöministeriö. Hakupäivä 4.3.2024. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf/00fb719c-365d-d570-618e-cad1004fbc5b/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf?t=1603260660111.
17. SFS-EN 1990+A1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 1.3.2024. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/150857.html.stx>. Vaatii lisenssin.
18. SFS-EN 1911-1-1+AC. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 1.3.2024. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/170636.html.stx>. Vaatii lisenssin.
19. Rautaruukki 2012. Rakenneputket: EN 1993 -käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki.
20. SFS-EN 1993-1-1. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä 7.3.2024. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9344.html.stx>. Vaatii lisenssin.
21. Bentley. STAAD.Pro Help: D5.C.5.4.2 Detailed stress check. Hakupäivä 11.3.2024.
22. Mekaniska Verkstädernas Riksförbund 2021. Återbruk av stål i bärande konstruktioner. <https://mvr.se/wp-content/uploads/2021/05/mvr-bs04-2021-aterbruk-av-stal-i-barande-konstruktioner-krav-processbeskrivning-utgava-1-april-2021.pdf>.