

Jesse Kyösti

HAKAMETSÄN JÄÄHALLIN KATTORAKENNESELVITYS

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Lauri Pennala
5/2020

TIIVISTELMÄ

Jesse Kyösti: Hakametsän jäähallin kattorakenneselvitys
Analysis of the Hakametsä ice rink roof structure
Kandidaatintyö, 30 sivua
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia Hakametsän jäähallin kattorakennetta ja sen toimintaperiaatteita. Köysirakenteisesti toteutetusta jäähallin kattorakenteesta saatiin selville rakenteen tarkat muodot, rakenneosien lukumäärät sekä mitat rakennepiirustusten avulla. Kattorakenteessa käytettyjen teräsköysien tarkkoja materiaaliominaisuuksia ei työssä saatu selville johtuen saatavilla olevan tiedon puutteesta ja jäähallin varhaisesta rakennusajasta. Jäähallin kattorakenteesta toteutettiin 3D-mallinnus Grasshopper-ohjelmalla rakennepiirustusten avulla.

Työssä perehdyttiin köysirakenteiden kattorakenteiden ja niissä käytettävien köysien teoriaan sekä käyttökohteisiin. Köysirakenteista selvitettiin, millaisiin rakenteisiin erilaiset köysirakennetyypit voidaan jaotella. Lisäksi tutkittiin, millaisia köysityyppejä rakenteissa käytetään ja mihin niiden lujuusominaisuudet perustuvat. Köysirakenteiden teorian avulla selvitettiin Hakametsän jäähallin kattorakenteen rakennetekninen toiminta.

Työn yhtenä osa-alueena oli tutkia ja selvittää, miten rakentamisajankohdan mukaiset ja nykyaikaiset suunnittelustandardit eroavat toisistaan. Vertailu suoritettiin vuoden 1955 Rakenteiden kuormitusmääräyksien ja nykyaikaisen Eurokoodin sekä Suomen kansallisen liitteen välillä. Vertailussa keskityttiin pääasiassa lumi- ja tuulikuorman määritystapojen eroavaisuuksiin. Selvityksen mukaan, suunnitteluohjeet ovat nykyaikana huomattavasti yksityiskohtaisempia sekä laajempia ja rakennesuunnittelija joutuu tekemään merkittävästi vähemmän omia arvioita.

Jäähallin kattorakenteelle suoritettiin yksinkertainen laskennallinen tarkastelu, jonka tavoitteena oli selvittää yksittäiseen teräsköyteen kohdistuvat rasitukset karkeasti. Yksinkertaistuksen vuoksi laskenta suoritettiin staattisena, joten laskennassa ei huomioida rakenteen värähtelyä. Köyden rasitukset laskettiin kahdella tapaa: käsin laskemalla ja RFEM-laskentaohjelmalla. Lisäksi rasitukset laskettiin sekä rakennusaikaisilla että nykyaikaisilla kuormituksilla. Työssä tehtyjen rajausten ja epätarkkuustekijöiden takia työssä ei oteta kantaa rakenteen kestävyuden riittävyyteen ja laskettuja tuloksia ei voida soveltaa käytännössä.

Avainsanat: Hakametsä, köysirakenne, kattorakenne, rakenneselvitys, jäähalli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistolle yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa keväällä 2020.

Haluan kiittää Sweco Rakennetekniikka Oy:n Juha Kukkosta mielenkiintoisesta aiheesta sekä työn hyvästä ohjauksesta. Lisäksi haluaisin kiittää kandidaatintyöseminaarin pienryhmääni mukavista tapaamisista ja vertaistuesta.

Tampereella, 12.5.2020

Jesse Kyösti

MÄÄRITELMÄT

Ankkurointi	Rakenneosan kiinnitystapa. Köysirakenteissa useasti koko rakenne ankkuroidaan maahan. Lisäksi yksittäiset köydet voidaan ankkuroida esimerkiksi palkkeihin.
Esijännitys	Esijännitys on rakenteen jännittämistä ennen kuin sitä kuormitetaan. Köysirakenteissa vetoköysiä voidaan esijännittää vetojännityksellä, jolloin pienennetään köyden muodonmuutoksia kuormitettuna.
Köysirakenne	Rakenne, jossa kantavana rakenteena käytetään köysiä. Köysirakenne voi vastaanottaa pelkästään vetojännityksiä.
Murtorajatila	Murtorajatilassa kuormia korotetaan murtorajatilan mukaisilla osavarmuuskertoimilla. Murtorajatilan mukaisia rasituksia verrataan rakenteen murtokestävyyteen käyttöasteen selvittämiseksi.
Punosköysi	Nykyaikana yleinen köysirakenteissa käytettävä köysityyppi. Punosköysi koostuu useasta yhteen kierretystä pienemmästä langasta.
RFEM	3D elementtimenetelmään perustuva rakennemallinnus- ja analyysiohjelma.
Sallittu jännitys	Aiemmin käytössä olleessa sallittujen jännitysten menetelmässä rakenteelle laskettiin suurin sallittu jännitys. Käyttöaste saatiin selville vertaamalla rakenteessa vallitsevia rasituksia sallittuun jännitykseen.
Tukiköysi	Köysirakenteen köysi, jonka tehtävänä on tukea vetoköysiä ja estää esimerkiksi värähtelyn syntymistä niihin.
Vetoköysi	Köysirakenteen köysi, jolle kuormituksesta johtuvat vetojännitykset ohjautuvat.
Vetosauva	Suora, sauvamainen rakenne, joka vastaanottaa pelkästään vetojännityksiä.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. JÄÄHALLIN KATTORAKENNE	3
2.1 Kattorakenteen rakenneosat ja materiaalit	4
2.2 Jäähallin kattorakenteen mallinnus	6
3. KÖYSIRAKENTEINEN KATTORAKENNE	8
3.1 Köysirakenteisen katon toimintaperiaatteet	8
3.2 Köysirakenteissa käytetyt köydet	11
3.3 Hakametsän jäähallin köysirakenteen toiminta	12
4. KUORMITUSMÄÄRÄYKSIEN VERTAILU	15
4.1 Lumikuorma	16
4.2 Tuulikuorma	17
5. KATTORAKENTEEN LASKENNALLINEN TARKASTELU	19
5.1 Teräsköyden kuormat	19
5.1.1 Nykyaikaiset kuormitukset	19
5.1.2 Rakentamisajankohdan mukaiset kuormitukset	21
5.2 Teräsköyden rasiusten laskenta käsin	22
5.2.1 Laskenta nykyaikaisilla kuormilla	22
5.2.2 Laskenta rakennusaikaisilla kuormilla	23
5.3 Teräsköyden rasiusten laskenta RFEM-ohjelmalla	24
5.4 Laskentatulosten yhteenveto	25
6. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	29

1. JOHDANTO

Hakametsän jäähalli, viralliselta nimeltään Tampereen jäähalli, valmistui vuonna 1965 ja oli valmistuessaan Suomen ensimmäinen jäähalli. Jäähalli rakennettiin samana vuonna järjestettävien jääkiekon MM-kisojen pääareenaksi. Hakametsän jäähallin suunnittelusta vastasi arkkitehti Jaakko Tähtinen ja pääurakoitsijana toimi Rakennustoimisto Tähtinen & Sola Oy. (Aamulehti 1965) Rakennesuunnittelusta vastasi tanskalainen suunnittelutoimisto Chr. Ostenfeld & W. Jønson, nykyinen COWI sekä Rakennusteknillinen insinööri-toimisto Heimo Kakko & Co Helsinki (Ostenfeld & Jønson 1964). Euroissa noin 1,2 miljoonaa maksaneeseen jäähalliin mahtuu nykyään 7300 katsojaa, joka on muutostöiden myötä pudonnut valmistumishetken 10 200 katsojan kapasiteetista (Matson-Mäkelä 2015).

Kandidaatintyön aiheena on tutkia Hakametsän jäähallin kattorakennetta. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää jäähallin kattorakenteen muoto ja rakennusmateriaalit sekä rakennetekniset toimintaperiaatteet. Työssä vertaillaan myös rakentamisajankohdan kuormitusmääräyksiä nykyaikaisiin kuormitusvaatimuksiin sekä selvitetään, mihin kuormitukset sijoittuvat nykyajan kuormitusvaatimuksissa. Työssä suoritetaan rakenteelle yksinkertaistettu laskennallinen analyysi kattorakenteen jännitysten selvittämiseksi.

Työn toisessa luvussa perehdytään jäähallin kattorakenteen perustietoihin ja ominaisuuksiin. Tarkastelun kohteena ovat erityisesti kattorakenteen harvinainen muoto ja köysirakenteinen kantava rakenne. Työ sisältää myös kattorakenteen mallinnuksen, joka tehdään rakentamisajankohdan mukaisten rakennepiirustusten pohjalta. Rakenteen mallinnus toteutetaan Rhinoceros 3D-mallinnusohjelman ja siihen saatavan algoritmisen mallinnuksen lisäsovelluksen, Grasshopperin, avulla.

Kolmannessa luvussa keskitytään köysirakenteisen kattorakenteen rakenneteknisiin toimintaperiaatteisiin ja köysirakenteiden teoriaan. Teorian lähdeaineistona käytetään köysirakenteista tehtyjä kirjallisuusteoksia ja tieteellisiä artikkeleita. Luvussa perehdytään myös Hakametsän jäähallin kattorakenteen rakennetekniseen toimintaan. Neljännessä luvussa tutkitaan rakennusaikaisia kuormitusmääräyksiä ja selvitetään, miten määräykset ovat muuttuneet 1960-luvulta nykyaikaan siirryttäessä. Kuormitusten vertailussa keskitytään pääasiassa lumi- ja tuulikuorman määrittystapojen eroihin.

Viidennessä luvussa suoritetaan kattorakenteelle yksinkertaistettu laskennallinen analyysi. Analyysi suoritetaan staattisena, joten laskennassa ei huomioida esimerkiksi värähtelyn vaikutusta rakenteeseen. Laskennan tarkoituksena on arvioida köysiin kohdistuvien rasitusten suuruuksia karkeasti. Laskennallinen analyysi suoritetaan kahdella tavalla: käsin laskemalla sekä FEM-laskentaohjelmistoa apuna käyttäen. Tässä työssä FEM-laskentaan käytetään RFEM-ohjelmaa. Lopuksi yhteenvetoon kerätään kaikki tärkeimmät työn aikana selvitetty tutkimustulokset tiivistettynä ja kootaan tutkimuksen havainnot sekä johtopäätökset.

Hakametsän jäähallin kattorakenteen ainutlaatuisuus tekee tutkimuksen aiheesta merkittävän. Köysirakenteiset kattorakenteet ovat Suomessa harvinaisia ja niistä on tehty tutkimuksia hyvin vähän. Suomessa köysirakenteita on käytetty pääosin riippusilloissa. Tutkimuksen ajankohtaisuutta lisää Hakametsän vapautuminen uuteen käyttöön Kansiareenan valmistuessa vuonna 2021.

2. JÄÄHALLIN KATTORAKENNE

Hakametsän jäähallin kokonaistilavuus on noin 125 000 m³. Tilavuus muodostuu suorakaiteen muotoisesta pohjasta sekä korkeudeltaan vaihtelevasta kattorakenteesta. Jäähallin pidempi sivu on 114,8 m ja lyhyemmän sivun pituusmitta on 76 m. Kattorakenne sijaitsee jäähallin keskellä 19 m jäänpinnan yläpuolella, josta se kaareutuu alenevasti molempiin suuntiin yhteensä 8 m. Jäähallin kokonaistilavuudesta 40 % sijaitsee maanpinnan alapuolella. (Aamulehti 1965) Kattorakenne on kahteen suuntaan kaareutuva ja muistuttaa muodoltaan satulaa. Katto kaareutuu jäähallin pitkältä sivulla keskeltä reunoja kohti mentäessä alaspäin. Lyhyemmän sivun suuntaisesti katto kaareutuu vastaavasti ylöspäin. Jäähallin kattorakenteen muoto on nähtävissä kuvasta 1.

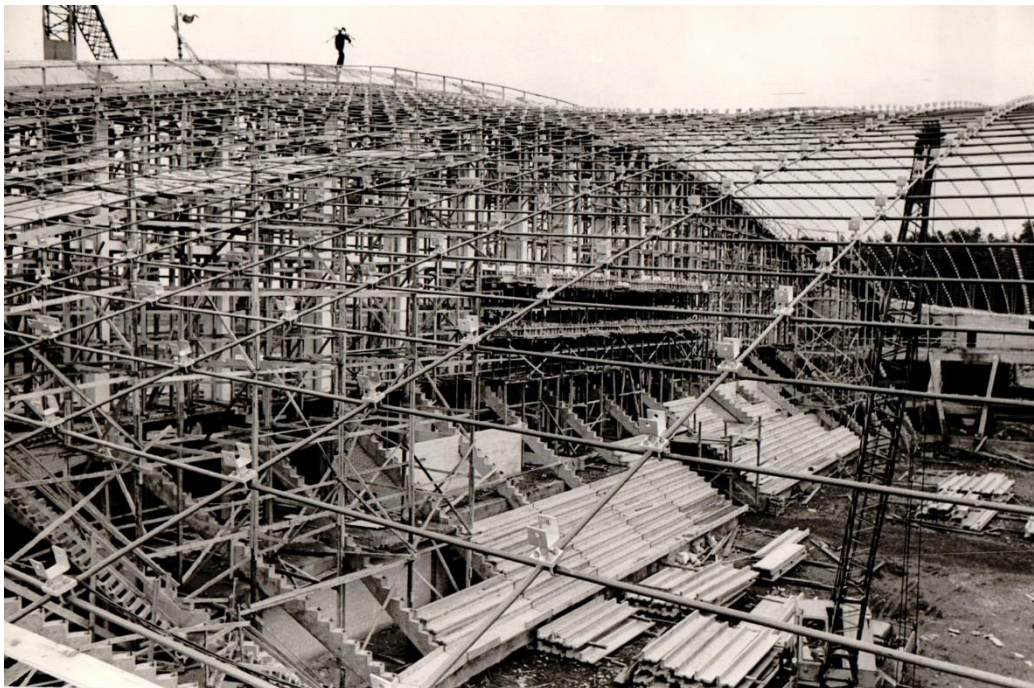


Kuva 1: Hakametsän jäähallin ilmakekuva (Ahola 2018)

Jäähallin kummallakin pitkällä sivulla on kattorakenteesta vinosti maata kohden kulkeutuvia ja pituuksiltaan vaihtelevia vetorakenteita. Vetorakenteita on yhteensä 18 yhtä jäähallin pidempää sivua kohden, ja ne on sijoiteltu kaarevasti jäähallin seinään nähden. Reunimmaisten vetosauvojen alapäävät ovat kauempana jäähallista kuin keskimmäisten vetosauvojen alapäävät.

2.1 Kattorakenteen rakenneosat ja materiaalit

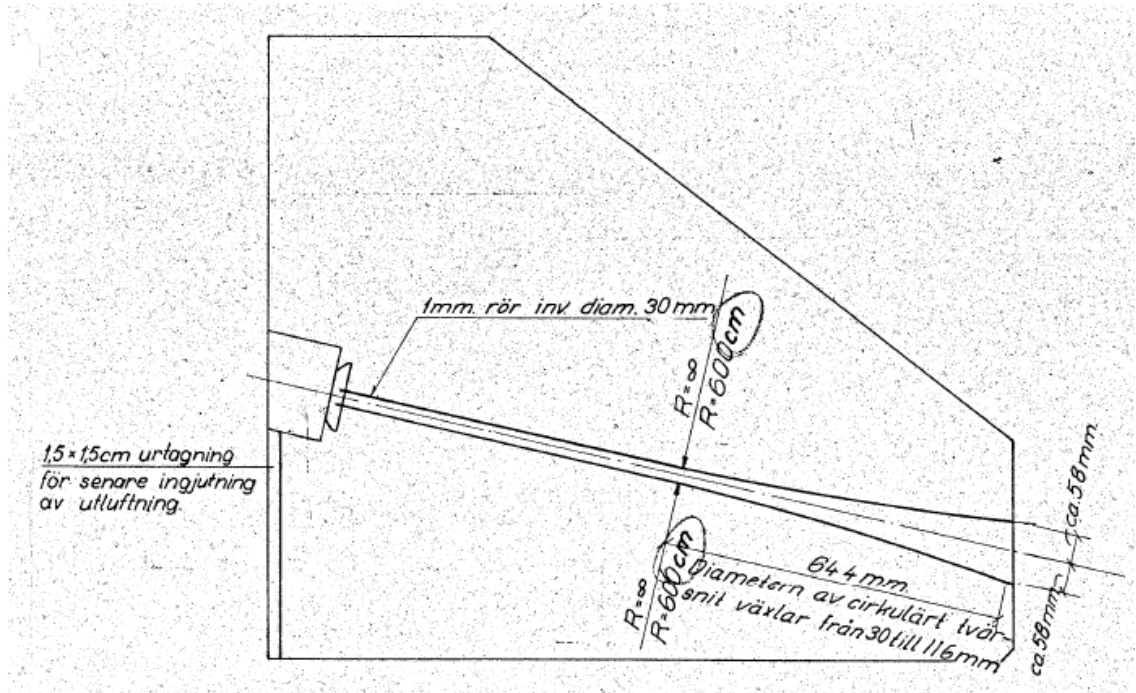
Hakametsän katon kantavana rakenteena toimii sileistä teräsköysistä muodostuva köysirakenne. Köysirakenne koostuu materiaailtaan ja halkaisijoiltaan samanlaisista teräsköysistä, joiden poikkileikkaus on pyöreä ja halkaisija on 26 mm. Köysirakenne muodostuu vetoköysistä sekä tukiköysistä. Vetoköysien tehtävänä on vastaanottaa vetojännityksiä. Tukiköydet tukevat vetoköysiä ja estävät niiden sivusuuntaista liikettä. Vetoköydet kulkevat jäähallin pidemmän sivun teräsbetonisesta kaaripalkista vastakkaisen sivun kaaripalkkiin. Vetoköydet ovat kaarevia ja sijaitsevat jäähallin keskiosassa matalammalla kuin jäähallin reunoilla. Kattorakenteessa on yhteensä 116 teräksistä vetoköyttä. Köydet on sijoitettu rakenteeseen 800 mm:n välein lukuun ottamatta jäähallin keskikohtaa, jossa keskikohdan molemmin puolin on kahden teräsköyden väliin lisätty yksi lisäköysi. (Ostenfeld & Jønson 1964) Kuvassa 2 on esitetty jäähallin köysirakenne rakennusvaiheessa.



Kuva 2: Rakennusaikainen kuva köysirakenteesta (Hakametsän jäähalli 1964)

Kattorakenteen tukiköydet kulkevat vastaavasti lyhyempien sivujen kaaripalkkien välillä. Tukiköydet kaareutuvat toiseen suuntaan, eli jäähallin keskikohdassa tukiköysi on kaaripalkkia korkeammalla. Tukiköysiä on kattorakenteessa yhteensä 36 ja ne on sijoitettu tasaisesti 1600 mm:n välein. Köysirakenteen köydet on rakennettu 15-18 m:n pituisista teräsköysistä, jotka on yhdistetty toisiinsa teräksisellä liitoshylsällä. Teräsköydet kulkevat

kaaripalkkien läpi ankkuroituen lähelle kaaripalkkien ulkopintaa. (Ostenfeld & Jønson 1964) Kuvassa 3 on esitetty liitos teräsköyden ja kaaripalkin välillä.

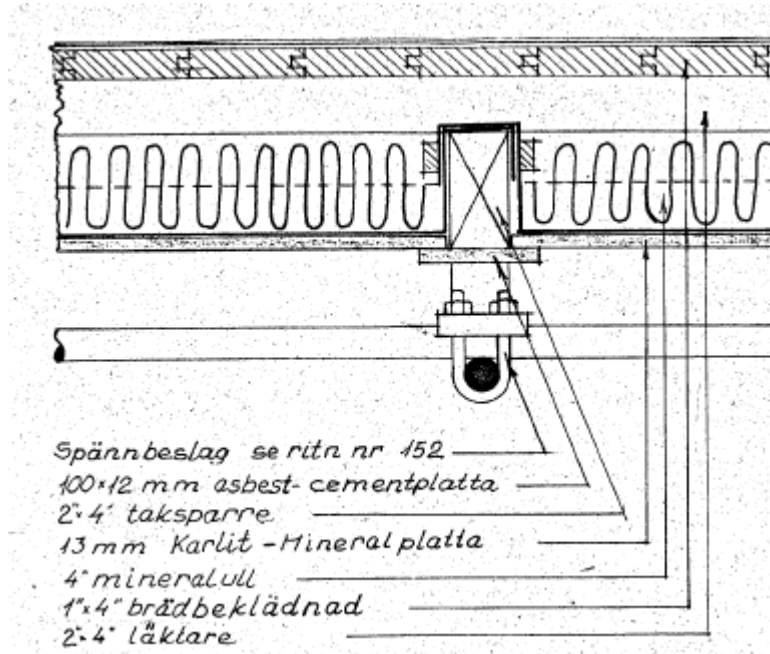


Kuva 3: Teräsköyden ja kaaripalkin välinen liitos (Ostenfeld & Jønson 1964)

Hakametsän jäähallin pidemmillä sivuilla on kaaripalkeista maahan kulkevia vetosauvoja. Vetosauvat eivät suoranaisesti kuulu kattorakenteeseen, mutta ovat kantavan köysirakenteen toimivuuden kannalta keskeisiä. Siitä syystä tarkastellaan hieman myös vetosauvojen rakennetta. Ostenfeldin ja Jønsonin (1964) rakennepiirustusten mukaan vetosauvat ovat poikkileikkaukseltaan epäsäännöllisen kuusikulmion muotoisia, joiden korkeusmitta on 360 mm ja leveys on suurimmillaan 740 mm. Vetosauvat koostuvat 15 teräsköydestä sekä niiden päälle valetusta betonista. Teräsköydet on sijoitettu symmetrisesti kolmeen riviin poikkileikkauksen koko leveydelle. Vetosauvoissa käytetyt teräsköydet ovat materiaaliltaan ja poikkileikkaukseltaan samoja kuin kattorakenteessa käytetyt teräsköydet. Vetorakenteet kulkeutuvat noin kuusi metriä maan alle, jossa teräsköydet on ankkuroitu jatkuvaan anturaan.

Hakametsän jäähallin vesikatteena toimii huopakatto. Huopakaton alla on aluskate-laudoitus, joka on kiinnitetty katon ruoteisiin. Ruoteiden alapuolella on puiset kattoparrut sekä parrujen välissä oleva lämmöneristys. Lämmöneristys on toteutettu mineraalivil-lalla. Kattoparrujen poikkileikkauksen korkeus pienenee jäähallin reunalta keskelle men-täessä. Seuraavaksi kattorakenteessa tulee höyrynsulku sekä levytys mineraalilevyllä.

Jäähallin katon keskiosassa kulkee tuuletuskanava jäähallin pidempien sivujen välillä. Tuuletuskanavan kohdalla vesikate sekä aluskate on nostettu muuta kattorakennetta korkeammalle vinon laudoituksen sekä runkotolppien avulla. Kuvassa 4 on esitetty leikkauskuva jäähallin kattorakenteesta. (Ostenfeld & Jønson 1964)

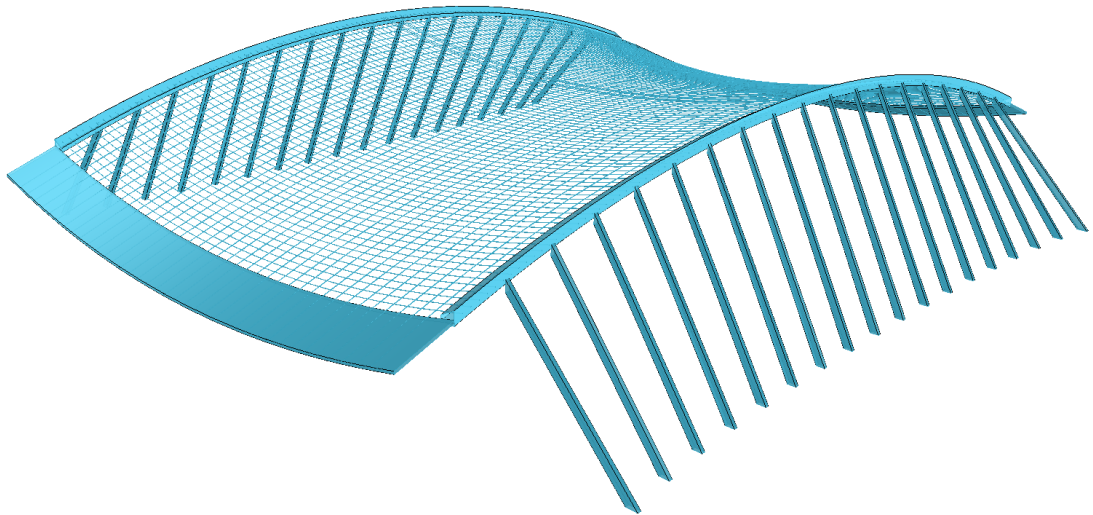


Kuva 4: Leikkauskuva kattorakenteesta (Ostenfeld & Jønson 1964)

Teräsköysien kattoliitoksessa kaksi teräksistä lenkkiä kannattelevat kattorakenteen vetoköyttä. Lenkit on kiinnitetty yläpuolella olevaan teräslevyyn muttereilla. Vetoköyden päällä lepää kattorakenteen tukiköysi. Köysirakenteen liitos kattoparruun on toteutettu parrun molemminpuolisilla teräslevyillä sekä pulttiliitoksella. (Ostenfeld & Jønson 1964)

2.2 Jäähallin kattorakenteen mallinnus

Jäähallin kattorakenteen mallinnus on toteutettu Rhinoceros 3D -mallinnusohjelmalla sekä sen algoritmisen mallinnuksen lisäosan, Grasshopperin, avulla. Rakenteen mallinnus suoritettiin edellä mainituilla mallinnusohjelmilla rakennuksen kaarevien muotojen takia. Jäähallista mallinnettiin vain kattorakenteen toimivuuden kannalta tärkeimmät rakenneosat. Mallinnuksen lähtötietoina käytettiin Hakametsän jäähallin rakennepiirustuksia.



Kuva 5: Jäähallin kattorakenteen sekä vetosauvojen mallinnus

Kattorakenteen teräsköydet mallinnettiin rakennepiirustuksissa annettujen korkeuskoordinaattien sekä vaakamittojen avulla. Piirustuksissa kattorakenteesta on kuvattu vain neljäsosa kattorakenteen ollessa symmetrinen. Jokaiselle teräsköydelle on rakennepiirustuksissa taulukoitu korkeusasema kolmessa kohtaa: jäähallin keskellä, kaaripalkin sisällä ankkuroitumisasteessa sekä kaaripalkin reunalla. Korkeuskoordinaattien, jäähallin vaakamittojen ja teräsköysien etäisyyksien avulla määritettiin ensin jokaiselle teräsköydelle viisi pistettä Grasshopperin Construct Point -komennolla. Seuraavaksi köysien pisteet yhdistettiin viivakomennolla kaaripalkin sisällä suoralla sekä kaaripalkkien reunojen ja jäähallin keskikohdan välillä paraabelin muotoisella käyrällä. Lopuksi teräsköysien paikalla olevat viivat muutettiin poikkileikkaukseltaan pyöreiksi sekä halkaisijaksi asetettiin 26 mm.

Teräsköysien jälkeen mallinnettiin jäähallin kaaripalkit. Ensin määriteltiin kutakin kaaripalkkia kohden 12 pistettä piirustuksissa annettujen korkeuskoordinaattien ja palkin poikkileikkausmittojen avulla. Pisteet määritettiin palkin alku- ja loppupäähän sekä palkin keskikohtaan. Seuraavaksi pisteet yhdistettiin Curve-komennolla, jolloin saatiin määritettyä palkin paraabelin muotoiset ääriviivat. Lopuksi ääriviivat yhdistettiin yhtenäiseksi rakenteeksi Loft-komennolla. Jäähallin ulkopuolella olevat vetosauvat mallinnettiin samalla tavalla kuin kaaripalkit. Yksinkertaistuksen vuoksi vetosauvat mallinnettiin poikkileikkaukseltaan suorakulmioksi todellisuuden kuusikulmion sijaan. Ensin määritettiin sauvan ylä- ja alapäähän neljä pistettä, jotka yhdistettiin viivalla muodostaen sauvan ääriviivat. Ääriviivat yhdistettiin lopuksi Loft-komennolla.

3. KÖYSIRAKENTEINEN KATTORAKENNE

Köysirakenteita käytetään pääosin silloissa, tarkemmin eriteltynä vinoköysisilloissa sekä riippusilloissa. Vuonna 1817 rakennettu Kings Meadow Bridge on todistetusti ensimmäinen silta, jossa on hyödynnetty köysirakenteita (Svenson 2012, s. 48). Krishnan ja Godbolen (2013) mukaan köysien käyttäminen kantavana kattorakenteena on verrattain uusi keksintö. Idea köysirakenteisiin kattoihin uskotaan syntyneen riippusiltojen hyvästä menestyksestä. Ensimmäinen rakennus, jonka katto on toteutettu köysirakenteisena, on Yhdysvaltojen Raleighissa sijaitseva Dorton Arena, joka valmistui vuonna 1953. Dorton Arenan valmistuminen lisäsi köysirakenteiseen kattoon kohdistuvaa mielenkiintoa ja tutkimusta huomattavasti.

Köysirakenteinen katto soveltuu moniin käyttökohteisiin ja erityisesti rakennuksiin, jossa tarvitaan pinta-alaltaan suuria palkittomia sekä pilarittomia alueita. Tällaisia rakennuksia ovat esimerkiksi stadionit, urheiluhallit sekä teatterit. Köysirakenteisen katon hyviin puoliin lukeutuu esimerkiksi sen kustannustehokkuus ja kattorakenteen normaalia kevyempi paino sekä arkkitehtoniset ominaisuudet. (Buchholdt 1999, s. 1)

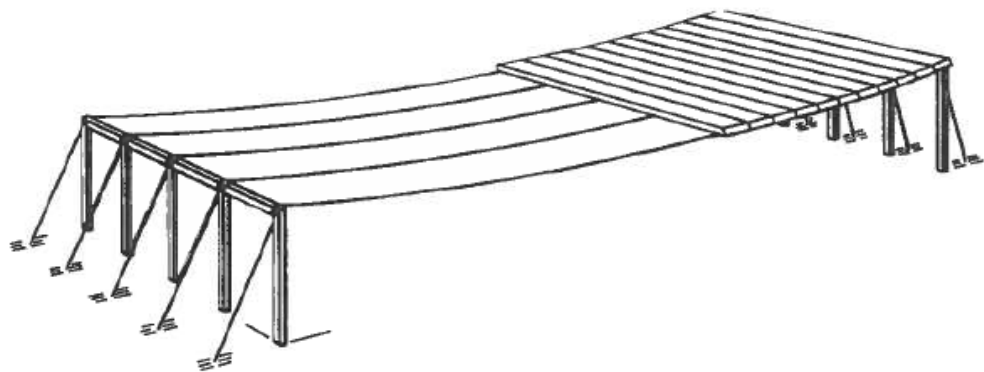
Krishnan ja Godbolen (2013) mukaan rakennuksia, joissa köysirakenteista kattorakennetta on hyödynnetty, on rakennettu silti verrattain vähän maailmanlaajuisesti. Vähäinen köysirakenteiden käyttö johtuu referenssikohteiden ja tutkimusten puutteesta sekä köysirakenteiden suunnittelun vaikeudesta. Suunnittelua hankaloittaa potentiaalisten käyttökohteiden normaalista poikkeavat muodot, jolloin valmiita ohjeita köysirakenteisen katon rakennesuunnittelulle on vaikea löytää. Laskenta- ja mallinnusohjelmistojen käytön yleistyessä ja kehittyessä myös köysirakenteisten kattojen potentiaali voi kasvaa.

3.1 Köysirakenteisen katon toimintaperiaatteet

Köysirakenteisen katon toimivuus perustuu köysien korkeaan vetolujuuteen. Köysirakenteissa käytetyt teräsköydet muuttavat pystysuuntaiset voimat köyden vetojännitykseksi. Teräsköydet johtavat vetojännitykset palkkeihin, jotka ovat useimmiten kaaren muotoisia. Köysirakenteet voivat olla itsensä tasapainottavia, jolloin köysiä tukevat rakenteet on suunniteltu siten, että niiden geometria tasapainottaa köysistä tulevat jännitykset itsestään. Jos köysirakenne ei tasapainota itseään, tulee vetojännitykset johtaa maahan erillisillä vetosauvoilla, jotka ankkuroidaan maahan. (Buchholdt 1999, s. 1-2) Rakenteen

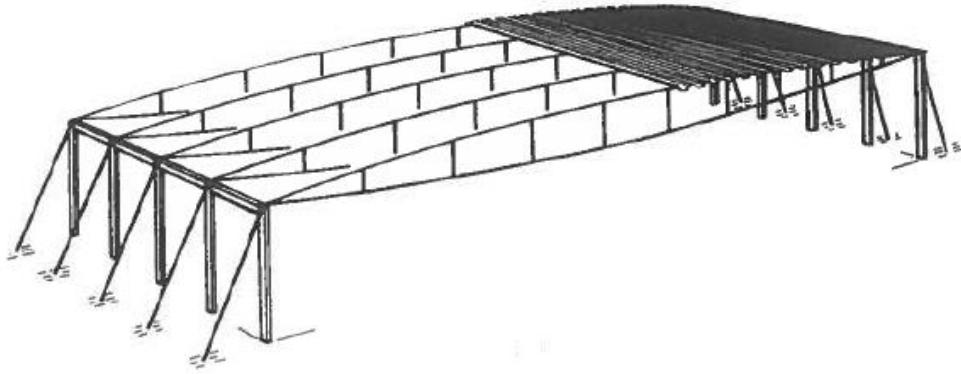
keveyden takia köysirakenteiden suunnittelussa on erityisen tärkeää varmistaa rakenteen riittävän hyvä staattinen jäykkyys sekä rakenteen huojumisen ja värähtelyn minimointi (Krishna & Godbole 2013).

Köysirakenteiset katot voidaan jakaa yksinkertaisesti riippuviin köysirakenteisiin, esijännitettyihin palkkimaisesti toimiviin köysirakenteisiin ja esijännitettyihin verkkomaisiin köysirakenteisiin. Yksinkertaisesti riippuva köysirakenne sopii hyvin geometrisesti yksinkertaisiin rakenteisiin, kuten ympyrän- ja suorakaiteen mukaisiin kattorakenteisiin. (Buchholdt 1999, s. 2-3) Kuvassa 6 on esitetty esimerkki yksinkertaisesti riippuvasta köysirakenteesta.



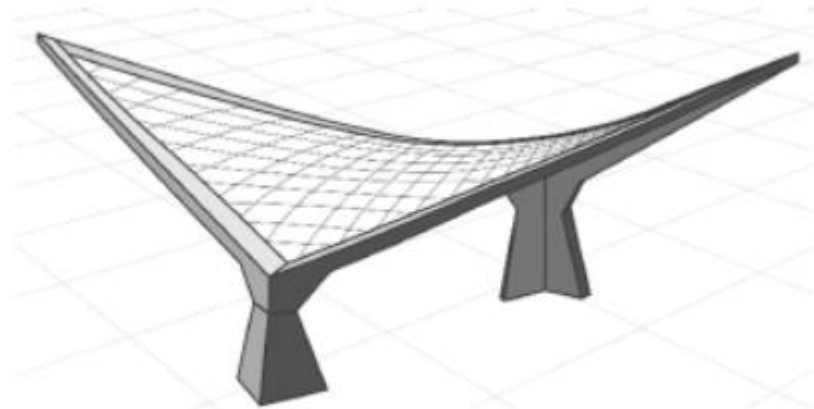
Kuva 6: Yksinkertaisesti riippuva köysirakenne (Buchholdt 1999, s. 3)

Esijännitetyt palkkimaisesti toimivat köysirakenteet sopivat samanmuotoisiin rakennuksiin kuin yksinkertaisesti riippuvat köysirakenteet. Lisäämällä riippuviin köysiin toinen vastakkaiseen suuntaan kaareutuva köysi saadaan köysirakenteesta huomattavasti jäykempi. Köydet yhdistetään toisiinsa sauvoilla, jolloin rakenne toimii ristikon tavoin. (Buchholdt 1999, s. 4-5) Kuvassa 7 on esitetty esimerkki esijännitetystä palkkimaisesti toimivasta rakenteesta.



Kuva 7: Esijännitetty palkkimaisesti toimiva köysirakenne (Buchholdt 1999, s. 6)

Esijännitetyt verkkomaiset köysirakenteet koostuvat veto- ja tukiköysistä muodostuvasta verkosta. Verkkomaisen köysirakenteen toimivuuden edellytyksenä on, että rakenteen muoto on kaareutuva ja tasaisia kohtia rakenteessa tulee välttää, jotta kaikki köydet olisivat vetojännitetyjä. Jos köydet ovat jostain kohdasta löysänä, vähentää se rakenteen jäykkyyttä ja saattaa vaurioittaa köysirakenteen kannattelemaa muuta kattorakennetta. Lisäksi vetoköydet tulee olla vastakkaiseen suuntaan kaareutuvat kuin tukiköydet. Verkkomaiset köysirakenteet muodostavat usein satulanmuotoisen kattorakenteen. Verkkomaisista köysirakenteista saadaan jäykempiä lisäämällä toinen verkkorakenne ja kiinnittämällä köysistä muodostetut verkot toisiinsa, jolloin rakenteeseen muodostuu ristikkomaisia rakennesysteemejä. (Buchholdt 1999, s. 7-8) Kuvassa 8 on esitetty esimerkki esijännitetystä verkkomaisesta köysirakenteesta.



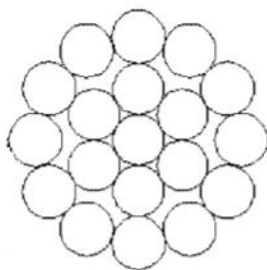
Kuva 8: Esijännitetty verkkomainen köysirakenne (Krishna & Godbole 2013)

Jos köysirakenteisen katon geometrista, muotoa ei ole suunniteltu siten, että se tasapainottaisi vetojännitykset itsestään, pitää köydet ankkuroida maahan. Ankkurointitavat voidaan jaotella painovoimaiseen ankkurointiin, kallioankkurointiin, laatta-ankkurointiin ja paalutuksella toteutettuun ankkurointiin. Painovoimainen ankkurointi on ankkurointitavoista yleisimmin käytetty. (Krishna & Godbole 2013)

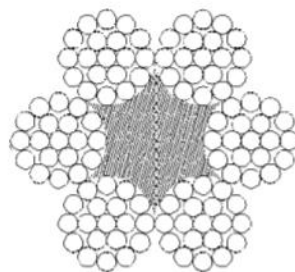
Painovoimaisessa ankkuroinnissa ankkuri, joka valmistetaan useimmiten betonista, tasapainottaa omalla painollaan köysivoimien pystysuuntaisen komponentin. Voimien vaakasuuntaisen komponentin tasapainottaa maaperä (Buchholdt 1999, s. 167). Krishnan ja Godbolen mukaan ankkurointi kannattaa toteuttaa kalliooperään aina kun mahdollista. Kallioankkurointi on ankkurointitavoista edullisin. Laatta-ankkuroinnissa ankkurointi toteutetaan syvälle maahan sijoitetulla anturamaisella rakenteella, johon köydet ankkuroidaan. Suorakulmiomainen rakenne sijoitetaan kohtisuorasti köyttä vastaan. Ankkurointi voidaan toteuttaa myös paalutuksella. Tällöin köydet ankkuroidaan maanpinnan lähellä olevaan paaluanturaan. Paaluja on useimmiten kaksi anturaa kohden ja ne on sijoitettu pystysuuntaan nähden vinosti vetokapasiteetin lisäämiseksi.

3.2 Köysirakenteissa käytetyt köydet

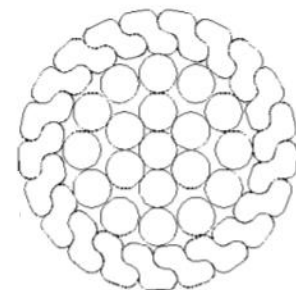
Köysirakenteissa käytetyt teräsköydet koostuvat vetolujuudeltaan korkeista teräslangoista. Teräsköysien tilalla on käytetty myös tankomaisia pyöröteräksiä erityisesti köysirakenteissa kattorakenteissa. Köysissä käytetyt teräslangat valmistetaan kylmämuokkaamalla terästangoista, jolloin teräslangan vetolujuus saadaan normaalia suuremmaksi. Teräslangat galvanoidaan sinkillä korroosion estämiseksi. Teräsköydet voidaan luokitella niiden poikkileikkauksen perusteella. Yleisimmin käytetyt köysityypit ovat punosköysi, kierretty punosköysi ja täysin suljettu kierretty köysi. (Krishna & Godbole 2013) Kuvassa 9 on esitetty yleisimpien köysirakenteissa käytettyjen teräsköysien poikkileikkaukset.



Kierretty punosköysi



Punosköysi



Täysin suljettu kierretty köysi

Kuva 9: Yleisimmät köysirakenteissa käytetyt teräsköysityypit (SFS-EN 1993-1-11)

Köysityypeistä käytetyin on kierretty punosköysi, jossa useampi pienempi köysi on kierretty yhteen. Pienemmät köydet koostuvat yhteen kierretyistä ohuista teräslangoista, joiden halkaisija on useimmiten noin 5 mm. (Krishna & Godbole 2013) Buchholdtin (1999) mukaan kierretty punosköysi sopii erityisesti rakenteisiin, jossa köyttä käytetään suorana köyden pienen joustavuuden takia. Punosköydet koostuvat useimmiten kuudesta punoksesta, jotka kierretään köyden ytimen ympärille. Punokset muodostetaan kiertämällä ohutta teräslankaa yhteen samaan tapaan kuin kierretyissä punosköysissä. Punosköyden sisällä on kuituydin, joka lisää köyden joustavuutta huomattavasti.

Täysin suljettu kierretty köysi koostuu köyden sisällä olevista kierretyistä teräslangoista muodostetuista teräsköysistä ja ulkopinnassa olevista Z-muotoisista teräsköysistä. Köyttä jännitettäessä ulkopinnan teräsköydet lukittuvat toisiinsa tiiviisti, joka muodostaa hyvän korroosiosuojan sisäpuolen köysille. Täysin suljetulla kierretyllä köydellä ei saavuteta yhtä suurta jäykkyyttä ja vetolujuutta kuin punosköysillä. (Svensson 2012, s. 141-142)

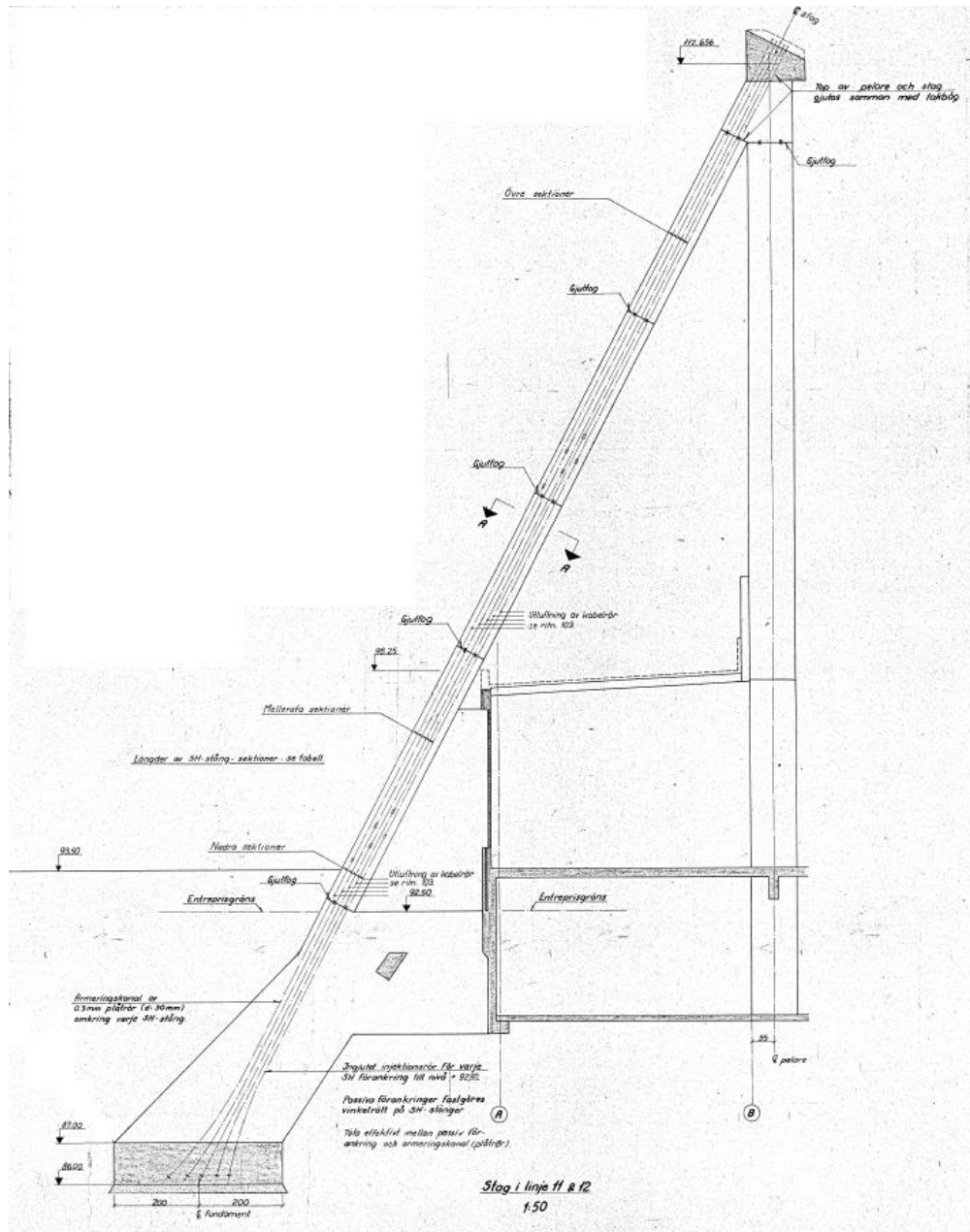
Kemiallisen käsittelyn ja kylmämuokkauksen ansiosta teräsköysien murtolujuus saadaan kasvatettua suureksi ja se on useimmiten noin 1600-1800 N/mm². Teräsköysien vetolujuudelle pätee useimmiten, että se on kääntäen verrannollinen köydessä käytettyjen teräslankojen halkaisijaan. Siitä syystä köydet valmistetaan hyvin ohuista teräslangoista. Teräsköysien kimmomoduulien arvot ovat huomattavasti normaalin teräksen 210 GPa:n suuruista kimmomoduulia pienempiä. Punosköysien kimmomoduuli on noin 150 GPa ja täysin suljettujen kierretyjen köysien kimmomoduuli on noin 160 GPa. (ESDEP Lecture 7.4.2)

3.3 Hakametsän jäähallin köysirakenteen toiminta

Hakametsän jäähallin köysirakenne lukeutuu esijännitettyihin verkkomaisiin köysirakenteisiin sen satulamaisen muodon ja kahteen suuntaan kulkevien köysien perusteella. Kattorakenne koostuu tuki- ja vetoköysistä, jotka ovat tankomaisia pyöröteräksiä. Tukiköysien tehtävä on jäykistää rakennetta ja estää vetoköysien liikettä. Vetoköydet siirtävät kattorakenteen kuormituksesta johtuvat köysivoimat jäähallin sivuilla oleville kaaripalkeille. Kaaripalkkeja kannattelevat massiiviset teräsbetonipilarit vastaanottavat köysivoimien pystysuuntaiset komponentit puristusjäännityksenä ja kuljettavat ne jäähallin perustuksille.

Köysivoimien vaakasuuntaiset komponentit pyrkivät vetämään kaaripalkkeja jäähallin sisäänpäin. Kaaripalkkeihin kohdistuvat vaakasuuntaiset voimat kumotaan kaaripalkkeihin

kiinnitetyillä vinoilla sauvoilla, jotka on ankkuroitu maahan. Sauvat ovat vetojännityksessä. Sauvojen ankkurointi on toteutettu painovoimaisella ankkuroinnilla. Ankkurina toimiva jatkuva antura tasapainottaa omalla painollaan sauvarakenteiden voimien pystysuuntaiset komponentit. Vaakasuuntaisten komponenttien tasapainottamiset tekee maaperä. Kuvassa 10 on esitetty leikkauskuva kaaripalkista ja sitä kannattelevasta pilarista sekä tukisauvasta ja sen anturasta.



Kuva 10: Leikkauskuva kattorakennetta kannattelevasta rakenteesta (Ostenfeld & Jønson 1964)

Rakennepiirustuksien mukaan kattorakenteen teräsköysien murtolujuus on noin 1000 N/mm² (Ostenfeld & Jønson 1964). Jäähallissa käytettyjen köysien murtolujuus on huomattavasti pienempi kuin nykyaikaisten punottujen teräsköysien. Kattorakenteen keveyden takia rakenteessa ei tarvita vetolujuudeltaan korkeampia teräsköysiä.

4. KUORMITUSMÄÄRÄYKSIEN VERTAILU

Rakennesuunnittelussa on jo pitkään käytetty erilaisia standardeja sekä määräyksiä. Hakametsän jäähallin rakennusaikana voimassa oli vuoden 1955 Rakenteiden kuormitusmääräykset. Tässä luvussa vertaillaan rakentamisajakohdan mukaisia kuormitusmääräyksiä nykyajan standardeihin, Eurokoodiin sekä Suomen kansallisiin liitteisiin. Vertailussa hyödynnetään Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet ja Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat -standardeja sekä niihin liittyviä Suomen kansallisia liitteitä. Kuormituksista tarkastellaan erityisesti kuormitusyhdistelyiden, lumikuorman ja tuulikuorman määrittämisen muutoksia rakennushetkestä nykyaikaan.

Rakentamisajankohdan mukaisten kuormitusmääräyksiä mukaan Hakametsän jäähallin rakennusaikana kuormitusyhdistelyt jaettiin kolmeen osaan, jotka ovat tavallinen kuormitus, harvinainen kuormitus ja poikkeuksellinen ylikuorma. Tavallinen kuormitus sisälsi rakenteen omasta painosta johtuvan kuormituksen sekä vain yhden hyötykuorman, jota rakenne on ensisijaisesti suunniteltu kestävänsä. Harvinaisessa kuormituksessa yhdistettiin rakenteen oma paino ja kuormat, jotka esiintyvät harvoin ja lyhyen ajan rakenteessa. Harvinaisiin kuormiin luettiin esimerkiksi samanaikaiset tuuli- ja lumikuormat. Poikkeuksellinen ylikuorma oli rakenteeseen poikkeuksellisesta tilanteesta kuten onnettomuudesta johtuva kuormitusyhdistely. Tavallisen ja harvinaisen kuormitusten suunniteltaessa hyödynnettiin normaalimääräyksiä, jossa määritettiin rakenteen sallitut jännitykset, taipumat sekä osavarmuusluvut. Poikkeuksellisen ylikuorman tilanteessa rakennesuunnittelijan tuli itse arvioida rakenteeseen sopivat sallitut rasitukset. (RIY A26, s. 12-13)

Nykyaikana rakenneosien kestävyyttä mitoitettaessa murtorajatilassa kuormitusyhdistelyt voidaan jakaa kahteen osaan. Ensimmäisessä yhdistelyssä otetaan huomioon pelkästään rakenteen pysyvät edulliset ja epäedulliset kuormat. Epäedullisia kuormia suurennetaan osavarmuusluvulla sekä kuormituskertoimella ja edullisia kuormia pienennetään osavarmuusluvulla. Toisessa kuormitusyhdistelyssä yhdistetään pysyvät kuormat sekä kaikki muuttuvat kuormat. Pysyvien epäedullisten kuormien osavarmuusluku on toisessa kuormitusyhdistelyssä pienempi kuin ensimmäisessä. Muuttuvat kuormat lisätään kuormitusyhdistelyssä yksitellen ja ne kerrotaan osavarmuusluvulla sekä kuormituskertoimella. Muuttuvista kuormista valitaan määräävin kuorma ja loput muuttuvat kuormat pienennetään yhdistelykertoimella. Onnettomuuskuormien määrittämisessä pysy-

vät kuormat otetaan huomioon ilman osavarmuuskertoimia ja kuormitusyhdistelmään lisätään onnettomuuskuorma. Muuttuvat kuormat lisätään kuormitusyhdistelmään yhdistelykertoimilla kerrottuna. (SFS-EN 1990, s. 90-92)

4.1 Lumikuorma

Hakametsän jäähallin sijainnin eli Tampereen lumikuorman suuruutena käytettiin vuoden 1955 kuormitusmääräyksien mukaan arvoa 150 kg/m^2 eli noin $1,5 \text{ kN/m}^2$ (RIY A26, s 39). Ympäristöministeriö julkaiseman Suomen kansallisen liitteen mukaan lumikuorman ominaisarvona maanpinnalla käytetään Tampereen kohdalla arvoa $2,5 \text{ kN/m}^2$ (RakMk, s. 15). Lumikuorman ominaisarvon suuruus rakennushetkestä nykyaikaan on siis noussut huomattavasti. Rakenteiden kuormitusmääräyksien (1955) mukaan rakenteiden mitoitus perustuu pitkälti rakennesuunnittelijan kykyyn arvioida lumen toimintaa katolla. Lumikuorman suuruuteen vaikuttivat myös paikalliset olosuhteet ja lumikuormaan lisättiin lisäkuorma katon kohtiin, joihin lunta on mahdollista kinostua. Lisäkuorman lumen painona käytettiin 0,4-kertaista lumikuormaa. Lumikuormaa voitiin myös pienentää rakennesuunnittelijan arvion mukaan 0-100 % katoilta, jotka pidetään lumesta puhtaina tai ovat muodoltaan sellaisia, joista lumi putoaa maahan.

Nykyaikana lumikuorman mitoitusarvo määritetään lumikuorman ominaisarvon, tuulensuojaisuuskertoimen, lämpökertoimen ja katon muotokertoimen avulla. Tuulensuojaisuuskerroin voi kasvattaa tai pienentää lumikuorman mitoitusarvoa riippuen siitä, sijaitseeko rakennuspaikka tuulisessa vai suojaisessa maastossa. Tuulensuojaisuuskertoimeen vaikuttaa myös rakennuksen sivujen pituudet. Laajoilla katoilla, joihin luetaan katon, joiden lyhyempi sivu on vähintään 50 m, tuulensuojaisuuskerrointa korotetaan korotuskertoimella. Korotuskerroin määräytyy lyhyemmän sivun pituuden ja sivujen pituuksien suhteen perusteella. Lämpökerroin huomioi rakennuksen lämpöhäviöstä johtuvan lumen sulamisen vaikutuksen lumikuorman suuruuteen. Katon muotokerroin määräytyy katon kaltevuuskulman ja katon muodon perusteella. Katon muoto määrää myös käytettävät kuormituskaaviot. Eurokoodin kaarikattoja koskevat lumikuorman mitoitusohjeet koskevat vain yhteen suuntaan kaarevia kattoja. (SFS-EN 1991-1-3, s. 26-37) Hakametsän jäähallin muotoisen kahteen suuntaan kaareutuvan katon lumikuorman määrittämiseen voidaan osittain soveltaa Eurokoodin kaarikattojen ohjetta, mutta huomioon tulee ottaa toisen suunnan kaareutumisen aiheuttama lumikuorman lisäys katon keskiosaan.

Lumikuorman määrittäminen on muuttunut Hakametsän rakennushetkestä nykyaikaan huomattavasti. Rakennusaikana rakennesuunnittelijan täytyi tehdä omia oletuksia ja arvioin-
teja lumikuorman määrittämisessä. Nykyään lumikuorman määrittämiseen löytyy kattavat

ohjeet standardeista. Nykyaikana lumikuorman arvo saadaan määritettyä paljon tarkemmin ja määrittämisessä otetaan huomioon enemmän lumikuorman suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Suunnitteluohjeet lumikuorman laskemiseksi ovat nykyaikana selvästi yksityiskohtaisempia kuin ennen. Eurokoodista löytyy suunnitteluohjeita tyypillisimmille katon muodoille.

4.2 Tuulikuorma

Tuulikuorman määrittämisessä käytettävän tuulen nopeuspaineen arvona käytettiin Hakametsän jäähallin rakennusaikana 0-30 metrin korkeudella arvoa 70 kg/m^2 eli noin 700 N/m^2 . Nopeuspaineesta määritettiin koko rakenteeseen vaikuttava kokonaistuulikuorma kertomalla nopeuspaine rakenteen muodolle ominaisella muotokertoimella ja kohtisuoran projektiopinnan pinta-alalla. Rakenteiden kuormitusmääräyksissä rakenteen muodosta johtuvan muotokertoimen määrittämiseen annettiin ohjeet kulmikkaille, lieriömäisille, pallomaisille ja peräkkäisille rakenteille. Kulmikkaille ja lieriömäisille rakenteille muotokerroin laskettiin projektiopinnan korkeuden ja leveyden suhteen avulla. Pallomaisille rakenteille muotokerroin oli vakio. Peräkkäisten rakenteiden muotokerroin määritettiin projektiopinnan leveyden ja rakenteiden etäisyyden perusteella. Kuormitusmääräyksissä annettiin ohjeet rakenteen ulko- ja sisäpintojen muotokertoimien määrittämiseen. Pintojen muotokertoimien avulla laskettiin yksittäisiin pintoihin kohdistuvat tuulikuormat. Pintojen tuulikuormien määrittämisessä sisäpintojen kohdalla määritettiin molemmat tapaukset, sisällä oleva imu sekä sisällä oleva paine, mitoittavimman tuulikuorman selvittämiseksi. (RIY A26, s. 33-37)

Eurokoodin mukaan nykyaikana nopeuspaine määritetään ilman tiheyden ja tuulennopeuden perusarvon avulla (SFS-EN 1991-1-4, s. 40). Suomen kansallisessa liitteessä ilman tiheys ja tuulennopeuden perusarvo on määrätty koko Suomen alueella vakioiksi, joiden avulla nopeuspaineen arvoksi saadaan noin 276 N/m^2 (RakMk, s. 22-23). Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 (2011) perusteella tuulen puuskannopeuspaine saadaan laskettua nopeuspaineen ja altistuskertoimen tulona. Altistuskerroin määritetään rakennuksen korkeuden ja maaston ominaisuudet huomioon ottavan maastoluokan avulla. Arvioimalla Hakametsän korkeudeksi noin 20 metriä ja maastoluokaksi luokka kolme, saadaan altistuskertoimeksi 2,3 ja puuskannopeuspaineeksi noin 635 N/m^2 . Tuulikuorma voidaan määrittää koko rakenteeseen tai tiettyyn rakenneosaan vaikuttavana. Koko rakenteen kokonaistuulikuorma lasketaan rakennekertoimen, rakenteen voimakertoimen, puuskannopeuspaineen ja rakenteen tuulenpaineen vaikutusalan avulla. Rakennekerroin ottaa huomioon tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuudet sekä turbulenssista johtuvan rakenteen värähtelyn.

Pintoihin kohdistuvat tuulenpaineet määritetään Eurokoodin mukaan kertomalla puuskanopeuspaine pinnan painekertoimella. Sisä- ja ulkopuolisten painekertoimien arvoja on taulukoitu Eurokoodissa. Samaan tapaan kuin lumikuorman kohdalla, Eurokoodista ei löydy painekertoimen arvoja Hakametsän jäähallin muotoisille satulamaisille rakenteille. Eurokoodista löytyy tuulikuorman määrittämissuunnat yhteensä kaareville katoille. (SFS-EN 1991-1-4, s. 30-44)

Tuulikuorman määrittämisessä suurimmat erot liittyvät tuulenpaineen sekä kertoimien määrittämiseen. Rakennusaikana tuulikuorma laskettiin tuulen nopeuspaineen avulla. Nykyään nopeuspaine muunnetaan puuskanopeuspaineeksi, joka huomioi maaston vaikutukset ja rakennuksen korkeuden. Rakennushetkellä käytetty nopeuspaine ja nykyinen puuskanopeuspaine eroavat toisistaan noin 70 N/m^2 . Rakennusaikana käytetyt muotokertoimet ovat muuttuneet painekertoimiksi, joiden arvot eroavat hieman muotokertoimien arvoista. Rakenteet ovat nykyään jaettu useampiin osiin, joille on eri painekertoimet pintoihin vaikuttavien tuulikuormien määrittämisen tarkkuuden lisäämiseksi. Nykyään tuulikuormat pystytään määrittämään huomattavasti tarkemmin ja laskennassa otetaan huomioon parametrejä, kuten pyörreratailmiöstä johtuva rakenteen värähtely, joita ei ole aikaisemmin huomioitu. Eurokoodissa on lisäksi ohjeistettu tuulikuorman määrittäminen huomattavasti useammille rakenteiden ja kattojen muodoille kuin vanhassa kuormitusmääräyksessä.

5. KATTORAKENTEEN LASKENNALLINEN TARKASTELU

Tässä luvussa suoritetaan kattorakenteelle laskennallinen tarkastelu, jossa tutkitaan kattorakenteen keskiosasta löytyvän rasiitetuimman yksittäisen teräsköyden rasituksia. Laskenta suoritetaan kahdella tapaa: käsin laskemalla sekä käyttäen apuna FEM-laskentaohjelma RFEM:iä. Laskennallinen analyysi tehdään olettaen, että teräsköysi on staattisessa tilassa, jolloin köyden värähtely jätetään huomioimatta. Teräsköyden rasitusten laskennan tarkoitus on selvittää karkeasti yksittäisessä teräsköydessä vallitseva jännitys. Tarkastelun rajallisuudesta ja epätarkkuustekijöistä johtuen laskennan tulokset ovat karkeita arvioita ja poikkeavat teräsköyden todellisista jännityksistä. Yksinkertaistetun analyysin takia työssä laskettuja tuloksia ei voida soveltaa käytännössä.

5.1 Teräsköyden kuormat

Teräsköyteen kohdistuvat pysyvät kuormat johtuvat teräsköyden omasta painosta, kattorakenteen painosta, mediakuution painosta sekä ripustuskuormista. Muuttuvat kuormat koostuvat lumikuormasta ja tuulikuormasta. Rakenteelle määritetään rakennusaikaiset sekä nykyaikaiset kuormitukset. Nykyaikaisten kuormitusten määrittäminen tehdään Eurokoodi 1:n avulla. Rakennusaikaiset kuormat määritetään Rakenteiden kuormitusmääräykset 1955:n mukaan.

5.1.1 Nykyaikaiset kuormitukset

Määritetään nykyaikaiset kuormitukset Eurokoodi 1 mukaan murtorajatilassa. Lasketaan aluksi kuormien ominaisarvot. Teräsköyden omasta painosta aiheutuva kuorma metriä kohden saadaan laskemalla köyden poikkipinta-ala ja kertomalla se teräksen tiheydellä ja putoamiskiihtyvyydellä.

$$g_{k,1} = \pi \cdot \left(\frac{26 \text{ mm}}{2}\right)^2 \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,04 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Arvioidaan kattorakenteen painoksi 0,4 kN/m². Vesikatossa voi kuitenkin olla useampia huopakerroksia, joiden todellinen määrä ei selviä rakennepiirustuksista. Lisätään kattorakenteen painoon 0,1 kN/m² mahdollisten lisähuopakerrosten vuoksi. Kattorakenteen aiheuttama kuormitus on siis 0,5 kN/m². Tarkasteltavan teräsköyden etäisyys viereisistä köysistä on 800 mm. Kertomalla kattorakenteen paino köysien etäisyydellä saadaan kattorakenteen teräsköyteen aiheuttama viivakuorma.

$$g_{k,2} = 0,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 m = 0,4 \frac{kN}{m}$$

Ripustuskuorma johtuu hallin kattoon ripustetuista valoista ja äänentoistolaitteista. Arvioidaan ripustuskuorma suuruudeksi $0,1 \text{ kN/m}^2$. Kertomalla ripustuskuorma köysien etäisyydellä saadaan köyteen vaikuttava viivakuorma.

$$g_{k,3} = 0,1 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 m = 0,08 \frac{kN}{m}$$

Mediakuutiosta kohdistuu pistekuorma tarkasteltavan köyden keskelle. Mediakuution painoksi arvioidaan 3000 kg. Mediakuutio roikkuu neljällä teräsvaijerilla kahdesta teräspalkista. Kummatkin teräspalkit on kiinnitetty kymmeneen kattorakenteen teräsköyteen. Yhdelle teräsköydelle tulee siis kymmenesosa mediakuution painosta. Mediakuution tarkasteltavaan teräsköyteen aiheuttama pistevoima on siis

$$F_k = 3000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{10} = 2,94 \text{ kN}$$

Lumikuorman ominaisarvo maanpinnalla on Tampereen alueella $2,5 \text{ kN/m}^2$. Katon kaltevuuskulma ei ylitä missään kohdassa yli 30° , joten käytetään muotokertoimen arvona $0,8$. Jäähallin katto määritellään laajaksi katoksi, joten lumikuorma kerrotaan tuulensuojaisuskertoimen korotuskertoimella. Korotuskerroin Hakametsän jäähallin katolle on $1,1$. (SFS-EN 1991-1-3) Kerrotaan maanpinnalla olevan lumikuorman arvo muotokertoimella ja köysien välisellä etäisyydellä.

$$q_{k,lumi} = 1,1 \cdot 0,8 \cdot 2,5 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 m = 1,76 \frac{kN}{m}$$

Eurokoodin (SFS-EN 1991-1-4) mukaan saadaan puuskannoepuspaineeksi q_p määritettyä 635 N/m^2 tuulen nopeuspaineen ja rakennuksen altistuskertoimen avulla. Hakametsän jäähallin katon pienen kaltevuuskulman takia oletetaan katto tasakatoksi. Ulkopuolisen paineen painekerroin c_{pe} tasakatolle on $+0,2$ ja sisäpuolisen paineen kerroin c_{pi} on $-0,3$. Tuulenpaine saadaan kaavalla

$$w = (c_{pe} - c_{pi})q_p = (0,2 - (-0,3)) \cdot 635 \frac{N}{m^2} = 0,32 \frac{kN}{m^2}$$

Teräsköydelle aiheutuva tuulesta aiheutuva kuormitus on siis

$$q_{k,tuuli} = 0,32 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 m = 0,25 \frac{kN}{m}$$

Suoritetaan seuraavaksi murtorajatilan kuormitusyhdistely. Jäähallin seuraamusluokka on CC3, joten kerroin K_{FI} on $1,1$. Selvitetään määräävin kuormitusyhdistely seuraavien lausekkeiden avulla

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

$$\sum_{j \geq 1} 1,35 K_{FI} G_{kj}.$$

Määrävin kuormitusyhdistely saadaan ylempään lausekkeen mukaan, jossa muuttuvista kuormista lumikuorma on määräävä

$$Q_1 = 1,15 \cdot 1,1 \cdot (g_{k,1} + g_{k,2} + g_{k,3}) + 1,5 \cdot 1,1 \cdot q_{k,lumi} + 1,5 \cdot 1,1 \cdot 0,6 \cdot q_{k,tuuli}$$

$$= 3,81 \frac{kN}{m}.$$

Pistevoiman mitoitusarvoksi saadaan

$$F_1 = 1,5 \cdot 1,1 \cdot F_k = 4,85 \text{ kN}.$$

Mitoituskuormiksi murtorajatilassa saadaan siis $Q_1=3,81 \text{ kN/m}$ ja $F_1=4,85 \text{ kN}$.

5.1.2 Rakentamisajankohdan mukaiset kuormitukset

Määritetään rakentamisajankohdan mukaiset kuormitukset vuoden 1955 Rakenteiden kuormitusmääräyksien (RIY A26) avulla. Vähennetään pysyvistä kuormista vesikaton mahdolliset lisähuopakerrokset sekä pienennetään mediakuutiosta aiheutuvaa piste-kuormaa, koska rakennusaikainen tulostaulu oli huomattavasti pienempi. Kattorakenteen painon aiheuttamaksi kuormaksi saadaan

$$g_{k,2} = 0,4 \frac{kN}{m^2} \cdot 0,8 \text{ m} = 0,32 \frac{kN}{m}.$$

Arvioidaan mediakuution massaksi rakennusaika 1000 kg. Pistevoimaksi saadaan

$$F_k = 1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{1}{10} = 0,98 \text{ kN}.$$

Käytetään $g_{k,1}$ ja $g_{k,3}$ kuormina edellä laskettuja arvoja. Lumikuorman maanpäällinen arvo Tampereen alueella oli rakennusaikana 150 kg/m^2 . Yksittäiseen teräsköyteen vaikuttava lumikuorman arvo on

$$q_{lumi} = 150 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,8 \text{ m} = 1,18 \frac{kN}{m}.$$

Tuulen nopeuspaineena p_0 käytettiin rakennusaikana arvoa 70 kg/m^2 ja sisäisen sekä ulkoisen paineen muotokertoimien c summaksi arvioidaan jäähallin katolle 0,4. Kattoon vaikuttavaksi tuulikuormaksi saadaan

$$q_{tuuli} = 0,4 \cdot 70 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,8 \text{ m} = 0,22 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

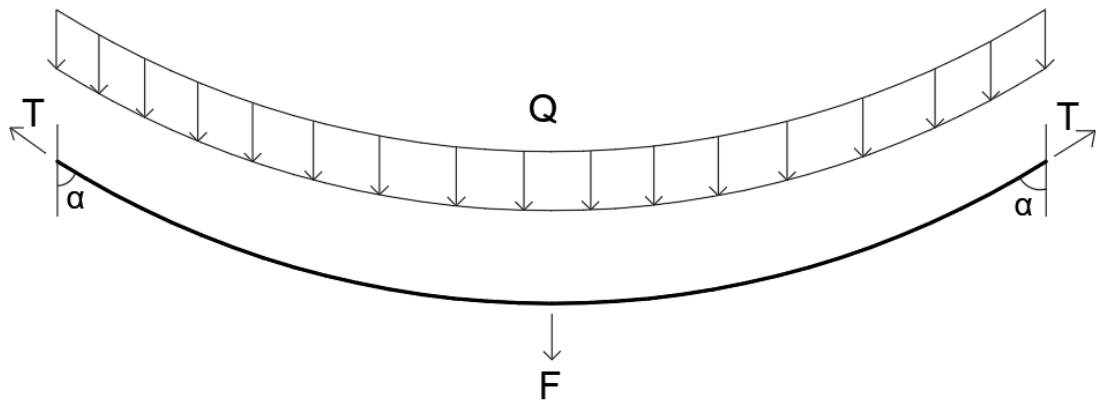
Summataan kuormitukset yhteen

$$Q_2 = g_{k,1} + g_{k,2} + g_{k,3} + q_{lumi} + q_{tuuli} = 1,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lopulliset rakennusaikaiset kuormitukset ovat siis $Q_2=1,84 \text{ kN/m}$ ja $F_2=0,98 \text{ kN}$.

5.2 Teräsköyden rasiuksen laskenta käsin

Lasketaan tarkasteltavassa teräsköydessä vaikuttava köysivoima rakennusaikasilla ja nykyaikaisilla kuormilla. Teräsköyden vapaakappalekuva on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Vapaakappalekuva teräsköydestä

Käsinlaskennassa ei huomioida mahdollista köyden venymää ja sen vaikutusta kulmaan α . Teräsköydessä vaikuttava köysivoima saadaan ratkaistua tasapainoyhtälön avulla.

5.2.1 Laskenta nykyaikaisilla kuormilla

Nykyaikaiset kuormitukset Q_1 ja F_1 on määritetty edellä. Köyden kaltevuuskulma ja pituus määritetään rakennepiirustusten avulla. Kulma α on $76,4^\circ$ ja teräsköyden pituus on 61 m. Muodostetaan tasapainoyhtälö pystysuunnassa.

$$\uparrow Q_1 L + F_1 - 2T \cdot \cos(\alpha) = 0$$

$$\Rightarrow T_1 = \frac{Q_1 L + F_1}{2 \cos(\alpha)} = \frac{3,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 61 \text{ m} + 4,85 \text{ kN}}{2 \cos(76,4^\circ)} = 505 \text{ kN}$$

Teräsköydessä vallitseva vetojännitys saadaan jakamalla laskettu köysivoima köyden poikkipinta-alalla. Köyden halkaisija on 26 mm.

$$\delta_1 = \frac{T_1}{A} = \frac{471 \text{ kN}}{\pi \cdot \left(\frac{26 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 951 \text{ MPa}$$

Rakennepiirustuksissa teräsköysien murtolujuudeksi on annettu 981 MPa (Ostenfeld & Jønson 1964). Lasketaan vielä teräsköyden varmuus murtoa vastaan jakamalla murtolujuus lasketulla vetojännityksellä.

$$\frac{981 \text{ MPa}}{951 \text{ MPa}} = 1,03$$

Teräsköyden varmuus murtoa vastaan on laskelmien perusteella noin 1,03.

5.2.2 Laskenta rakennusaikaisilla kuormilla

Suoritetaan rakennusaikaisilla kuormilla laskenta sallittujen jännitysten menetelmän mukaan. Rakenteiden suunnittelussa käytetyn sallitun jännityksen suuruutta ei ole saatavilla, joten sallittu jännitys joudutaan arvioimaan. Arvioidaan teräsköyden sallituksi jännitykseksi 45 % köyden murtolujuudesta (Svenson 2012, s. 161). Sallituksi jännitykseksi saadaan

$$\delta_{sall} = 0,45 \cdot 981 \text{ MPa} = 441 \text{ MPa}.$$

Lasketaan seuraavaksi köydessä vaikuttava köysivoima rakennusaikaisilla kuormilla

$$T_2 = \frac{Q_2 L + F_2}{2 \cos(\alpha)} = \frac{1,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 61 \text{ m} + 0,98 \text{ kN}}{2 \cos(76,4^\circ)} = 241 \text{ kN}.$$

Köydessä vaikuttavaksi jännitykseksi saadaan

$$\delta_2 = \frac{T_2}{A} = \frac{241 \text{ kN}}{\pi \cdot \left(\frac{26 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 454 \text{ MPa}.$$

Laskettu jännitys on hieman korkeampi kuin määritetty sallittu jännitys. Lasketaan vielä varmuus murtoa vastaan

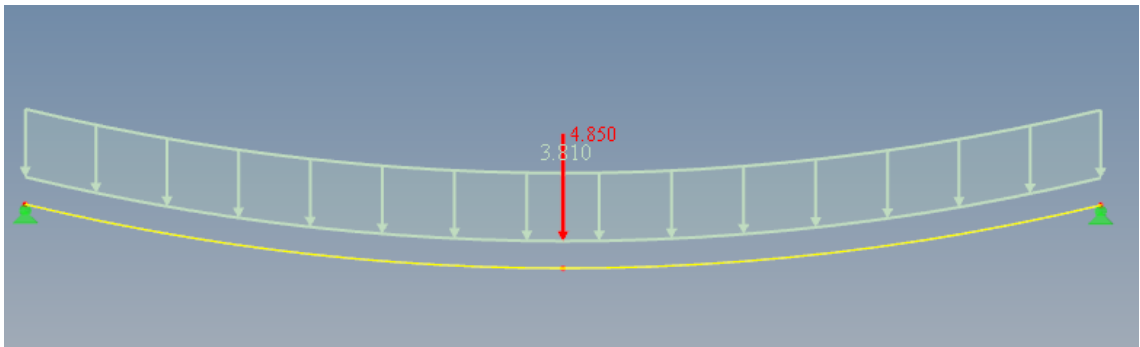
$$\frac{981 \text{ MPa}}{454 \text{ MPa}} = 2,16.$$

Rakennusaikaisilla kuormilla varmuus murtoa vastaan on 2,16.

5.3 Teräsköyden rasiusten laskenta RFEM-ohjelmalla

Suoritetaan teräsköyden rasiusten laskenta seuraavaksi RFEM-laskentaohjelman avulla nykyaikaisilla ja rakennusaikaisilla kuormilla. Muodostetaan teräsköydestä rakennemalli ja asetetaan edellä määritetyt kuormitukset. Teräsköysielementtinä käytetään RFEM:stä valmiiksi löytyvää Cable-elementtiä, johon asetetaan oikea poikkileikkauksen koko sekä arvio köyden kimmomoduulista. Käytetään teräsköyden kimmomoduulina arvioitua 160 GPa suuruutta. Kimmomoduulin arvolla on merkittävä vaikutus laskentatuloksiin.

Kimmomoduulin pienentäminen sekä esijännityksen puuttuminen lisää köyden venymää ja samalla pienentää kaltevuuskulmaa tuella. Kulman pienentyminen johtaa pienempään köysivoiman arvoon. Teräsköyden tarkkoja materiaaliominaisuuksia ja köyden esijännityksen suuruutta ei ole saatavilla, joka aiheuttaa laskentaan huomattavaa epätarkkuutta. Lisäksi rakennepiirustuksissa annetut teräsköysien korkeusasemat ovat laskemalla määritettyjä arvoja. Piirustuksista ei löydy todellisia, mitattuja korkoja muun kattorakenteen asennuksen ja kuormituksen jälkeen. Kuvassa 12 on esitetty kuvakaappaus laskentaohjelmasta rakennemallista nykyaikaisilla kuormilla.

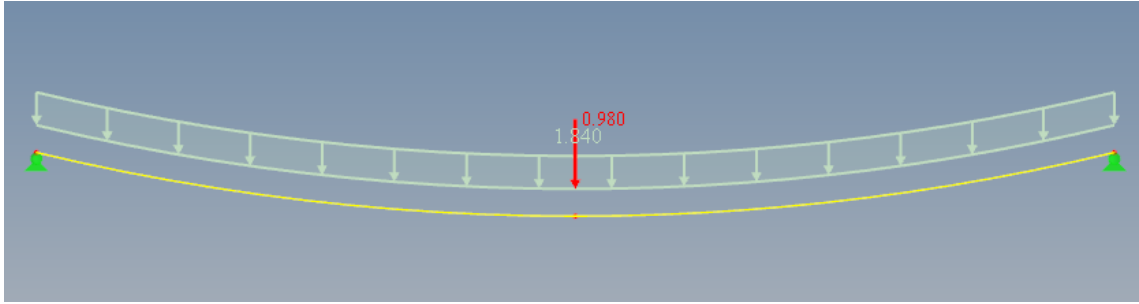


Kuva 12: Teräsköysi ja nykyaikaiset kuormat RFEM-laskentaohjelmassa

Suoritetaan laskenta RFEM-ohjelman Calcule All -komentilla. Teräsköydessä vaikuttavaksi vetovoimaksi saadaan 425 kN ja vetojännitykseksi 800 MPa. Esijännityksen puuttuessa köyden keskikohdan siirtymä on 91 cm alaspäin. Varmuudeksi murtoa vastaan saadaan

$$\frac{981 \text{ MPa}}{800 \text{ MPa}} = 1,23.$$

Lasketaan seuraavaksi arvot rakennusaikaisilla kuormilla RFEM-ohjelmalla. Kuvassa 13 on esitetty rakennemalli ja rakentamisajankohdan mukaiset kuormitukset.



Kuva 13: Teräsköysi ja rakennusaikaiset kuormat RFEM-laskentaohjelmassa

Köysivoimaksi saadaan 219 kN ja vetojännitykseksi 412 MPa. RFEM:n mukaan köyden keskikohta laskee 49 cm alaspäin. Teräsköyden varmuudeksi murtoa vastaan rakennusaikaisilla kuormilla saadaan

$$\frac{981 \text{ MPa}}{412 \text{ MPa}} = 2,38.$$

Esijännityksen puuttuminen laskennasta vaikuttaa köyden venymään ja sitä kautta kaltevuuskulman suuruuteen tuella. Kulman suuruuden pienentyminen laskee köysivoiman suuruutta merkittävästi, joka aiheuttaa epätarkkuutta tuloksiin. Lasketaan vielä molemmat tapaukset lisäämällä kuormituksiin arvioitu esijännitys.

Arvioidaan käytetyksi esijännitykseksi 300 kN. Murtorajatilan mukaisilla kuormituksilla köysivoimaksi saadaan 474 kN ja köyden keskikohdan siirtymäksi noin 40 cm alaspäin. Köyden vetojännitykseksi saadaan 893MPa. Lasketaan vielä varmuus murtoa vastaan

$$\frac{981 \text{ MPa}}{893 \text{ MPa}} = 1,10.$$

Lasketaan seuraavaksi rasitukset rakennusajan mukaisilla kuormilla ja arvioidulla esijännityksellä. Köysivoimaksi saadaan 254 kN ja vetojännitykseksi 477 MPa. Teräsköyden siirtymä on 10 cm ylöspäin köyden keskikohdassa. Varmuudeksi murtoa vastaan saadaan

$$\frac{981 \text{ MPa}}{477 \text{ MPa}} = 2,05.$$

Tulosten yhteenveto on esitetty seuraavassa alaluvussa.

5.4 Laskentatulosten yhteenveto

Lasketut tulokset nykyaikaisten ja rakennusaikaisten kuormien välillä eroavat toisistaan merkittävästi. Suurin syy tulosten eroavaisuuteen on se, että laskennassa käytettiin eri menetelmiä nykyajalle ja rakennusajalle. Nykyaikaisia kuormia kasvatettiin murtorajati-

lan mukaisilla osavarmuuskertoimilla. Rakennusaikaiset tulokset saatiin käyttämällä sallittujen jännitysten menetelmää. Taulukossa 1 on esitetty laskentatulokset käsinlaskennasta ja taulukossa 2 RFEM:llä tehdystä laskennasta.

Taulukko 1: Kootut laskentatulokset käsinlaskennasta

	Käsinlaskenta	
	Nykyaikaiset kuormat	Rakennusaikaiset kuormat
Köysivoima [kN]	505	241
Vetojännitys [MPa]	951	454
Murtovarmuus	1,03	2,16

Taulukko 2: Kootut laskentatulokset RFEM-laskennasta

	RFEM			
	Nykyaikaiset kuormat		Rakennusaikaiset kuormat	
	Ilman esijännitystä	Esijännitys 300 kN	Ilman esijännitystä	Esijännitys 300 kN
Köysivoima [kN]	425	474	219	254
Vetojännitys [Mpa]	800	893	412	477
Murtovarmuus	1,23	1,10	2,38	2,05

Murtovarmuuksien vertailu ei onnistu suoraan johtuen nykyaikaisen ja rakennusaikaisen laskentavan eroista. Kun huomioidaan murtorajatilan osavarmuuslukujen vaikutus ja sallitun jännitysten menetelmän sallittu jännitys saadaan samoilla kuormilla laskettaessa kuitenkin todellisesta murtovarmuudesta samansuuruinen. Perusteellisissa ja käytännön sovellettavissa olevissa rakenneselvityksissä on olennaista selvittää rakenteen kestävyden riittävyys ja varmuus tarkasti. Työhön tehtyjen rajausten ja kandidaatintyön laajuuden huomioon ottaen, työn tarkoituksena oli selvittää teräsköyteen kohdistuvat rasitukset karkeasti ottamatta kantaa rakenteen kestävyteen ja varmuuteen. Laskentatuloksiin vaikuttavat monet epätarkkuustekijät, jotka tekevät tuloksista suuntaa antavia arvioita teräsköyden rasituksista.

6. YHTEENVETO

Kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää Hakametsän jäähallin kattorakenteen rakenne sekä sen toimintaperiaatteet. Työssä tutustuttiin myös köysirakenteisesti valmistettuihin kattorakenteisiin ja köysityyppeihin yleisellä tasolla. Lisäksi työssä tutkittiin rakennusai-kaisten ja nykyaikaisten suunnittelustandardien eroavaisuuksia ja kehitystä. Kattoraken-teelle suoritettiin yksinkertaistettu laskennallinen analyysi, jolla pyrittiin saamaan karkea arvio yksittäiseen teräsköyteen vaikuttavista rasituksista.

Jäähallin kattorakenteesta saatiin selville kattorakenteen tarkka muoto ja rakenneosien lukumäärä sekä mitat rakennepiirustusten perusteella. Kattorakenteessa käytettyjen te-räsköysien tarkkoja materiaaliominaisuuksia ei saatu selville johtuen saatavilla olevan tiedon vähäisyydestä ja jäähallin varhaisesta rakennusajasta. Saatavilla olevien tietojen perusteella kattorakenteesta luotiin 3D-mallinnus Grasshopper-ohjelmalla, johon mallin-nettiin kantavan kattorakenteen toimivuuden kannalta olennaisimmat rakenneosat.

Työssä perehdyttiin köysirakenteisesti valmistettujen kattorakenteiden historiaan ja käyt-tökohteisiin. Lisäksi työssä selvitettiin yleisimmät köysirakenteisten kattojen rakennetyy-pit ja niiden toimintaperiaatteet. Kattojen rakennetyypit voidaan jakaa kolmeen raken-teeseen: yksinkertaisesti riippuvaan köysirakenteeseen, esijännitettyyn palkkimaisesti toimivaan köysirakenteeseen ja esijännitettyyn verkkomaiseen köysirakenteeseen. Köy-sirakenteissa yleisimmin käytetyt köysityypit ovat kierretty punosköysi, punosköysi ja täy-sin suljettu kierretty köysi, joilla voidaan saavuttaa jopa 1800 N/mm^2 murtolujuus.

Työssä selvitettiin Hakametsän jäähallin köysirakenteen toimintaperiaatteet. Tankomai-sista pyöröteräksistä muodostuva verkkomainen köysirakenne välittää vetoköysien avulla kattorakenteeseen kohdistuvat kuormat vetojännityksenä kaaripalkeille ja maahan ankkuroiduille vetosauvoille. Vetoköysien vastakkaiseen suuntaan kulkevien tukiköysien tehtävänä on estää vetoköysien sivusuuntaista liikettä.

Kandidaatintyön yhtenä osa-alueena oli tutustua rakentamisajankohdan mukaisiin ja ny-kyaikaisiin suunnittelustandardeihin ja vertailla niitä keskenään. Työssä vertailtiin raken-nusaikana käytettyä vuoden 1955 Rakenteiden kuormitusmääräyksiä nykyaikana käy-tettyyn Eurokoodiin ja Suomen kansalliseen liitteeseen. Vertailussa keskityttiin kuormi-tusten, pääasiassa lumi- ja tuulikuorman, määrittystapojen eroavaisuuksiin. Suurimpana erona rakennusajan kuormitusmääräyksiä ja Eurokoodin mukaisen suunnittelun välillä oli rakennesuunnittelijan omien arvioiden määrän vähentyminen ja suunnitteluohjeiden laajuuden kasvaminen ja tarkentuminen nykyaikana.

Työn laskentaosuudessa tavoitteena oli selvittää yksittäiseen teräsköyteen kohdistuvien rasi-
tusten suuruus karkeasti. Köyden rasi-
tukset laskettiin käsin laskemalla ja RFEM-las-
kentaohjelman avulla nykyaikaisilla sekä rakennusaikaisilla kuormilla. Nykyaikaiset rasi-
tukset laskettiin murtorajatil-
lan mukaisilla kuormilla. Rakennusaikaisten rasi-
tusten las-
kennassa käytettiin hyväksi sallittujen jännitysten menetelmää. Työn laajuuden ja tehty-
jen rajausten sekä lukuisien epätarkkuustekijöiden takia työssä ei oteta kantaa raken-
teen kestävyys-
riittävyys-

LÄHTEET

Aamulehti (1965). Jäähalli numeroina. N:o 26.

Ahola, O. (2018). Hakametsän jäähallin ilmakehu. Aamulehti. Saatavissa (1.3.2020): <https://www.aamulehti.fi/a/201242755>.

Buchholdt, H. A. (1999). An Introduction to Cable Roof Structures. Second edition. Thomas Telford Ltd.

ESDEP Course, Lecture 7.4.2: Tension Members II. Saatavissa (21.3.2020): <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg07/10420.htm>.

Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat = Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-3: General actions. Snow loads. (2015). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1991-1-3. Helsinki.

Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat = Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions. (2011). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1991-1-4. Helsinki.

Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. osa 1-11: Vedettyjä rakenneosia sisältävien rakenteiden suunnittelu = Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-11: Design of structures with tension components (2009). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1993-1-11. Helsinki.

Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet = Eurocode. Basis of structural design. (2006). Suomen standardisoimisliitto. SFS-EN 1990. Helsinki.

Hakametsän jäähalli (1964). Vanhoja valokuvia jäähallin rakentamisen ajoilta. Saatavissa (1.3.2020): <https://koppa.tampere.fi/alfresco/service/com/eduiX/imageGallery-ui/431f76aa-2031-43fa-a151-ff9b4afc2b8c>.

Krishna, P. & Godbole, P.N. (2013). Cable-Suspended Roofs, Second Edition. McGraw-Hill Education. Saatavissa (21.3.2020): <https://www-accessengineeringlibrary-com.lib-proxy.tuni.fi/content/book/9781259028472>.

Matson-Mäkelä, K. (2015). Suomen ensimmäinen jäähalli täyttää 50 vuotta – "Hakamettä" on monelle kiekkoilijalle toinen koti. Yle. Saatavissa (1.3.2020): <https://yle.fi/uutiset/3-7765473>.

Ostenfeld, C. & Jønson, W. (1964). Jäähalli Tampere. Rakennepiirustukset.

Rakenteiden kuormitusmääräykset. (1955). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. RIY A26.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma. (2019). Rakenteiden lujuus ja vakaus. Rakenteiden kuormat. Ympäristöministeriö. RakMk.

Svenson, H. (2012). Cable-Stayed Bridges: 40 Years of Experience Worldwide. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische. Saatavissa (21.3.2020.): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1343451>.